Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias línea terminal Ingeniería de Biosistemas

Invernadero híbrido malla-sombra para el control de temperatura con ventilación natural

Opción de titulación
Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ciencias

Presenta:
Ing. Luis Alfonso Argüelles Castillo

Dirigido por:
Dr. Enrique Rico García

Dr. Enrique Rico García Presidente	Firma
Dra. Rosalía Virginia Ocampo Velázquez Secretario	Firma
M.C. Adán Mercado Luna Vocal	Firma
Dr. Irineo Torres Pacheco Suplente	Firma
Dr. Andrés Cruz Hernández Suplente	Firma

Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Directora de Investigación y Posgrado

Centro Universitario, Querétaro, Qro.
Mayo 2015

REPOSITORIO INSTITUCIONAL DGBSDI-UAQ

La presente obra está bajo la licencia:
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es

CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:

Atribución — Usted debe dar crédito de manera adecuada , brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios . Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.

NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con propósitos comerciales .

SinDerivadas — Si remezcla, transforma o crea a partir del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una excepción o limitación aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como publicidad, privacidad, o derechos morales pueden limitar la forma en que utilice el material.

RESUMEN

Se generan temperaturas superiores a 40 ° C en el interior de los invernaderos con ventilación natural durante el verano, por lo que el objetivo de este estudio fue determinar el área y tipo de material de las ventanas adecuado para diseñar un invernadero que mitigue las altas temperaturas.

Este trabajo consistió de tres etapas. La primera etapa fue el diseño de un invernadero propuesto a partir de la herramienta de modelación Flotran 2D; la segunda etapa se enfocó en la construcción de tres estructuras a escala (Invernadero Control, Invernadero Hibrido y Malla Sombra) y la toma de variables climatológicas en ellos; la tercera etapa fue la simulación de los modelos a escala mediante el programa ANSYS 15.0 (FLUENT) y su validación.

Se obtuvo que la radiación total registrada durante el periodo de toma de datos alcanza un pico diario por encima de 1000 watt/m^2, el cual se da entre las 11:30 am y 1:30 pm. La estructura hibrida abierta presento un gradiente térmico (GT=-4.65°C) negativo en el punto de máxima temperatura del día, mientras el invernadero control genero incrementos en las temperaturas (GT=1.35°C).

PALABRAS CLAVE: CFD, SIMULACIÓN, MODELACIÓN, CONTROL CLIMÁTICO.

ABSTRACT

Temperatures above 40 °C are generated inside of naturally ventilated greenhouses during the summer, so the aim of this study was to determine the area and configuration of windows necessary to design a greenhouse that mitigate high temperatures.

This work consisted of three stages. The first step was to design a proposed from 2D modeling tool FLOTRAN; the second phase focused on the construction of three structures to scale (Control Greenhouse, Hybrid greenhouse and Net House) to monitor climatic variables; The third stage was the simulation of scale models by ANSYS 15.0 (FLUENT) and its validation.

It was found that the total radiation recorded during the data collection period reached a daily peak above 1000 watt / m^2, which is between 11:30 am and 1:30 pm. The open hybrid structure presented a negative temperature gradient (GT = -4.65 ° C) at the point of maximum temperature of the day, while control greenhouse generated an increases in temperatures (GT = 1.35 ° C).

KEYWORDS: CFD, SIMULATION, MODELATION, CLIMATE CONTROL.

AGRADECIMIENTOS

El Ingeniero en Irrigación Luis Alfonso Argüelles Castillo agradece al CONACYT por la beca otorgada.

Al Dr. Enrique Rico García, por transmitirme sus conocimientos y guiarme en la realización de la tesis.

Contenido

I. INTRODUCCIÓN 9

II. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS 11

III. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA 12

3.1 Agricultura protegida 12

3.1.1 Agricultura protegida en México 13

3.2 Variables climáticas y su interacción con la planta. 14

3.2.1 Radiación 14

3.2.2 Humedad 15

3.2.3 Viento 16

3.2.4 Temperatura 17

3.3 Manejo y estudio de la Temperatura. 19

3.3.1 Métodos de enfriamiento 19

3.3.2 Cubiertas 21

3.3.3 Métodos de estudio 24

3.4 Dinámica de fluidos computacional 24

3.4.1 Modelos del flujo 26

3.4.2 Consideraciones de los modelos 31

3.4.3 Estudios realizados en invernaderos mediante CFD 35

IV. METODOLOGÍA 38

4.1 Propuesta de invernadero 39

4.1.1 Condiciones de frontera y consideraciones del modelo. 40

4.2 Fase experimental 41

4.1 Construcción de modelos 42

4.2. Toma de datos 45

4.3 Simulación de Modelos 49
V. RESULTADOS 52
5.1 Propuesta de Invernadero 52
5.2 Fase experimental 57
5.2.1 Radiación 57
5.2.2 Temperatura 59
5.3 Simulación de modelos 65
VI. CONCLUSIONES 72
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 73
VIII. ANEXOS 75
Anexo 1: Artículo publicado 75
Anexo 2. Manual Ansys 15.0 (Fluent) 79

Índice de cuadros

Cuadro

1Nivel tecnológico de invernaderos en México SAGARPA (2009)..... 13
2 Modelos generados en FLONTRAN. 39
3 Características físicas de los elementos simulados. 51
4. Condiciones de frontera 51
5 Flujo de viento en las salidas 53
6 Operación de la ventana cenital a barlovento..... 53
7 Análisis estadístico del gradiente de temperatura..... 64

Índice de Figuras

Figura

1 Estructura del proyecto..... 38
2Disposición de las cubiertas en los modelos. 39
3Ubicación del campus Amazcala, de la F.I. de la UAQ. 41
4 Estructura de PTR sin cubierta..... 42
5 Invernadero hibrido. 43
6 Invernadero control con ventanas con cenitales abiertas 44
7 Estructura cubierta con malla sombra al 70%..... 44
8 Distribución de invernaderos en el campus Amazcala..... 45
9 Sensor de radiación y temperatura con protector de radiación. 46
10 Sensores de radiación, temperatura y viento en invernadero control..... 46
11 Conexión anemómetro ultrasónico a RS-232 48
12 Geometría del modelo 49
13 Estabilización del flujo de viento en el dominio. 49
14 Mallado hexaédrico en el Invernadero Control 50
15 Invernadero a dos aguas. 52
16 Flujo de aire en la ventana cenital. 54
17 Perfil de velocidades, modelo 25%-50% 55
18 Perfil de velocidades, modelo 25%-100%..... 55
19Distribución de velocidades (m/s) modelo 25%-50% 56
20 Radiación total para un ciclo de 6 días. 58
21 Temperaturas promedios Est. Coyotillos para 1950-2010. 59
22 Temperatura registradas para un ciclo de seis días. 60
23 Temperatura externa el día 27 de octubre de 2014. 60
24 Comparación de temperaturas en los modelos 61
25 Comparativo de radiación total en los modelos. 62
26 Gradientes térmicos para un ciclo de 6 dias. 63
27 Flujo de viento estable en el modelo control. 65
28 Porcentaje de error de los modelos 66
29 Temperatura en el Invernadero control e Hibrido abierto. 67
30 Velocidad de viento en el Invernadero control e Hibrido abierto. 68
31 Flujo de viento de Derecha-Izquierda en el invernadero control. 69

32 Temperatura estructura de malla sombra. 69
33 Velocidad de viento estructura de malla sombra. 70
34 Temperatura estructura de cubierta plástica..... 71
33 Velocidad de viento estructura de cubierta plástica. 71

I. INTRODUCCIÓN

La agricultura protegida tiene como finalidad dar las condiciones favorables para que las plantas alcancen mayores producciones que las que se obtendrían a cielo abierto por la posibilidad de mitigar los diferentes tipos de stress, sin embargo de acuerdo a las condiciones climáticas del lugar donde se vaya a instalar una estructura de este tipo deberá tener ciertas características que nos permitan aprovechar las condiciones naturales del lugar y así no elevar los costos de producción.

Las condiciones de climatología y la ecología definen la importancia de las características ambientales de una cierta zona y establecen su aptitud para cultivos en invernaderos desde un punto de vista económico. Las condiciones climáticas son determinantes del microclima generado dentro de un invernadero y de su manejo futuro, por lo que su conocimiento previo es necesario al construir el invernadero (Castilla N., 2005).

Este ambiente que podemos llamar “exterior” es el que determina si es posible o no instalar un determinado tipo de invernadero, su orientación, etc., y otorga unas características peculiares al microclima dentro del invernadero, en el cual no ha habido operaciones de climatización, pero ha sufrido modificaciones sustanciales con respecto del exterior y de los parámetros determinantes: temperatura, luz, grado higrométrico y CO_2.

En México, se han generado programas de apoyos que alientan a los productores agrícolas a cambiarse a la agricultura protegida sin embargo los invernaderos que se están construyendo son de tecnología introducida de otros países, en su mayoría de Europa, donde las condiciones climáticas que tienen que contrarrestar para favorecer a los cultivos no se asemejan a las limitantes que tenemos en nuestro país, siendo que estos invernaderos les causan más problemas a los agricultores de los que les resuelven.

Las temperaturas inadecuadas dentro de los invernaderos se intentan subsanar con altas inversiones en equipos de enfriamiento como extractores, paredes húmedas, equipos de nebulización entre otros métodos que no están al alcance de los pequeños productores. Por lo que en verano podemos encontrar invernaderos donde se alcanzan temperaturas superiores a los 40°C, condiciones desfavorables para los cultivos ya que la actividad fotosintética tiene una clara respuesta a la temperatura alcanzando un óptimo (de 25° a 35° C en la mayoría de las especies hortícolas) y disminuye a valores superiores hasta inhibirse el crecimiento (Urban,1997), temperaturas que incluso son desfavorables para que los trabajadores puedan realizar las labores culturales de manera adecuada.

Por lo cual es fundamental desarrollar tecnología que esté acorde a las necesidades del campo mexicano que permita reducir los costos de producción así como mejorar los rendimientos que les permitirá ser competitivos en el mercado globalizado. La experimentación que se realiza para analizar el comportamiento de modelos de invernaderos a diferentes condiciones emplea diferentes técnicas como túneles de vientos con condiciones controladas, humo trazador, o la medición directa de las variables meteorológicas en invernaderos ya en producción, técnicas que necesitan fuertes inversiones y tiempos prolongados. Estas técnicas ahora son complementadas por el uso de CFD, permitiendo reducir los tiempos de experimentación.

La principal ventaja de CFD no sólo recae en la predicción de la tasa de ventilación sino también del patrón de movimiento de aire así como la distribución de la temperatura y humedad dentro del invernadero. En este proyecto se utilizaron las técnicas de CFD para el diseño de un invernadero que adaptado a las condiciones del semi-desierto, que permita controlar el exceso de altas temperaturas durante el verano.

II. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

Hipótesis

Una estructura hibrida invernadero-malla sombra en condiciones climáticas semiáridas presenta un gradiente térmico menor que una estructura convencional permitiendo dar condiciones más favorables a los cultivos dentro de ella.

Objetivos

Objetivo General

Diseñar un invernadero que permita tener condiciones más cercanas a la temperatura del aire a la sombra para la condición semiárida.

Objetivos Particulares

- Construir los modelos a escala de los invernaderos propuestos.
- Evaluar las condiciones de temperaturas interior-exteriores en cada tipo de invernadero.
- Modelar el comportamiento de la temperatura en los diferentes diseños de invernadero

III. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 Agricultura protegida

El invernadero se ha utilizado en diversas formas durante siglos como medio de protección de las plantas de las inclemencias del tiempo, lo que permite, por ejemplo, cultivar especies exóticas en latitudes más altas. Esto se consigue mediante la creación de mejores condiciones climáticas para su crecimiento, tradicionalmente mediante la conservación de temperaturas más elevadas que las temperaturas del ambiente externa (Critten y Bailey, 2002).

Sin embargo, al hablar de agricultura protegida nos referimos a un término que abarca mucho más de lo que en un principio se manejaba para los invernaderos, siendo aquella que se realiza bajo estructuras construidas con la finalidad de evitar las restricciones que el medio impone al desarrollo de las plantas cultivadas. Así, mediante el empleo de diversas estructuras y técnicas se reducen al mínimo algunas de las condiciones restrictivas del clima sobre los vegetales.

La agricultura protegida se presenta como una alternativa para aprovechar el uso del agua y proteger los cultivos de los cambios bruscos de temperatura y de condiciones adversas como el viento, la lluvia, las plagas, los animales y la contaminación. En ellos se crean condiciones artificiales de microclima que favorecen al desarrollo del cultivo en cualquier temporada, como niveles óptimos de radiación solar, de temperatura, de humedad de aire y de suelo, produciendo así cultivos con mayor rendimiento que con la agricultura tradicional (Castañeda 2002).

Esta flexibilidad de diseño ha permitido el invernadero para ser utilizado en regiones tan diversas como el norte de Europa, los países del Mediterráneo y del desierto caliente. Sin embargo, un entorno protegido puede ser un " arma de doble filo ", ya que también proporciona un ambiente cómodo en el que las plagas y hongos pueden estar al acecho (Critten y Bailey, 2002).

3.1.1 Agricultura protegida en México

La superficie de invernaderos en México ha incrementado en forma exponencial ya que en el año 2000 había apenas unas mil Ha y hoy día SAGARPA (2011) habla de 9 mil 500 Ha, mientras que el censo agropecuario realizado por el INEGI (2010) es de 12 mil 500 Ha.

Los tipos de invernaderos según su tecnología van a depender principalmente del grado de inversión y de la característica climática de la zona. Informes de SAGARPA (2009), en nuestro país existen diferentes tecnologías (Cuadro 1).

Cuadro 1Nivel tecnológico de invernaderos en México SAGARPA (2009).

Nivel Tecn.	Cubierta	Ambiente del follaje	Ambiente de la raíz	Método de cultivo	Rend. Esperado (Kg/m²/año)	Inversión ($/m²/año)
Bajo	Capa simple de polietileno	Ventilación natural, sin calefacción	Tezontle, suelo, riego por goteo con control manual	Alambre media altura	10-20	275-350
Medio	Capa doble de polietileno	Calefacción, ventilación natural mas sistema de refrigeración	Suelo o hidroponía, riego por goteo con control.	Cultivo de alambre elevado, fertirrigación computarizada	20-50	350-1100
Alto	Vidrio, PE, o policarbonato	CO2, mallas, ventilación forzada, calefacción y refrigeración	Hidroponía, riego por goteo con control automático.	Cultivo de alambre elevado, computarizado	50-75	1100-2200.

Según Canchola (2010), el nivel tecnológico promedio estimado en nuestro país es de 40%, si se considera un paquete tecnológico completo con refrigeración, recirculación de agua, ventilación automática, calefacción, pantallas térmicas para ahorro de energía, sensores, control automatización, sustratos y cultivos en hidroponía.

En México según SAGARPA (2011) los proyectos de agricultura protegida de alto valor tecnológico (5%) están en Jalisco y Sonora. Le siguen invernaderos de mediano costo (25%) en el Bajío, y de bajo costo (70%) ubicados principalmente en los estados de Baja California y Sinaloa.

La agricultura bajo invernadero se ha desarrollado en México en la última década. El gobierno mexicano ha incentivado el cultivo bajo invernadero, creando facilidades para la importación de los mismos que incluyen acciones como la exclusión del pago del IVA y la nula tarifa arancelaria. Se prevé que continúe su crecimiento a un ritmo estimado entre el 10 al 15% que equivale a una proporción similar de superficie cubierta actualmente, la cual está conformada por el 55% de recubrimiento plástico y 45% malla sombra; ambos con ventilación natural (Guantes, 2006).

3.2 Variables climáticas y su interacción con la planta.

La rentabilidad de los cultivos depende de las buenas condiciones ambientales que les permitan obtener cosechas abundantes, para esto el empleo de los invernaderos tienen como función proporcionar protección a las plantas de las condiciones desfavorables del clima. Al interior del invernadero se lleva a cabo una interrelación de variables que definen el microclima, las cuales forman un sistema de dependencias complejo, dichas variables son: Radiación solar, Temperatura, Humedad relativa y CO_2 (Castilla, 2007).

3.2.1 Radiación

Las condiciones de radiación solar en invernadero son muy importantes desde el punto de vista productivo, no solo cuantitativamente sino también cualitativamente. La radiación actúa sobre el crecimiento y el desarrollo de las planas como fuente energética para la asimilación fotosintética del CO2, así como fuente primaria de calor y estímulo para la regulación del desarrollo (Alpi, 1999).

La primera alteración que genera el invernadero sobre los parámetros microclimáticos es una reducción de radiación solar (Castilla N., 2005). La luz juega un papel muy importante en la vida de las platas, tanto así que se cree que un 1% más de luz puede proporcionar un aumento de un 1% en la producción (Morris citado por Alpi A., Tognoni F., 1968). Los altos niveles de radiación también pueden inducir, por el mayor aporte energético, calentamiento de hojas aumentando el consumo de agua, pudiendo llegar a generar desecación en casos extremos.

Las cubiertas utilizadas en estos invernaderos tiene en sus características un porcentaje de transmisividad de la radiación UV lo cual es usado ampliamente para la protección de los cultivos sin embargo, el efecto que tiene sobre el comportamiento de estos no se le ha puesto mucha atención. C. Kittas et al. (2006) trabajaron con berenjena en donde determinaron que un plástico que limita la radiación UV en el invernadero teniendo un incremento de 20% en la producción y mejor calidad.

La cantidad de luz, su intensidad y duración influye en la cantidad de fotosíntesis realizada por una planta, siendo que solo una fracción de la radiación solar global es empleada en la fotosíntesis. Esta fracción se conoce como radiación PAR (del inglés “Photosynthetic Active Radiation”), (Castilla N., 2005). El nivel de radiación adecuado para saturar el sistema fotosintético de muchas plantas (tipo C3) es alrededor de 400umol /m^2s, cuando se suministra durante 16 horas al día. Aunque la luz PAR tiene un rango de 400 a 700 nm, la región más brillante para el ojo humano es la de menor efecto en las plantas. Al medir la Luz Cuántica podemos saber si nuestras plantas están recibiendo suficiente cantidad de luz útil (Reed, 1993).

3.2.2 Humedad

La humedad relativa se define como la cantidad de vapor de agua contenida en la atmosfera en relación con la cantidad máxima que dicha atmosfera podría ser capaz de retener a una temperatura dada. Es una variable que se

comporta de manera inversamente proporcional a la temperatura, en función que en una masa de aire constante, a mayor temperatura mayor volumen y por tanto mayor capacidad de retención de vapor de agua (Humedad Absoluta) y menor Humedad relativa (Roy y Boulard, 2005).

La humedad ambiental no interviene en la fotosíntesis. Su papel es indirecto a través de su influencia en la apertura estomática. En condiciones adecuadas de suministro hídrico (riegos no limitantes) y en ausencia de problemas de salinidad, la fotosíntesis no es afectada por una humedad ambiental baja. Puede ocurrir que, en condiciones de muy alta demanda evaporativa coincidentes con baja humedad o con dificultades de suministro hídrico desde las raíces, haya limitación de fotosíntesis, pero ello sería debido a un insuficiente suministro hídrico que induciría el cierre estomático por el estado hídrico foliar (Castilla, 2005).

La humedad relativa más allá del nivel óptimo para crecimiento de las plantas ha sido reportado que inhibe la transpiración (Dorais et al., 2004), la polinización y el cuajado de los frutos (Peet et al., 2003) y se sospecha a deteriora la calidad de los frutos de tomate (Bañuelos et al., 1985; Max, 2009).

También hay que considerar que según VAISALA (2013) la humedad relativa muy alta favorece la propagación de los hongos, provoca enfermedades en las plantas y también daños en las estructuras de los invernaderos. Los ambientes muy secos disminuyen el ritmo de crecimiento de las plantas. La humedad relativa óptima depende del tipo de planta que se cultive si bien el rango típico oscila entre el 50 y el 70 %.

3.2.3 Viento

El viento puede influenciar el crecimiento de las plantas, la reproducción y su distribución y en otros casos incluso puede ser letal. Puede deformar mecánicamente las plantas e influenciar la dispersión de polen, semillas y plagas. En condiciones de invernadero la circulación del aire se hace de manera horizontal recomiéndense velocidades de aire no mayores de 1 m/s (que afectan a las

plantas) por lo que hay que usar ventiladores o sobrepresión menor de 30 pascales (Nobel Park, 2009).

Las principales fuerzas responsables del movimiento del aire en los invernaderos son:

El efecto de chimenea, asociado con los gradientes de densidad, y la fuerza de convección asociada con el viento. Las fuerzas de flotación resultado de los gradientes de presión inducidos por la distribución heterogénea de la temperatura y la humedad causan el desplazamiento del flujo que incrementa la circulación del aire dentro del invernadero. El efecto chimenea es la principal fuerza de movimiento cuando el invernadero esta complemente cerrado o cuando la velocidad del viento es muy débil. Siendo que la condición más desfavorable es cuando el invernadero está completamente confinado, ya que el movimiento del aire es controlado por los efectos térmicos de los cuales el operador tiene muy poca influencia (Bournet y Boulard, 2010).

3.2.4 Temperatura

La temperatura afecta esencialmente todo los procesos en las plantas. Los procesos fisiológicos se llevan a cabo en un rango pequeño de valores de temperatura, las reacciones bioquímicas tiene un valor de temperatura óptimo (Nobel Park, 2009), como la temperatura tiene un gran efecto sobre la planta, han evolucionado para reaccionar y poder adaptarse a las condiciones limitando su actividad en condiciones de estrés.

La actividad fotosintética tiene una clara respuesta a la temperatura; muestra un mínimo (sobre 5°), alcanza un óptimo (de 25 a 35°C en la mayoría de las especies hortícolas) y disminuye a valores superiores. La temperatura óptima aumenta con el nivel de radiación y de CO_2. En la práctica, no es de interés mantener temperaturas altas con baja radiación. Con temperaturas altas los cultivos crecen mejor con radiación elevada; por ello, hay que tratar de limitar los

sombreros en cultivos hortícolas usuales (que son exigentes en radiación) sin embargo cuando la planta es sometida a condiciones de estrés, a 35 °C o 30 °C en el caso de aire seco, reacciona cerrando los estomas para limitar la perdida de agua lo cual limita el intercambio de CO_2 y por consiguiente se reduce la tasa de crecimiento y desarrollo de la planta (Castilla N., 2005).

El estrés por calor afecta negativamente el crecimiento vegetativo y generativo de las plantas de tomate (Max, 2009), por ejemplo, excesivas temperaturas inducen el cierre de estomas lo que conduce a la reducción de la transpiración y la fotosíntesis, mientras que los procesos respiratorios se elevan (Morales et al., 2003). Por consiguiente, la tasas producción de biomasa y de transporte del xilema disminuyen (Adams y Ho, 1993) lo que implica la reducción del rendimiento y/o calidad de la fruta. Más aún temperaturas altas durante el día y la noche impiden drásticamente la floración del tomate (Dane et al., 1991), la polinización (Adams et al., 2001) y el amarre de frutos (Peet et al., 1997), lo que resulta en un mayor número de frutos partenocárpicos y por lo tanto menor rendimientos comercializable (Kleinhenz et al., 2006).

Las altas temperaturas producen desordenes fisiológicos que afectan a la reducción de cuajado y maduración prematura de los frutos de tomate y pimiento (AVRDC, 1990). La obtención de frutos de tomate compactos exige que la temperatura no exceda de los 30°C, por otra parte la maduración desigual caracterizada por la presencia de zonas verdes sobre la pared del fruto y de zonas suberosas oscuras bajo la piel, y se asocia a una falta de luminosidad contrastando con una temperatura excesiva (FAO, 1988).

3.3 Manejo y estudio de la Temperatura.

La temperatura al ser un factor tan determinante en los rendimientos de un cultivo ha tomado tal importancia que existen distintos métodos bajo las cuales se pretende dar las condiciones óptimas a los cultivos.

Los altos costos de tecnología e insumos, nos conducen a proponer soluciones que sean accesibles para los agricultores que no cuentan con el capital para crear un clima artificial dentro del invernadero, y poder aprovechar al máximo las condiciones climáticas del lugar, siendo así más amigables con el ambiente.

3.3.1 Métodos de enfriamiento

Para contrarrestar los efectos de las altas temperaturas dentro de un invernadero y proporcionar el efecto de oasis se tiene diferentes métodos en qué consisten en reducir los aportes de energía y eliminar los excesos de la misma. La reducción de los aportes se centra, en la práctica, en limitar la radiación solar, mediante sombreo, interior o exterior al invernadero. Mientras que el aumento de las pérdidas de energía se consigue con ventilación, natural o estática y forzada o dinámica, como primer paso (Castilla Nicolás, 2005).

La aplicación de métodos evaporativos tienen un gran impacto en la temperatura interior del invernadero como lo demostró Ahmed E. M. (2011) en su experimento al obtener una diferencia de temperatura de hasta 10°C en los diferentes métodos evaluados con respecto a la temperatura exterior sin embargo el método de ventilación natural es el más utilizado por ser el más económico en donde el objetivo es generar el intercambio del aire interior con el exterior, con la dependencia de su eficiencia en la velocidad del viento y de la diferencia interior y exterior de temperaturas (Katsoulas N. et al.,2006).

Los principales ejemplos de métodos de enfriamiento son:

a) Los sistemas de nebulización tienen por fin crear una niebla para refrigerar el interior del invernadero. Las gotas de agua han de ser lo suficientemente pequeñas para que no lleguen a mojar las plantas, para evitar el desarrollo de enfermedades y el depósito de las sales de agua, al evaporarse desde la superficie de las hojas, entre dos nebulizaciones. El primer efecto de la nebulización de agua es el enfriamiento del aire por evaporación al extraer 2.45x103 J/g de energía calorífica. Hay tres tipos de sistemas de nebulización: de agua a alta presión, de agua a baja presión y sistema agua/aire (Castilla N., 2005).
b) El método más simple para evaporar agua es hacerlo a través de la planta por transpiración, lo que implica un suministro de agua sin restricciones y una renovación de aire para evacuar el calor excedente.
c) La limitación de la radiación solar, como medio de evitar las altas temperaturas en invernadero, implica la reducción de fotosíntesis en zonas donde se tiene limitada la radiación sin embargo en México se tiene un exceso usar este método como una medida de reducción de las temperaturas interiores así como evitar el estrés de los cultivos por exceso de radiación. Los dispositivos de sombreo pueden ser exteriores o interiores al invernadero. El blanqueo encalado de cubierta con diversos productos que reflejan la radiación es práctica usual en periodos de alta radiación. La duración depende de las características de la solución empleada y de la lluvia, que puede lavarlos (Castilla N., 2005).
d) La ventilación forzada o dinámica consiste en para inyectar o extraer aire del invernadero se emplean ventiladores tipo helicoidal, que proporcionan grandes caudales a poca presión. Estos ventiladores están hechos para trabajar a poca velocidad de rotación, pues si se fuerza su velocidad son muy ruidosos y consumen mucha energía. Los invernaderos impermeables a los insectos necesitan ventilación dinámica. En este caso la ventilación debe ser, preferentemente, por inyección desde el exterior funcionando a

sobrepresión. Las tomas de aire deben evitar el acceso de insectos (Castilla N., 2005).

e) El método más utilizado por su bajo costo es el de ventilación natural que permite la renovación del aire caliente interior por aire fresco del exterior. Se consigue por medio de aberturas permanentes o temporales en el techo, en las paredes laterales o en las frontales. La eficiencia de la ventilación, cuantificada por la tasa de renovación de aire, depende de las condiciones climáticas: fuerza y dirección del viento exterior y diferencia de temperatura entre interior y exterior. Estos dos efectos, efecto de viento y efecto térmico, generan diferencias de presión que hacen moverse el aire (convección natural), desde las presiones más altas a las más bajas. La eficiencia de ventilación depende, también, de las características de las aperturas (superficies y posición) y de la vegetación (disposición de líneas de cultivo respecto a las ventanas laterales) (Castilla N., 2005).

3.3.2 Cubiertas

La conveniencia económica y la eficiencia de cualquier medio de protección dependen, en cierta medida, de las características del recubrimiento. Este, en particular, influye de modo importante en el balance energético de la instalación, ya que a través de su superficie, en general muy amplia, se produce la mayor parte de los intercambios energéticos entre el ambiente exterior y el confinado (Alpi y Tognoni, 1991).

Una modificación que se ha implementado en los invernaderos y que se ha convertido en una práctica común en muchos países es la de utilizar pantallas o mallas para reducir la entrada de insectos, una correcta selección de este tipo de mallas mantendrá a los insectos fuera pero también aumenta la resistencia al flujo de aire, lo que reduce la eficacia de la ventilación. MeirTeitel (2007) sugiere que la reducción en la ventilación provocada por la instalación de las pantallas se puede superar mediante el aumento de la zona de la malla en las ventilas.

En Israel y otros países del Mediterráneo se han vuelto populares estructuras cubiertas totalmente de mallas anti-insectos, principalmente por su bajo costo (Teitel M., 2007), este tipo de estructuras fue estudiado por Tanny J. (2003) en donde determino que tienen un efecto de reducción de entre 51% a 71% de la tasa de ventilación.

Otra opción para el cultivo son las casas sombras que son utilizadas principalmente para reducir la carga de radiación y velocidad del viento, para proteger los cultivos contra el granizo tormentas y para minimizar la invasión de insectos permitiendo así una reducción significativa en la aplicación de plaguicidas, puesto que las pantallas impiden el tipo de intercambio de la radiación, la masa, el calor y momento entre el interior y el exterior del invernadero que modifican el microclima de cultivos y sus necesidades de agua (Tanny J., 2013).

Se han estudiado los efectos que tiene la reducción de la radiación solar en distintos cultivos, encontrándose para algunos casos que se obtienen mejores rendimientos reduciendo la cantidad de radiación incidente al cultivo, tal es el caso de Tetrastigma hemsleyanum cultivo que a un sombreado del 67% se obtuvieron las hojas más grandes (Dai Y. et al. , 2008). Ilic Z. S. et al. (2012) realizaron un experimento en el que se compararon diferentes grados de sombreado y con distintos colores de mallas para el cultivo de tomate encontrando que para condiciones áridas con las mallas de color rojo y aperlado obtuvieron 27.3 y 28.1% de mayor rendimiento con respecto a su el control que fue un invernadero con cubierta plástica, sin embargo con el de color negro se encontró una reducción del rendimiento.

Tipos de cubiertas

En la actualidad en el mercado se tienen una amplia gama de cubiertas para los invernaderos, destacando por su uso las siguientes:

Polietileno: La amplia difusión que el polietileno de baja densidad (LDPE) ha tenido en Europa para la preparación de materiales flexibles de recubrimiento,

colocándolo en el primer lugar en relación con los demás polímeros, encuentra motivaciones tanto en el orden económico como de carácter estrictamente agronómico. El polietileno asegura una resistencia y una indeformabilidad mayores al artículo manufacturado en relación con las obtenidas con otros polímeros, y permite un recubrimiento eficiente de invernaderos considerablemente largos; los filmes de grandes dimensiones permanecen sobre las estructuras, incluso en presencia de condiciones climáticas adversas (Alpi y Tognoni, 1991).

Los artículos manufacturados de polietileno se han expandido de modo considerable, sobre todo en relación con la posibilidad de preparar filmes llamados “especiales”, mediante la adición al polímero de aditivos apropiados. En este caso se pueden asociar, y es la tendencia actual, en un único articulo manufacturado, características bastante diferentes entre sí (efecto térmico, larga duración, antigota, etc.).

Policarbonato: es un polímero termoplástico estabilizado a la acción de la radiación UV, que presenta unas óptimas características físico-mecánicas (ligero, muy resistente a los golpes, con pequeñas variaciones mecánicas en un amplio intervalo de temperatura), y, extruido en láminas alveoladas, manifiesta buen rendimiento térmico. Estas láminas se preparan en espesores variables y, si la distancia entre las dos paredes es más bien reducida, presentan la característica de ser flexibles, entre determinados límites (Alpi y Tognoni, 1991).

Mallas: se emplean para oscurecer, para sombrear, para reducir las pérdidas de energía y para control climático, así como evitar la entrada de insectos al invernadero cuando se emplean mallas anti-insectos. Las pantallas de sombre se emplean para reducir la intensidad de la luz y para limitar la radiación directa, a fin de restringir los excesos térmicos, de mejorar la calidad o evitar estrés hídrico. Pueden ser interiores o exteriores al invernadero.

3.3.3 Métodos de estudio

La experimentación que se realiza para analizar el comportamiento de modelos de invernaderos a diferentes condiciones emplea diferentes técnicas como túneles de vientos con condiciones controladas, humo trazador, o la medición directa de las variables meteorológicas en invernaderos ya en producción, técnicas que necesitan fuertes inversiones y tiempos prolongados. Estas técnicas ahora son complementadas por el uso de CFD, permitiendo reducir los tiempos de experimentación ya que mediante la modelación se podrá hacer un descarte de diseños ineficientes concentrando los recursos en las propuestas que mejor reaccionen a las condiciones sometidas. La principal ventaja de CFD no sólo recae en la predicción de la tasa de ventilación sino también del patrón de movimiento de aire así como la distribución de la temperatura y humedad dentro del invernadero (Bournet y Boulard, 2010).

3.4 Dinámica de fluidos computacional

La dinámica de fluidos computacional constituye un tercer aproximamiento en el estudio y desarrollo de toda la disciplina de la dinámica de fluidos. En el siglo XVII, se sentaron las bases para los experimentos de la dinámica de fluidos en Francia e Inglaterra. En los siglos XVIII y XIX se vio el gradual desarrollo de la teoría de la dinámica de fluidos, principalmente en Europa. Como resultado, a través del siglo XX el estudio y práctica de la dinámica de fluidos, involucro el uso de teoría de la mano de la experimentación pura.

Sin embargo, la llegada de computadoras de alta velocidad combinado con el desarrollo de algoritmos numéricos para resolver problemas físicos ha revolucionado la manera en que se estudia y practica la dinámica de fluidos en la actualidad. La dinámica de fluidos computacional provee una nueva aproximación, que complementa las otras dos aproximaciones de teoría pura y experimentación

pura, pero nunca las reemplazara. El futuro de la dinámica de fluidos va a resultar en el apropiado balance de estas tres aproximaciones, con la dinámica de fluidos computacional ayudando a interpretar y entender los resultados de la teoría y la experimentación, y viceversa.

La dinámica computacional de fluidos está basada en las ecuaciones que gobiernan la dinámica de fluidos (continuidad, momento y energía). Las ecuaciones obtenidas directamente del volumen o elemento fijo en el espacio se conocen como “forma de conservación”. Las ecuaciones obtenidas directamente del volumen o elemento moviéndose con el fluido se les conoce como “forma de no conservación”. Las ecuaciones utilizadas para CFD se presentan a continuación.

Los resultados de la dinámica de fluidos computacional son directamente análogos a los resultados de los túneles de viento obtenidos en laboratorio, los dos representan una serie de datos para configuraciones de flujo a diferentes números de Reynolds, números de Match, etc. Sin embargo, a diferencia de un túnel de viento, que es generalmente un equipo grande y pesado, un programa de computadora es algo que puedes llevar contigo en la palma de tu mano. Un programa de computadora, por lo tanto, es una herramienta fácilmente transportable, un “túnel de viento transportable”.

Los aspectos físicos de cualquier flujo de un fluido está gobernado por tres principios fundamentales: (1) la masa se conserva, (2) La segunda ley de Newton (fuerza = masa x aceleración), y (3) la energía se conserva. Estos principios fundamentales de la física pueden ser expresados en términos de ecuaciones matemáticas básicas, que son en su forma más general ecuaciones integrales o ecuaciones parciales diferenciales.

La dinámica de fluidos computacional es el arte de reemplazar las integrales y derivadas parciales en estas ecuaciones por formas algebraicas discretas, las cuales se resuelven para obtener unos valores de flujo en puntos discretos en tiempo y/o espacio. El producto final de CFD es una colección de

números, en contraste a una solución cerrada analítica. Sin embargo, en el largo plazo, el objetivo de la mayoría de los análisis de ingeniería, ya sea de forma cerrada o de alguna otra, es una descripción cuantitativa del problema.

3.4.1 Modelos del flujo

En la obtención de las ecuaciones básicas del movimiento del fluido, la siguiente filosofía siempre se sigue:

1. Elegir los principios físicos fundamentales apropiadas de las leyes de la física:
    - Conservación de la masa
    - F=ma
    - Conservación de la energía.
2. Aplicar estos principios físicos de a un modelo adecuado de flujo.
3. Desde esta aplicación, extraer las ecuaciones matemáticas que encarnan esos principios físicos.

Todo CFD, en una u otra forma, está basado en las ecuaciones fundamentales que gobiernan la dinámica de fluidos- La continuidad, el momento y las ecuaciones de energía. Son los enunciados matemáticos de los tres principios fundamentales de la física sobre los que toda dinámica de fluidos es basada:

Conservación de la masa.

Una de las magnitudes físicas más importantes de la hidrodinámica es el gasto masivo (R_m) o flujo másico o simplemente flujo, que se define como la cantidad de masa que atraviesa una determinada sección transversal de una tubería en la unidad de tiempo.

$$R_m = \frac{m}{t} = \frac{kg}{s}$$

La misma sección puede ser descrita como

$$R_v = \frac{pAvt}{t} = pAv$$

Ahora, si no existen fuentes ni sumideros ni acumulaciones de masa dentro de la tubería, por el principio de la conservación de la masa, el gasto masivo que atraviesa el área A, de una sección transversal de la tubería, deberá ser el mismo que el que atraviese por cualquier otra área transversal.

Considere un modelo de flujo, un volumen de control de forma arbitraria y de un tamaño finito. El volumen fijo en el espacio. La superficie que limita el volumen de control es llamada superficie de control. El fluido se mueve a través del volumen de control, fluyendo a través de la superficie de control. En un punto de la superficie de control la velocidad de flujo es V y el vector elemental del área de la superficie es dS. Se tiene igual que dV es el volumen elemental dentro del volumen de control finito. Aplicando al volumen de control, el principio fundamental de que la masa se conserva nos indica:

B=C

Donde B y C son solo símbolos para los lados derecho e izquierdo, respectivamente. Primero, obtenemos una expresión para B. El flujo de masa de un fluido en movimiento a través de una superficie es igual a el producto de (densidad) x (área de la superficie) x (componente de la velocidad perpendicular a la superficie). Por lo tanto el flujo de masa elemental a través del área dS es:

$$\rho V_n dS = \rho V \cdot dS$$

Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial}{\partial t}\iiint_V \rho dV + \iint_S \rho \mathbf{V} \cdot \mathbf{dS} = 0$$

Principio físico: F=ma.

La ecuación resultante es llamada ecuación de momento, esta aplicada a un fluido en movimiento dice que la fuerza en el fluido es igual a la masa por la aceleración de ese elemento. Esta es una relación de vector, y por lo tanto se puede dividir en tres relaciones escalares a través de los ejes x, y, z.

La segunda ley de Newton cuando es aplicada al elemento fluido en movimiento dice que la fuerza neta en el elemento fluido es igual a la masa por la aceleración del elemento. Esta es una relación de vector, por lo tanto puede ser dividido en tres relaciones escalares entre los ejes x, y, y z. Si solo consideramos el componente x de la segunda ley de Newton:

$$F_x = ma_x$$

Donde F_x y a_x son los componentes escalares de la fuerza y aceleración respectivamente. Primero consideramos que el lado izquierdo de esta ecuación está formado por dos tipos de fuerzas:

1. Fuerzas del cuerpo, las cuales actúan directamente en la masa volumétrica del elemento fluido. Estas fuerzas “actúan a la distancia”; como ejemplos tenemos; la fuerza gravitacional, fuerza eléctrica, y fuerzas magnéticas.
2. Fuerzas de superficie, las cuales actúan en la superficie del elemento fluido. Estas se deben debido a dos fuerzas: (a)la distribución de presiones actuando en la superficie, impuesta por el fluido externo que rodea al elemento fluido, y (b) la fuerza cortante y la fuerza de normal que actúa sobre la superficie, también impuesta por el fluido externo que “jala” o “empuja” sobre la superficie a partir de la fricción.

Si denotamos las fuerzas de cuerpo por unidad de masa actuando sobre el elemento fluido por f, con f_x como el componente en x. El volumen del elemento

fluido seria (dx dydz); por lo tanto, La fuerza de cuerpo sobre el elemento fluido actuando en la dirección del eje x seria

$$\rho f_x(dx\ dy\ dz)$$

La fuerza cortante y la fuerza normal en un fluido están relacionadas con la razón de cambio de la deformación del elemento fluido. La fuerza cortante, denotada por τ_{xy} está relacionada con la razón de cambio de la deformación cortante del elemento fluido, donde la fuerza normal, denotada por τ_{xx}, está relacionada con la razón de cambio en función del tiempo del volumen del elemento fluid. Como resultado, ambas fuerzas dependen de los gradientes de velocidad del flujo. En la mayoría de los flujos viscosos, las fuerzas normales son más pequeñas que las fuerzas cortantes y en muchos casos son despreciadas. Las fuerzas normales se vuelven importantes cuando los gradientes de las velocidades normales son muy grandes, por ejemplo dentro de una onda de choque.

$$F_x = \left[-\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}\right] dx\ dy\ dz + \ \rho f_x\ dx\ dy\ dz$$

Considerando el lado derecho de la segunda ley de newton, la masa del elemento fluido es fija e igual a m= ρ dx dydz. También tenemos que la aceleración del elemento fluido es la razón de cambio de la velocidad con respecto al tiempo. Por lo tanto, el componente de la aceleración en la dirección de X, denotada por a_x, es la razón de cambio de u con respecto al tiempo; desde que estamos siguiendo un elemento fluido en movimiento, esta será la razón de cambio dada por la derivada sustancial.

$$a_x = \frac{Du}{Dt}$$

Al combinar las ecuaciones anteriores se obtienen las ecuaciones de momento para los componentes de x, y, z.

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \ \rho f_x$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_x$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_x$$

En estas ecuaciones el elemento fluido se mueve junto con el flujo, por lo que están en su forma no conservativa. Estas son ecuaciones escalares y son llamadas las ecuaciones de Navier-Stokes. Las ecuaciones de Navier-Stokes pueden ser obtenidas en su forma conservativa, quedando de la siguiente manera.

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u V) = -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v V) = -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_x$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w V) = -\frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_x$$

Principio físico: La energía se conserva. Esta se refiere a la primera ley de la termodinámica, cuando se aplica a un modelo de flujo del elemento fluido en movimiento con el flujo, la primera ley nos dice que:

La razón de cambio de la energía dentro del elemento fluido	=	El flujo neto de calor en el elemento	+	Razón de trabajo hecho sobre el elemento debido a las fuerzas de cuerpo y de superficie.

Cuando un sistema es llevado de un estado inicial i a un estado final f, como consecuencia de los intercambios de energía con su medio ambiente, se tiene una variación ΔU en su energía interna, es decir, $\Delta U = U_f - U_i$, donde la energía

interna del sistema en el estado final f, U_f, menos la energía interna del sistema en el estado inicial i, U_i, es simplemente el cambio de energía interna del sistema y esta cantidad de energía tiene un valor definido e independiente de cómo se pasó el sistema del estado i a f.

De acuerdo con lo anterior, supóngase que el sistema elegido absorbe cierta cantidad de energía en forma de calor Q y al mismo tiempo realiza cierta cantidad de trabajo W. La diferencia Q-W representaría la energía total que atravesó las fronteras del sistema, por lo que recurriendo al principio de conservación de la energía, se tiene que Q-W y ΔU deben de ser iguales.

$$\Delta U = Q - W$$

3.4.2 Consideraciones de los modelos

Imaginemos un volumen cerrado dibujado con una región finita de flujo. Este volumen define un volumen de control V; una superficie de control S es definida como la superficie cerrada que delimita el volumen. El volumen de control puede fijarse en el espacio con el fluido que se mueve a través de él. Alternativamente, el volumen de control puede estar en movimiento con el fluido de tal manera que la misma partícula de fluido esta siempre en su interior. En cualquier caso, el volumen de control es una región razonable grande, una región finita del flujo.

Los principios físicos fundamentales se aplican a la del fluido dentro del volumen de control y al fluido que cruza la superficie de control. Por lo tanto, en vez de mirar todo el flujo a la vez, con el modelo de control limitamos nuestra atención a solo el fluido en la región finita del propio volumen.

La ecuación de flujo que se obtiene directamente mediante la aplicación de los principios físicos fundamentales para un volumen de control finito están en

forma integral, estas formas integrales de las ecuaciones pueden ser manipuladas para obtener indirectamente ecuaciones diferenciales parciales.

Las ecuaciones así obtenidas a partir del volumen de control finito fijo en el espacio, ya sea integrales o diferenciales parciales, se les llama ecuaciones de la forma de conservación. Las ecuaciones obtenidas a partir del volumen de control finito en movimiento con el fluido, en forma diferencial parcial o integral, se les llama forma no conservativa.

Condiciones físicas de frontera

Las ecuaciones antes descritas gobiernan el movimiento de un fluido. Estas ecuaciones son las mismas para cualquier fluido, ya sea si este pasa sobre un Boeing 747, a través de un túnel de viento subsónico o si pasa por un molino de viento. Sin embargo, el campo de flujo es diferente para estos casos, aunque las ecuaciones gobernantes sean las mismas. Las condiciones de frontera, y algunas veces las condiciones iniciales, dictan las soluciones particulares que serán obtenidas de estas ecuaciones.

Las condiciones de frontera para un flujo viscoso asumen una velocidad relativa de 0 entre la superficie y el gas en contacto con la superficie. Está considerada como una condición sin deslizamiento. Si la superficie es estacionaria, con el flujo moviéndose a través (para un flujo viscoso).

Adicionalmente, hay una condición análoga a con respecto a la temperatura. Si la temperatura del material de la superficie es denotada por T_w(temperatura de la pared), entonces la temperatura de la capa de fluido en contacto con la superficie será igual a T_w. Si en un problema la temperatura de la pared es conocida, entonces la condición de frontera de temperatura en el gas será $T=T_w$.

Por otra parte, si la temperatura de la pared es desconocida, por ejemplo, si esta cambia en función del tiempo debido a la transferencia de calor

aerodinámica o desde la superficie, entonces la ley de Fourier de conducción del calor provee las condiciones de frontera en la superficie. Denotando q_w como el flujo de calor en la pared, entonces la ley de Fourier se escribe de la siguiente forma

$$q_w = -(k\frac{\partial T}{\partial n})_w$$

Donde n denota la dirección normal de la pared. Aquí, el material de la superficie responde a la transferencia de calor de la pared, por lo tanto cambia T_w, lo que afecta q_w. Este problema debe ser resuelto a partir de resolver el flujo viscoso y la respuesta termal de la pared debida al material al mismo tiempo.

Flujo viscoso

El flujo viscoso es descrito por las ecuaciones de Navier-Stokes. Escrito en la forma de flujo estacionario, estas ecuaciones tienen un comportamiento matemático que es parcialmente elíptico.

Todos los fluidos poseen viscosidad; por consiguiente, el flujo viscoso es de gran importancia en el estudio de la dinámica de los fluidos reales. Sin embargo, existen situaciones en las que los efectos viscosos son despreciables y en las que el flujo puede considerarse como no-viscoso. Los esfuerzos cortantes serán importantes en aquellas regiones del flujo donde exista un gradiente de velocidad elevado.

En cualquier flujo real, el fluido en contacto directo con un contorno solido posee la misma velocidad que el contorno solido mismo, se produce una adherencia del fluido al contorno sólido. Puesto que la velocidad del fluido en contacto con el contorno solido es cero, respecto al mismo, en tanto que el fluido en su conjunto se mueve respecto al contorno sólido, aparece un gradiente de velocidad en el flujo, lo que da lugar a la aparición de esfuerzos cortantes que, a su vez, afectan al flujo.

Es posible considerar dos regiones diferenciadas. En la región adyacente al contorno sólido, donde el gradiente transversal de la velocidad es considerable,

existen esfuerzos cortantes que deben tenerse en cuenta, incluso en el caso de fluidos poco viscosos, y el flujo es rotacional; esta región recibe el nombre de capa límite. Fuera de la capa limite, el gradiente transversal de velocidades es nulo y, por tanto, no existen esfuerzos cortantes. Únicamente en la región de la capa limite son importantes los efectos de la viscosidad y el flujo deberá ser considerado como viscoso; fuera de esta región, los efectos de la viscosidad son despreciables y puede utilizarse la teoría del flujo no-viscoso (flujo irrotacional).

Naturalmente, no existe ninguna línea divisoria bien definida entre la región de flujo irrotacional, donde la fricción es despreciable, y la capa límite; pero es costumbre definir la capa límite como la región en la que la velocidad del fluido (paralela al contorno) es menor del 99% de la velocidad de la corriente libre. EL espesor de la capa limite crece desde el borde de ataque a lo lardo del contorno sólido. En el borde de ataque de una lámina plana semi-infinita, el espesor de la capa limite es cero; pero en el borde de ataque de un cuerpo romo (cilindro, ala de un avión, etc) la capa limite tiene un espesor finito, incluso en el punto de estancamiento. Para una velocidad de corriente libre dada, el espesor de la capa limite depende de la viscosidad del fluido.

Puede demostrarse que incluso en aquellos flujos en los que la presión varía a lo largo del contorno sólido, como es el caso de una superficie curva, la variación de la presión en la dirección normal al contorno es despreciable en el interior de la capa limite. Esto nos permite suponer que la distribución de presión en la capa limite esta impuesta por el gradiente de presión en la región de flujo irrotacional ubicada fuera de la capa límite. En muchos problemas prácticos el espesor de la capa limite es tan pequeño que el análisis del flujo irrotacional fuera de ella puede llevarse a cabo despreciando la presencia de la capa limite.

Mallado

Las gráficas de mallado consisten en líneas que conectan los puntos de la cuadricula. Las ecuaciones planteadas requieren que los cálculos sean hechos de una colección de punto discretos en una cuadricula. Este arreglo de puntos discretos a lo largo del campo de flujo es simplemente llamado grid (del inglés,

cuadricula). La determinación de una apropiado grid para el flujo sobre o a través de una forma geométrica dada es una cuestión seria. La cuestión de la generación del grid es consideración significativa en CFD, el tipo de grid que se escoja para un problema en específico puede hacer que se encuentre la solución o no se llegue a ninguna.

Si todas las aplicaciones de CFD con problemas físicos fueran uniformes, el grid rectangular podría ser usado en el plano físico. Sin embargo, pocos problemas reales están siempre tan ordenados, por lo que es necesario crear un mallado que se adecue a las condiciones de nuestro problema.

3.4.3 Estudios realizados en invernaderos mediante CFD

Históricamente, el inicio de desarrollo de CFD en las décadas de 1960 y 1970 fue conducido por las necesidades de la comunidad aeroespacial. Sin embargo, los usos modernos de CFD se incluyen en todas las disciplinas en donde el flujo de los fluidos es importante.

La dinámica de fluidos computacional ya tiene un gran impacto en el diseño de aviones, y una predicción por parte de “theNationalResearch Council” dice que CFD es una tecnología crítica en el diseño aerodinámico. No hay duda que el mayor enfoque de CFD es el de mejorar el proceso de diseño de cualquier máquina que tenga que lidiar con el movimiento de un fluido. El instrumento que ha permitido el crecimiento práctico de CFD es la computadora digital de altas velocidades. Las soluciones en CFD generalmente requieren la manipulación repetitiva de muchos miles, incluso millones de números, una tarea humanamente imposible sin la ayuda de las computadoras. Por lo tanto, los avances en CFD y sus aplicaciones a problemas de más detalle y sofisticación, están íntimamente relacionados con los avances en hardware de las computadoras, sobre todo en lo que respecta al almacenamiento y velocidad de ejecución.

En los últimos cinco años se han realizado estudios para determinar las condiciones del clima al interior de invernaderos empleando CFD, con lo cual se ha podido aumentar el grado de realismo incorporando modelos 3D, mallas anti insectos y la simulación del cultivo mediante su incorporación como medio poroso, entre otros. Los resultados obtenidos han podido contribuir al mejor entendimiento del fenómeno de la ventilación del invernadero (Norton et al., 2007).

El efecto de la radiación solar y térmica a menudo se toma en cuenta mediante el establecimiento de flujos de calor en los límites físicos del invernadero. La transferencia de radiación dentro del espacio del cultivo son de mayor interés, ya que determinan los dos principales procesos fisiológicos de los cultivos: la transpiración y la fotosíntesis. Por lo que es probable que reciba más atención en los próximos años (Bournet y Boulard, 2010). Pontikakos et al. (2006) analizaron los datos obtenidos de un modelo CFD, que muestran que la temperatura límite exterior es un parámetro crítico en el patrón de temperaturas al interior y que para determinadas temperaturas externas así como la dirección del viento, velocidad del aire se convierte en el parámetro principal. De acuerdo con Molina et al. (2006), mediante la ventilación natural, la distribución de la temperatura del aire al interior, en donde la temperatura media varía entre 28,2 a 32,9 º C con una temperatura exterior de 26 º C, se forman regiones en el interior del invernadero que fueron 13 º C más caliente que el aire exterior. Nebbali et al. (2006) utilizó un método semi-analítico para determinar el perfil de temperatura del suelo a partir de los parámetros meteorológicos, para ayudar a evaluar el intercambio de flujo de calor entre la superficie y el aire. Rico-García et al. (2008) mostró que la ventilación de los invernaderos, debido a la influencia de la temperatura produce altas tasas de intercambio de aire, sin embargo, los patrones de aire se producen cerca de las ventanas, con pobre intercambio de aire en la zona central del invernadero debido a un efecto de estancamiento que reduce el viento en todo el invernadero. De acuerdo con los resultados de Majdoubi et al. (2009), la convección y la radiación son las formas dominantes de la transferencia de calor. Las mediciones muestran que la diferencia entre la temperatura del aire dentro y fuera del invernadero está fuertemente ligada a la radiación solar y en

segundo lugar, a la velocidad del viento. Sin embargo, Chow y Hold (2010) obtuvieron las siguientes conclusiones estudiando las fuerzas de flotabilidad de los gradientes térmicos:

a. La radiación térmica sin la participación del aire cambia la distribución de temperatura del aire mediante la radiación de energía térmica en la zona superior de la pared hacia la zona inferior de la misma, que a su vez afecta la temperatura del aire a través de la conducción y convección;

b. La inclusión de la absorción del aire aumenta el efecto de redistribución térmica radiactiva, permitiendo que el aire absorba y disipe el calor, la reduciendo los gradientes de temperatura;

c. Las condiciones térmicas extremas y de calor afecta a los límites absolutos de temperatura, pero no su distribución.

IV. METODOLOGÍA

En este capítulo se describe la metodología empleada para la realización de este trabajo, el cual consistió de tres etapas.

La primera etapa consistió en el diseño de un invernadero propuesto a partir de la herramienta de modelación Flotran 2D; la segunda etapa se enfocó en la construcción de tres modelos a escala y la toma de variables climatológicas en ellos; la tercera etapa fue la simulación de los modelos físicos mediante el programa ANSYS 15.0 (FLUENT) y su validación a partir de la temperatura y viento de cada uno de los invernaderos hechos a escala.

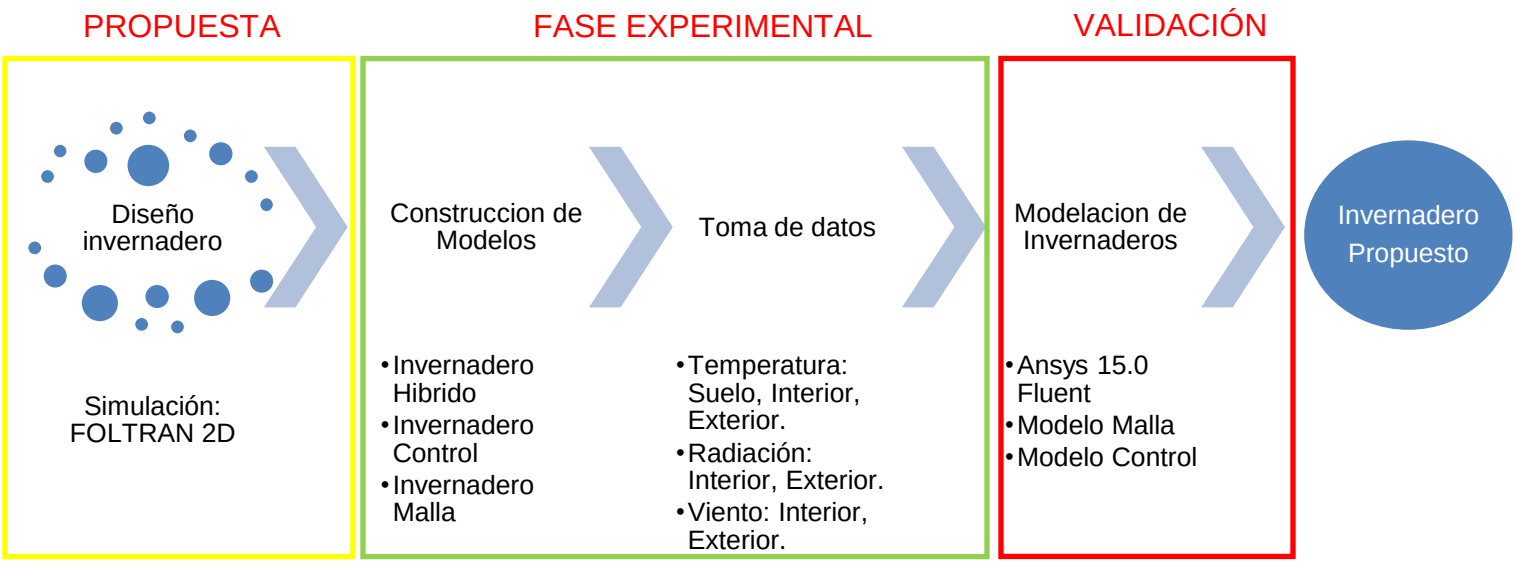


Figura 1 Estructura del proyecto

4.1 Propuesta de invernadero

Esta etapa fue el acercamiento del proyecto en el cual se analizaría el comportamiento de la variación de cubiertas en un invernadero. Se generó un modelo a dos aguas (Figura 2) con una combinación de cobertura de malla y plástico de polietileno en el programa ANSYS 14.0 (Modulo FLOTRAN).

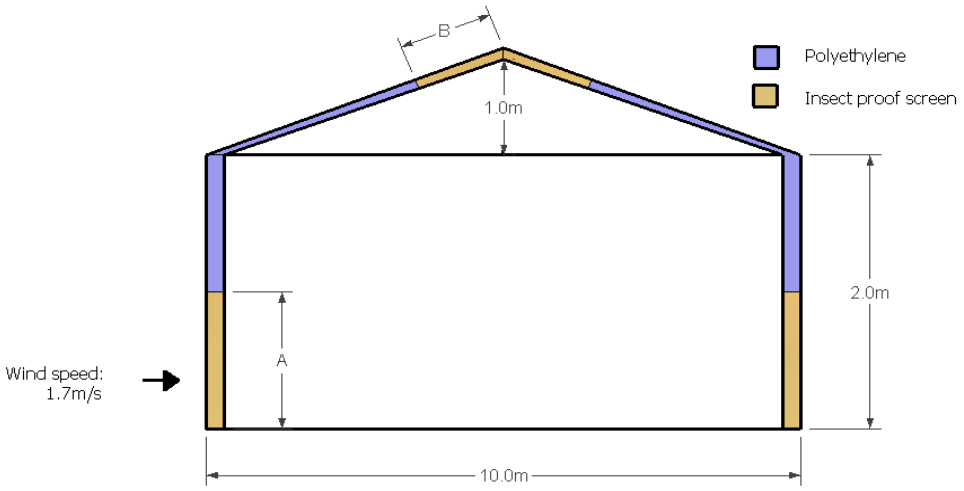


Figura 2Disposición de las cubiertas en los modelos.

A la geometría propuesta se le introdujeron variaciones en la longitud de abertura B de la cubierta del techo que combinados con la variación en las ventanas laterales, generó 8 modelos (Cuadro 2).

Cuadro 2 Modelos generados en FLONTRAN.

Modelo	% Abertura Cenital	% Abertura Lateral
1	5	100
2	25	100
3	45	100
4	65	100
5	5	50
6	25	50
7	45	50
8	65	50

4.1.1 Condiciones de frontera y consideraciones del modelo.

Los modelos fueron colocados en el centro de un rectángulo de 110 m de largo por 20 m de alto que simula la atmosfera, en la línea izquierda del dominio se colocó una velocidad de entrada de 1.7 m/s y en la línea derecha una presión de 0 Pa. Se utilizó el modelo k-ε, flujo considerado como estacionario y turbulento, considerando la gravedad de -9.81 sobre el eje Y. El elemento finito utilizado fue FLUID141.

Las consideraciones para los modelos CFD fueron las siguientes:

a) La simulación se consideró en estado estático.
b) La temperatura del suelo fue aplicada de 30°C.
c) El modelo de turbulencia empleado fue el k-ε.
d) Las características de la cubierta plástica fueron: Material Polietileno, Densidad 930 kg/m3, Calor especifico 1800 j/kg-°k, Conductividad térmica 0.5 w/m-k.
e) La malla fue considerada como un medio poroso de 0.8.
f) La velocidad del viento en el límite inferior y superior del dominio se consideró como 0 m/s.

4.2 Fase experimental

La fase experimental consistió en la construcción de tres estructuras a escala cubiertas con diferentes proporciones de plástico de polietileno y malla sombra del 70%. Las modelos a escala fueron colocados en el Campus Amazcala, perteneciente a la facultad de Ingeniería, este se encuentra en la comunidad que lleva el mismo nombre, el cual pertenece al municipio del Marqués cuyas coordenadas geográficas son: latitud norte 20º 42’ 20.08”, longitud oeste de 100º 15’33.87” y altitud de 2272msnm.Colinda al Oeste con el municipio de Querétaro, al Norte con el estado de Guanajuato, al Este con el municipio de Colón y al Sur con los municipios de Huimilpan y Pedro Escobedo. Se llega a esta población a través de la carretera 540 - libre a Chichimequillas y la carretera 200 – México libre (INEGI, 2014).

Figura 3Ubicación del campus Amazcala, de la F.I. de la UAQ.

El clima de acuerdo con los criterios de Koppen modificados por Enriqueta García (2003) , se clasifica en general como semiseco, semicálido, con lluvias en verano y con un porcentaje de lluvia invernal menor de 5, la precipitación media anual en el valle es del orden 520 mm datos de la estación climatológica de Nogales y el Zamorano, para el período de 1921 a 1996; la temperatura media anual es del orden de 17° C.

4.1 Construcción de modelos

Se generaron tres estructuras de PTR galvanizado (Columnas: 50x50 mm, techo 25x25mm) de 5.0 metros de largo por 3.6 metros de ancho, con una altura de 2 metros a la canaleta, el techo fueron dos arcos con una altura total a la cumbrera de 2.68 metros. El material usado para cubrir la estructura fue malla sombra al 70% Monofilamento de color negro y Polietileno (930 kg/m^3). El suelo del invernadero se cubrió con groundcover de color negro.

Figura 4 Estructura de PTR sin cubierta

4.1.1 Invernadero Hibrido

A partir de los resultados obtenidos en la primera fase y de la consulta de bibliografía, se generó la propuesta de un invernadero hibrido el cual se adecue a las condiciones climáticas de la región. Se generó una estructura que durante el día actúe como una malla sombra para reducir la carga de radiación y maximice el flujo del aire, con el objetivo de mantener una temperatura igual o inferior a la temperatura externa. Sin embargo, que en caso de un evento extraordinario como precipitaciones o heladas permita cubrir la estructura con plástico, evitando daños al cultivo.

Este invernadero consistió en una estructura cubierta de malla sombra, con ventanas de polietileno en sus 4 paredes. El techo se cubrió con malla sombra y se puso un techo de polietileno removible (Figura 5).

Figura 5 Invernadero hibrido.

A) Ventanas laterales cerradas y techo abierto. B) Ventanas laterales abiertas y techo cerrado.

4.1.2 Invernadero Control

Con la finalidad de recrear los problemas de temperaturas superiores a los 30°C en los invernaderos con ventilación natural (sin sistemas de ventilación activos) que se tienen en el país, y para comparar con las propuestas de los estructuras se realizó un invernadero control, el cual tuviera las características de los invernaderos convencionales. Este invernadero fue cubierto con polietileno, las paredes laterales consistieron en una malla sombra de 70% monofilamento color negro, con ventanas de polietileno.

El techo, la pared frontal y trasera fueron cubiertos por polietileno, y las ventanas cenitales con malla sombra.

Figura 6 Invernadero control con ventanas con cenitales abiertas

4.1.3 Malla Sombra

La reducción en la carga de radiación de las mallas sombras (Figura 7) permite reducir las temperaturas en su interior por lo que se propuso como una de las opciones con las cuales comparar el invernadero hibrido. Se cubrió una estructura con malla sombra de 70% monofilamento color negro. Esta estructura careció de ventilas cenitales, el suelo se cubrió con groundcover.

Figura 7 Estructura cubierta con malla sombra al 70%

4.2. Toma de datos

Las estructuras colocadas en una zona libre de obstáculos, orientadas norte sur una detrás de la otra para evitar la interferencia del flujo de viento entre ellas (Figura 8). Dentro de las estructuras no se tuvo cultivo durante el monitoreo de las variables climáticas. La toma de datos se realizó durante los meses de septiembre y octubre, mediante sensores de temperatura, radiación y viento que fueron sometidos a pruebas de funcionamiento durante una semana, para asegurar su correcto funcionamiento en la toma de datos.

Figura 8 Distribución de invernaderos en el campus Amazcala.

Las variables externas fueron tomadas entre la pared trasera del invernadero hibrido y la pared frontal del invernadero control(Figura 9-A)., a una altura de 0.5 metros sobre el suelo. La temperatura del aire externa se registró con tres sensores de temperatura Spectrum cubiertos con protectores de radiación solar Spectrum, conectados a un dataloggerWatchdogserie 1650 con un intervalo de toma de datos de 5 minutos en grados centígrados. La radiación fue monitoreada mediante un piranómetro Spectrum registrando la variable cada 5 minutos en watts/m^2 con el dataloggerWatchdogserie 1650 (Figura 10).

Figura 9 Sensor de radiación y temperatura con protector de radiación.

4.2.2 Variables Internas

Se tomaron datos de temperatura, radiación y velocidad de viento al interior de cada estructura (Figura10).

Figura10 Sensores de radiación, temperatura y viento en invernadero control.

Temperatura

La temperatura del aire se registró por triplicado con tres sensores externos de temperatura Spectrum, se colocaron en el centro de cada estructura a una altura de dos metros sobre el suelo y fueron cubiertos con protectores de radiación solar Spectrum (Figura10). Los sensores fueron conectados a un dataloggerwatchdog serie 1650 con un intervalo de toma de datos de cinco minutos. La temperatura del suelo fue tomada mediante el sensor HI-234, a un costado del sensor de radiación.

Radiación

Mediante un piranómetro Spectrum ubicado a la mitad de la pared frontal y a dos metros del centro de cada estructura a una altura de 0.5 metros del suelo se registró la radiación conectado a un dataloggerWatchDog 1650, registrando la variable cada 5 minutos en watts/m^2.

Viento

Un anemómetro ultrasónico Modelo 81000 YOUNG fue utilizado para monitorear la variable viento al interior de cada estructura. Los sensores fueron conectados a una computadora mediante el puerto RS-232 (Figura 11) alimentado por una fuente de poder a 15 Volts. La comunicación con el sensor y registro de datos se hizo mediante un software de elaboración propia en el lenguaje C#. Cada cinco minutos se abrió la comunicación con el sensor durante 1 segundo, tomando cuatro lecturas, las que posteriormente se promediaban para dar la lectura de velocidad y dirección del viento.

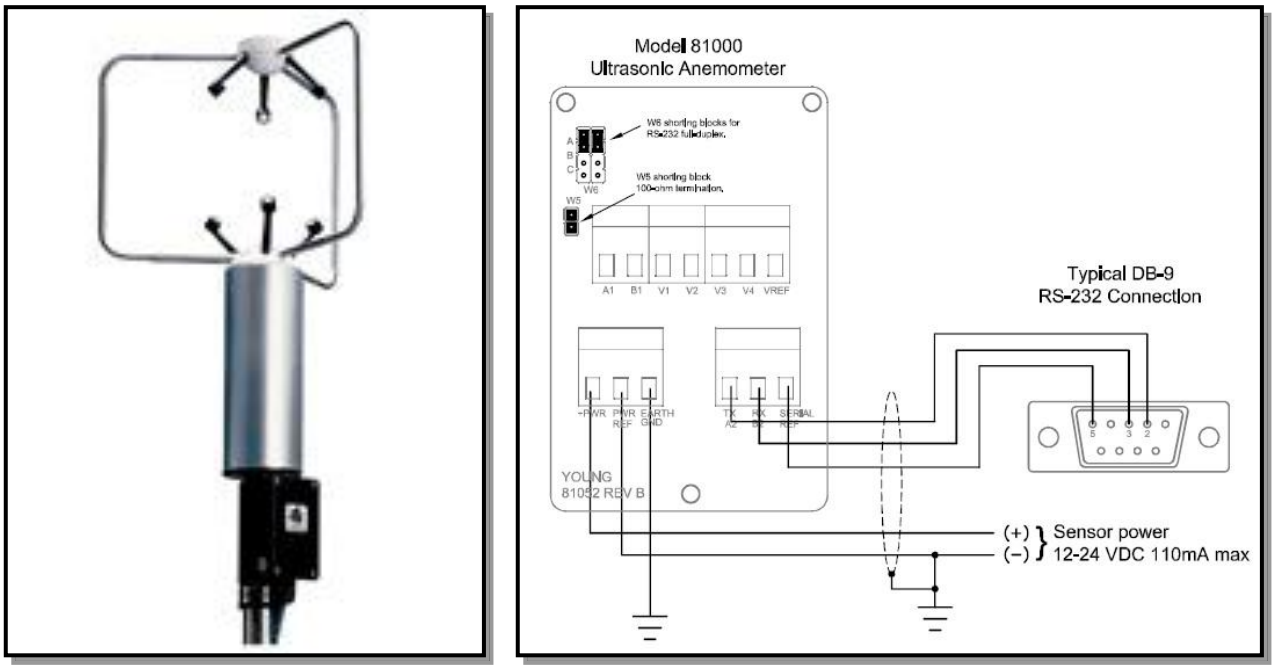


Figura 11 Conexión anemómetro ultrasónico a RS-232

4.3 Simulación de Modelos

La etapa de simulación y validación de los modelos a escala se realizó en el programa ANSYS 15.0 (Modulo FLUENT) en la plataforma workbench 15.0. Se simulo el invernadero control y el invernadero hibrido en su condición abierta con las dimensiones de las estructuras a escala (Figura 12).

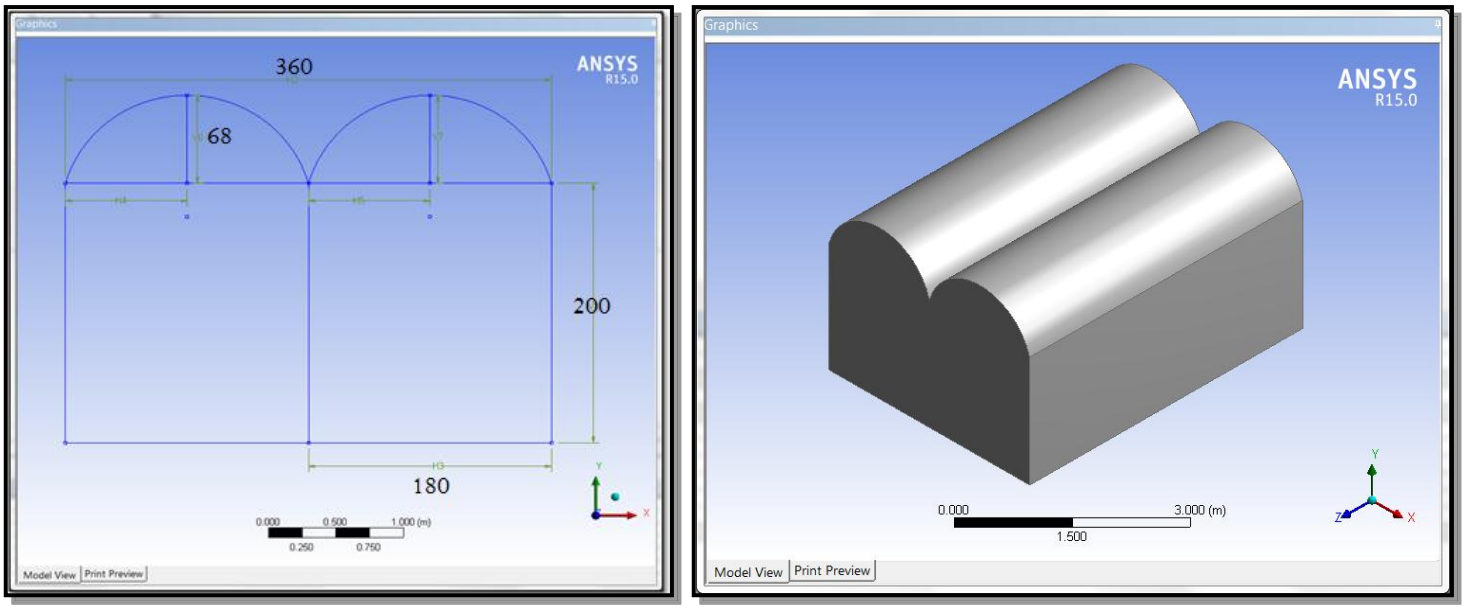


Figura 12 Geometría del modelo

Los modelos fueron colocados dentro de un prisma rectangular (dominio) que simula las condiciones de la atmosfera alrededor del invernadero. El tamaño del dominio se definió mediante iteraciones (30m ancho, largo 40m, altura 20m), hasta que se alcanzó un flujo estable (Figura 13).

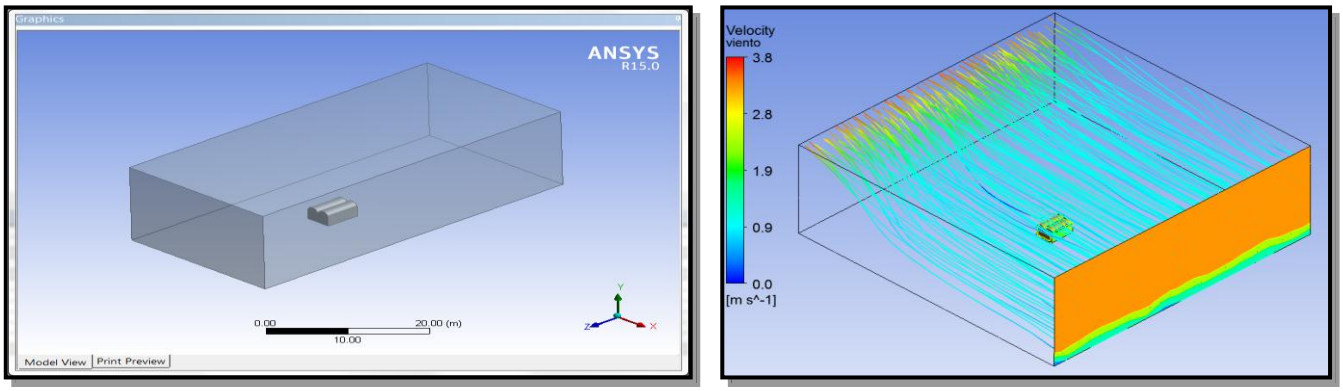


Figura 13 Estabilización del flujo de viento en el dominio.

Una vez definido el tamaño del dominio con los modelos en su interior se procedió a generar el mallado de cada volumen generado.

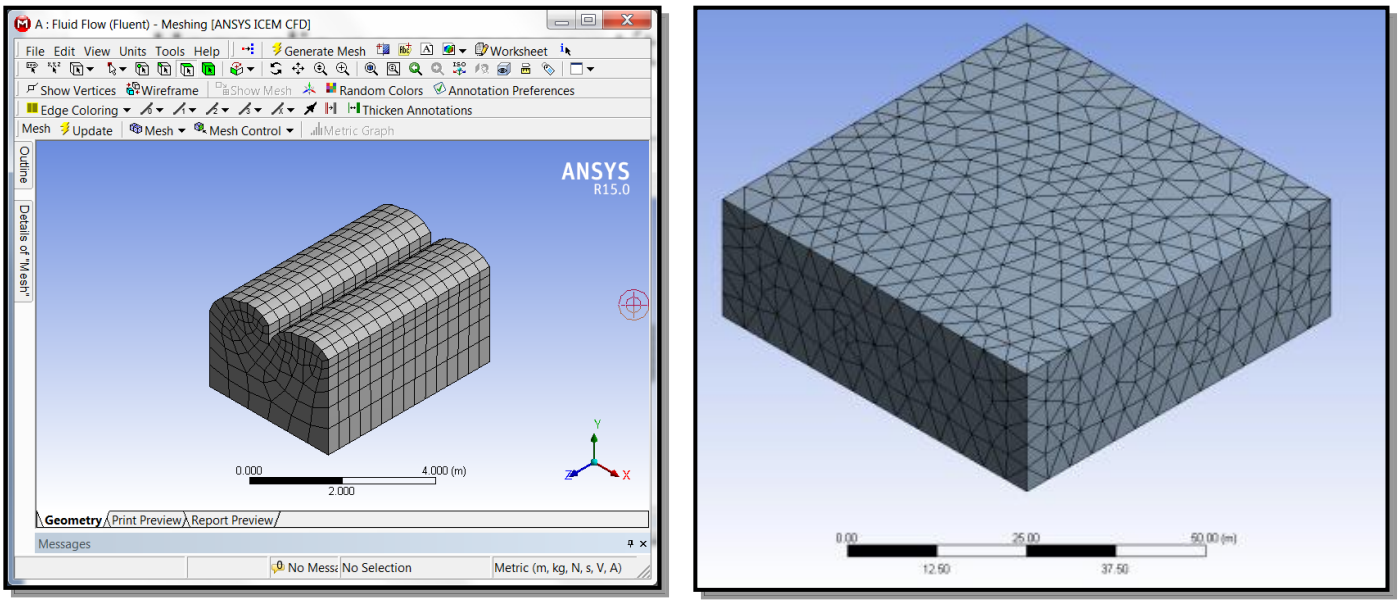


Figura 14 Mallado hexaédrico en el Invernadero Control

A partir de los modelos generados con su respectivo mallado se procedió a introducir las características de las cubiertas de acuerdo al invernadero que se fuera a modelar.

A partir de los modelos generados con su respectivo mallado se procedió a introducir las características de las cubiertas (Cuadro 3) de acuerdo al invernadero que se fuera a modelar.

Cuadro 3 Características físicas de los elementos simulados.

Material	Característica	Valor
Malla	Permeabilidad	2e-10 m^2
	Espesor	0.00032 m
	Coeficiente de presión	11400 (1/m)
Plástico	Densidad	900 kg/m^3
	Calor Especifico	1900 j/kg-k
	Conductividad Térmica	0.3 w/m-k
Suelo	Densidad	1400 kg/m^3
	Calor Especifico	1735 j/kg-k
	Conductividad Térmica	1.5 w/m-k
Aire	Densidad	1.225 kg/m^3
	Calor Especifico	1006.43 j/kg-k
	Conductividad Térmica	0.0242 w/m-k
	Viscosidad	1.7894e-5 kg/m-s
	C de Expansión Térmica	0.00333

Las condiciones de frontera ingresadas al sistema fueron generadas con los datos recabados durante la fase experimental, se generaron dos puntos de evaluación para cada modelo (Cuadro 4), uno por debajo de 1m/s y otro por encima de 1 m/s de velocidad de viento.

Cuadro 4. Condiciones de frontera

Variable*		Control		Hibrido	
		1	2	1	2
Viento	Exterior	0.53	2.31	0.54	1.40
Temperatura	Externa	33.80	26.10	24.50	34.10

Se incluye en el Anexo 2 la metodología para desarrollar un modelo en el programa ANSYS Fluent.

V. RESULTADOS

5.1 Propuesta de Invernadero

Esta fase fue determinante para comprender el comportamiento del aire en una estructura. La tasa de ventilación es altamente dependiente de la velocidad del viento y el tipo de cubierta que se utiliza, así como la configuración de apertura y cierre de ventilas. Las ventilas del modelo a dos aguas (Figura 15) tuvieron diferente comportamiento de acuerdo a su posición con respecto a el viento, se observó que un patrón entre las ventanas a barlovento y otro en las ventanas a sotavento, este comportamiento fue modificado mediante el porcentaje de abertura de las ventanas.

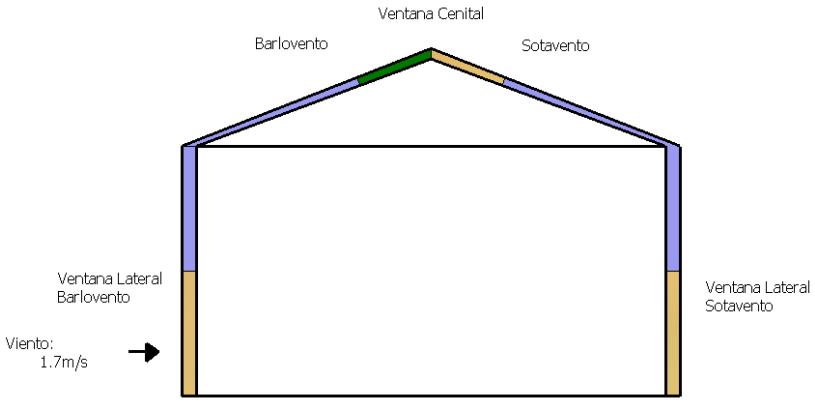


Figura 15 Invernadero a dos aguas.

La estructura produjo una reducción entre 18.95% y 7.07% de velocidad de viento en la ventana a sotavento con respecto a la condición inicial de 1.7 m/s.

La velocidad de viento en la ventana a sotavento presenta una respuesta (Cuadro 5) al aumento del porcentaje de malla anti-áfidos en el techo, el valor óptimo de 0.32 m/s se alcanzó con los modelos de 25% del techo anti-áfidos.

Cuadro 5 Flujo de viento en las salidas

Modelo (%Abertura Cenital, %Ventana Lateral)	**Ventana Lateral* Sotavento**	**Ventana cenital* Sotavento**	**Ventana cenital* Barlovento**
5%-100%	0.1413	0.0851	0.0290
25%-100%	0.3222	0.0559	0.1081
45%-100%	0.1526	0.0510	0.0285
65%-100%	0.1489	0.0471	0.0332
5%-50%	0.1767	0.0441	0.0192
25%-50%	0.3222	0.2059	0.2204
45%-50%	0.1295	0.0332	0.0208
65%-50%	0.1203	0.0308	0.0257

*Velocidad de viento en metros/segundo.

Las ventilas cenitales permiten un mejor flujo en el interior del invernadero, ya que actúan como una salida para el aire atrapado en la parte superior del invernadero. La ventana cenital de barlovento presento un porcentaje de operación inferior a la cenital de sotavento (Cuadro 6). El aire que intenta salir del invernadero se encuentra con el flujo de viento que va en sentido contrario (Figura 16), por lo que las dos masas de aire chocan actuando como una barrera lo que reduce el porcentaje de funcionamiento de la ventila.

Cuadro 6 Operación de la ventana cenital a barlovento

Modelo (%Abertura Cenital, %Ventana Lateral)	Longitud Ventila (m)	Operación (%)
5%-100%	0.25	100.0
25%-100%	1.28	85.0
45%-100%	2.29	70.0
65%-100%	3.31	85.0
5%-50%	0.25	35.0
25%-50%	1.28	100.0
45%-50%	2.29	60.0
65%-50%	3.31	80.0

Al contrario de esto, la ventila cenital a sotavento tiene funciona al 100%, esto debido a que la masa de aire dentro del invernadero lleva el mismo sentido que la masa de aire que pasa sobre el invernadero, se puede apreciar que esta condición genera un efecto de succión incrementando la tasa de desalojo.

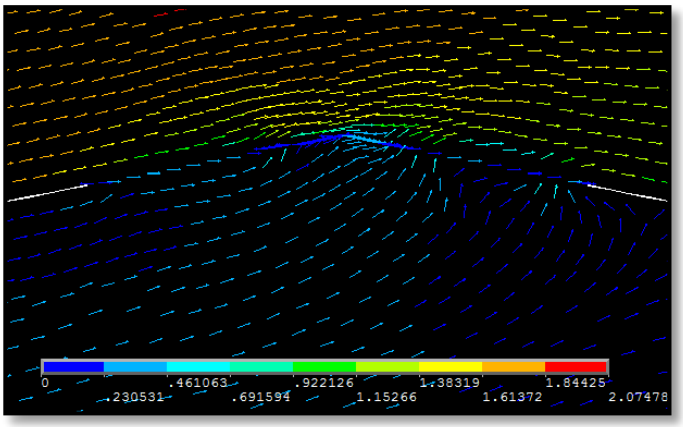


Figura 16 Flujo de aire en la ventana cenital.

En lo que respecta a las ventanas laterales generan un efecto interesante en la distribución de velocidades al interior del invernadero. Una abertura de 25% de la ventila cenital, genera una velocidad promedio de 0.32 m/s en la condición de máxima apertura o de 50% de apertura. Sin embargo la velocidad en la ventana lateral con una abertura de 50% permanece constante a lo largo de ella (Figura 17), mientras que cuando se abrió la ventana lateral a 100% se observa en la Figura 18 que el flujo de aire se concentra en la parte superior de la ventana por lo que masa de aire se queden estancadas en el invernadero.

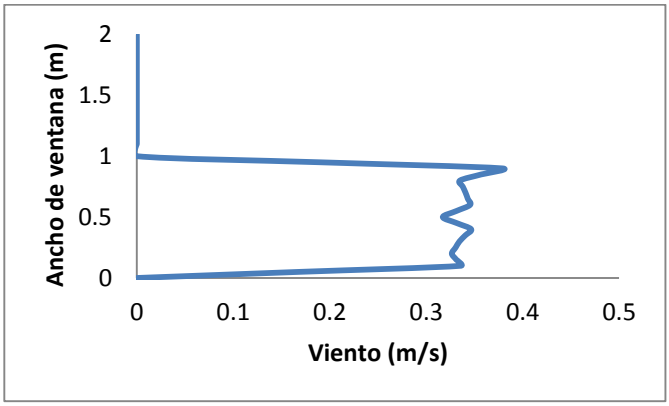


Figura 17 Perfil de velocidades, modelo 25%-50%

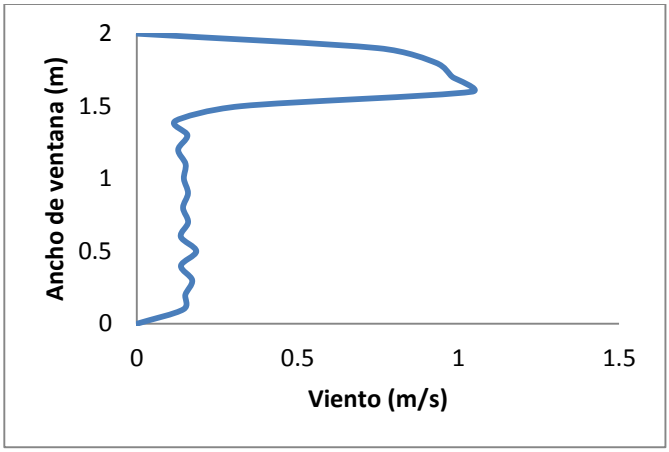


Figura 18 Perfil de velocidades, modelo 25%-100%

En la siguiente figura se muestra el diagrama de distribución de velocidades para la abertura del 50% de ventanas laterales. Se puede apreciar que existen zonas de estancamiento de la masa de aire, la primera mitad del invernadero tiene una renovación de aire generada por la ventila cenital, sin embargo el flujo de aire en la segunda mitad del invernadero es nulo, provocando estancamientos.

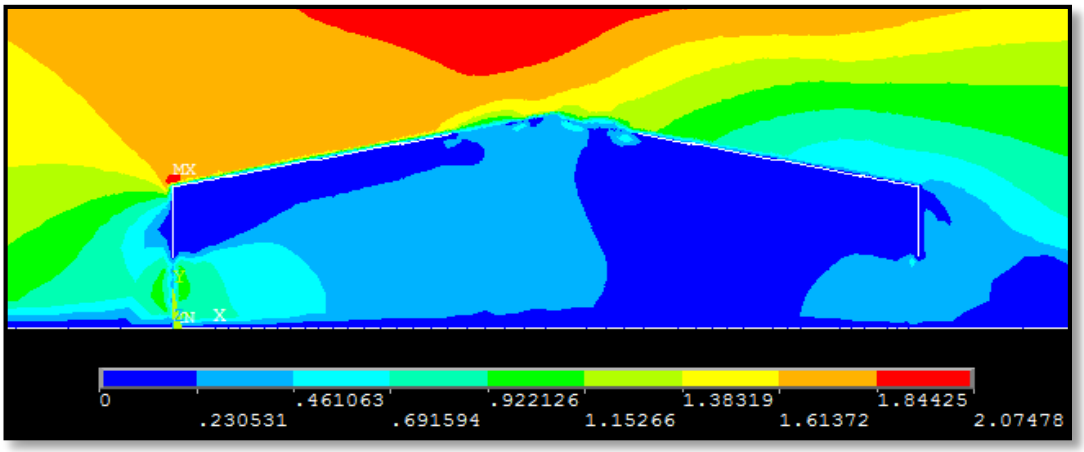


Figura 19Distribución de velocidades (m/s) modelo 25%-50%

5.2 Fase experimental

5.2.1 Radiación

Los requerimientos de radiación de los cultivos dependerán de su centro de origen y condiciones en las que naturalmente se desarrollan, por lo que las plantas de porte bajo las cuales en la naturaleza se encuentran protegidas de la radiación por el dosel forestal tendrán requerimientos de radiación inferiores a la radiación total de su ecosistema.

El requerimiento de radiación en los cultivos se maneja en las unidades PAR la cual es la radiación entre los 400 a 700 nanómetros de longitud de onda, rango de longitud de onda aprovechada por la planta para realizar fotosíntesis. Castillas (2005) hace referencia a que los cultivos C3 tienen un requerimiento de radiación de 400 micromoles/m^2/s mientras que los cultivos C4 elevan su requerimiento por encima de los 690 micromoles/m^2/s.

La radiación total registrada durante el periodo de toma de datos nos revela que este valor alcanza un pico diario por encima de 1000 watt/m^2, el cual se da entre las 11:30 am y 1:30 pm, para el rango de datos tomados. El requerimiento de las hortalizas producidas en invernadero alcanza la saturación de radiación solar fotosintética de 50 a 150 watts/m^2 (Luis Bérriz, Manuel Alvarez y Lisandro Vázquez), considerando este rango de radiación, los valores registrados durante el experimento están por encima de los requerimientos de las plantas.

Para comparar los datos de literatura con los valores registrados en el experimento se procedió a hacer la conversión de unidades. El cálculo realizado para la transformación se basa en que $Radiacion\ global = 0.219PAR$, también se toma como referencia que 1800 micromoles m^2/s son 427 watts/m^2. Los requerimientos de radiación de los cultivos se transformaron a radiación global para proceder a su comparación.

$$Requerimiento\ C3 = 0.219(400) = 87.6\frac{watt}{m2}/s$$

$$Requerimiento\ C4 = 0.219(690) = 152\frac{watt}{m2}/s$$

En la Figura 20observamos que la radiación excedió los requerimientos de los cultivos, por lo que se considera que la disminución de la radiación en cierto porcentaje no limitará la fotosíntesis.

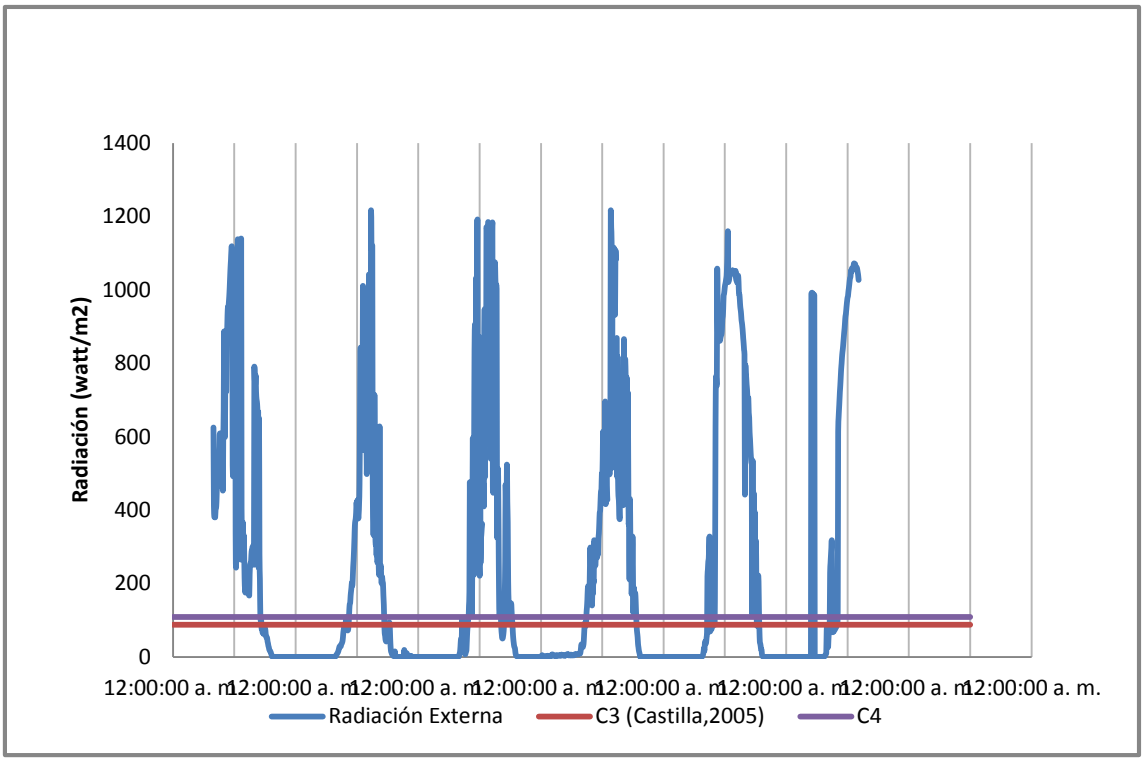


Figura 20 Radiación total para un ciclo de 6 días.

5.2.2 Temperatura

El analisis de temperaturas (Figura 21)para la normal climatologica de la region nos arroja la grafica siguiente en la que se observa que los promedios de temperatura maxima estan por arriba de los 25°C, pero la temperatura minima llega a estar muy cercana a los 4 °C.

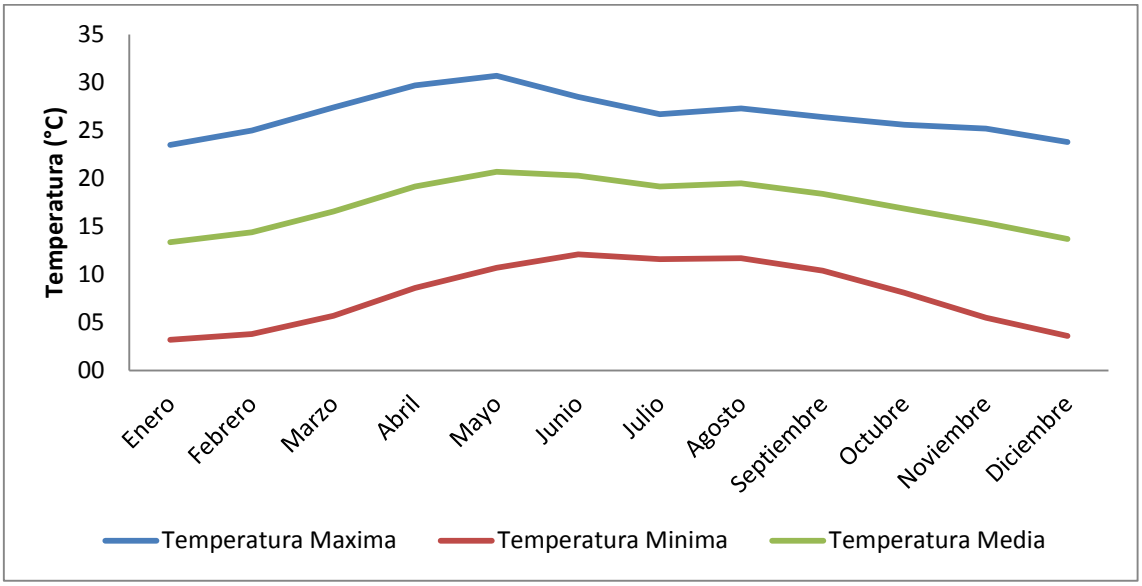


Figura 21 Temperaturas promedios Est. Coyotillos para 1950-2010.

Sin embargo observamos que para el ciclo de datos tomados que el comportamiento diario nos arroja temperaturas superiores a los 30°C. Casillas (2005) nos proporciona un rango óptimo de temperatura para el cultivo de tomate entre los 17°C y los 26°C, por lo que la región está proporcionando una temperatura máxima diaria superior a al rango óptimo para el cultivo, dando indicio que se requiere reducir las temperaturas durante el día.

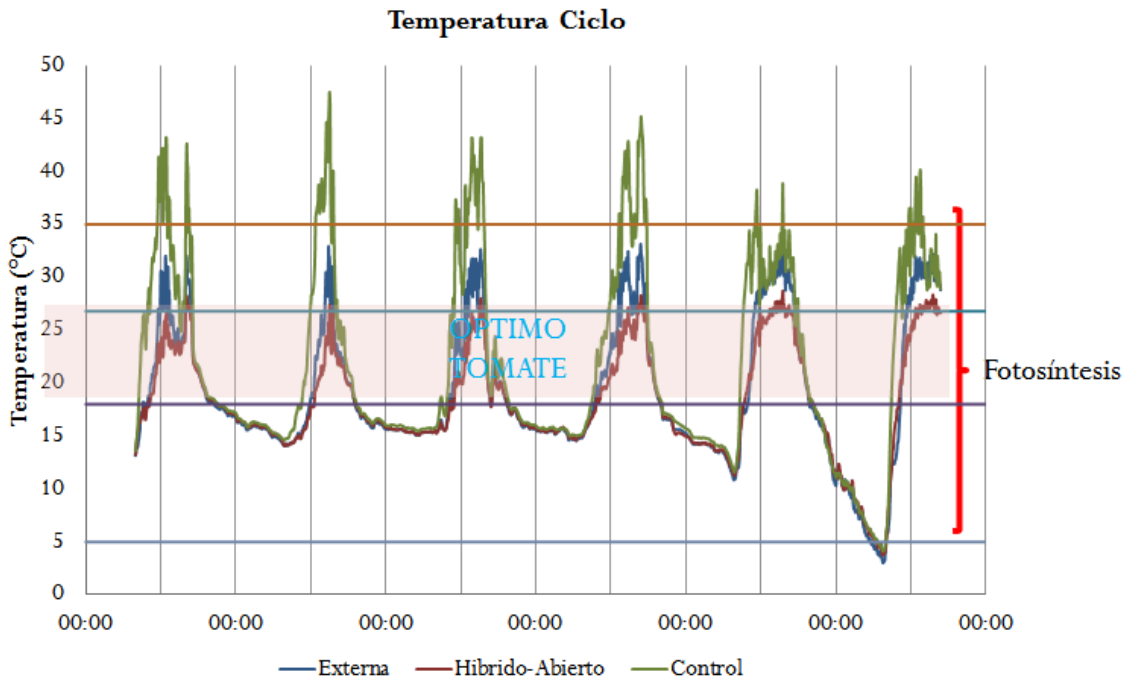


Figura 22 Temperatura registradas para un ciclo de seis días.

Al analizar las temperaturas para un día (figura 23), la temperatura se encontró por arriba de los 30°C por un periodo de 5 horas, y en el mismo día se llegó a temperaturas debajo de 0°C. Lo cual supone la necesidad de una estructura que tenga la capacidad de mitigar los efectos de elevadas temperaturas pero que permita durante las noches almacenar calor.

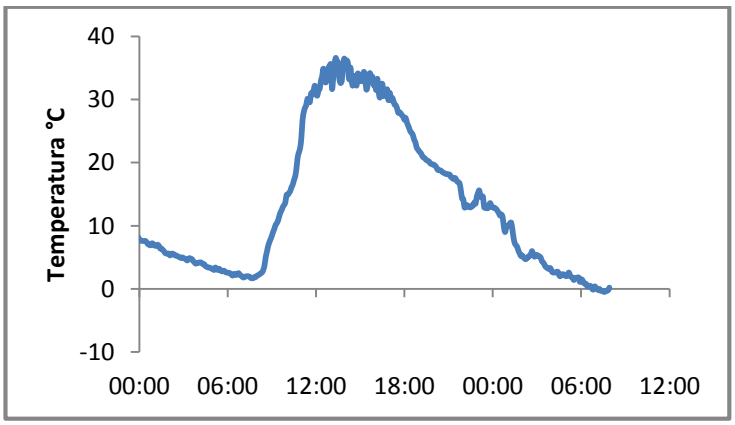


Figura 23 Temperatura externa el día 27 de octubre de 2014.

A partir de estas observaciones se hace la comparación de la temperatura interna de cada estructura. En un día con temperaturas externas de 30°C, se determinó que el invernadero control estuvo con temperaturas superiores, mientras que el invernadero hibrido en su condición abierta, presento una temperatura inferior que la externa, esto debido a la reducción de la carga de radiación.

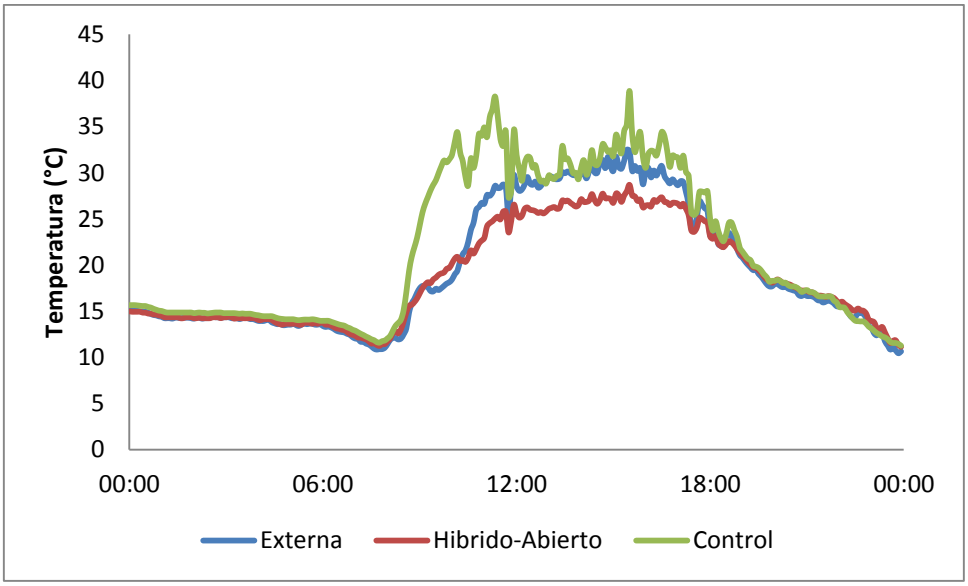


Figura 24 Comparación de temperaturas en los modelos

La temperatura externa y la temperatura del invernadero control son superiores a los valores de 26°C propuesto por casillas como rango máximo óptimo, sin embargo el estrés de temperatura se alcanza dentro del invernadero control al llegar al valor superior a 30°C de 12:00 hasta las 4:00 pm , en el cual la planta entra en un estrés por temperatura limitando la abertura de estomas, por lo que al no haber intercambio gaseoso se ve afectada la fotosíntesis y por ende la reducción de la productividad del cultivo.

El someter a un cultivo a temperaturas superiores a los 30°C se verá reflejado en la productividad del cultivo, ejemplos de daños ocasionados por altas temperaturas son el incremento del consumo de agua, el aborto de flores y frutos, agrietamiento de frutos en el caso del tomate.

La propuesta del invernadero hibrido-abierto para un día en que la temperatura exterior alcanzo los 30°C nos genera una temperatura al interior de la estructura cercano al valor de 26°C. Por lo que se deduce que las temperaturas al interior de la propuesta proporcionan condiciones óptimas para el desarrollo del cultivo.

Queda claro de los datos obtenidos que la limitación de la radiación como un método del control de temperatura es una opción viable para obtener condiciones adecuadas para los cultivos en la región. Habrá que observar el comportamiento de la radiación para el día analizado con temperaturas superiores a los 30°C que limitar la radiación global no la disminuye por debajo de la línea verde que es el requerimiento de radiación para las plantas C3 (Figura 25).

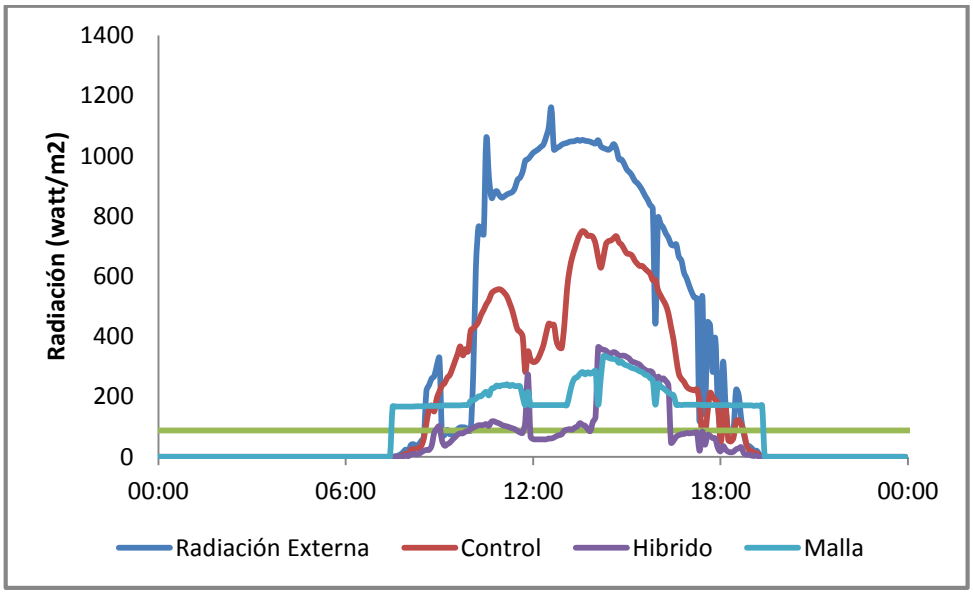


Figura 25 Comparativo de radiación total en los modelos.

De aquí se deduce que se podrá disminuir la carga de radiación en los picos máximos de temperatura para disminuirla, sin afectar el requerimiento del cultivo. Considerando que si se tiene una temperatura externa adecuada para el cultivo, no se tendrá la necesidad de bloquear la radiación excedente.

Una propuesta alternativa al trabajo será una malla anti-áfidos que permita la exclusión de insectos y limite la radiación en menor cantidad, sin embargo en los momentos en los que se eleve la temperatura desplegar una pantalla o malla sombra que limite la radiación para controlar la temperatura, cuidando que la radiación en unidades PAR no se reduzca por debajo de los 400 micromoles/m^2/s.

En lo que conlleva a que tanto se reducirá la temperatura con las estructuras propuestas que la estructura control genera un gradiente positivo con respecto a la temperatura exterior, siendo que el invernadero hibrido abierto genera un gradiente negativo. Ambas estructuras por la noche, registran valores similares a la temperatura exterior.

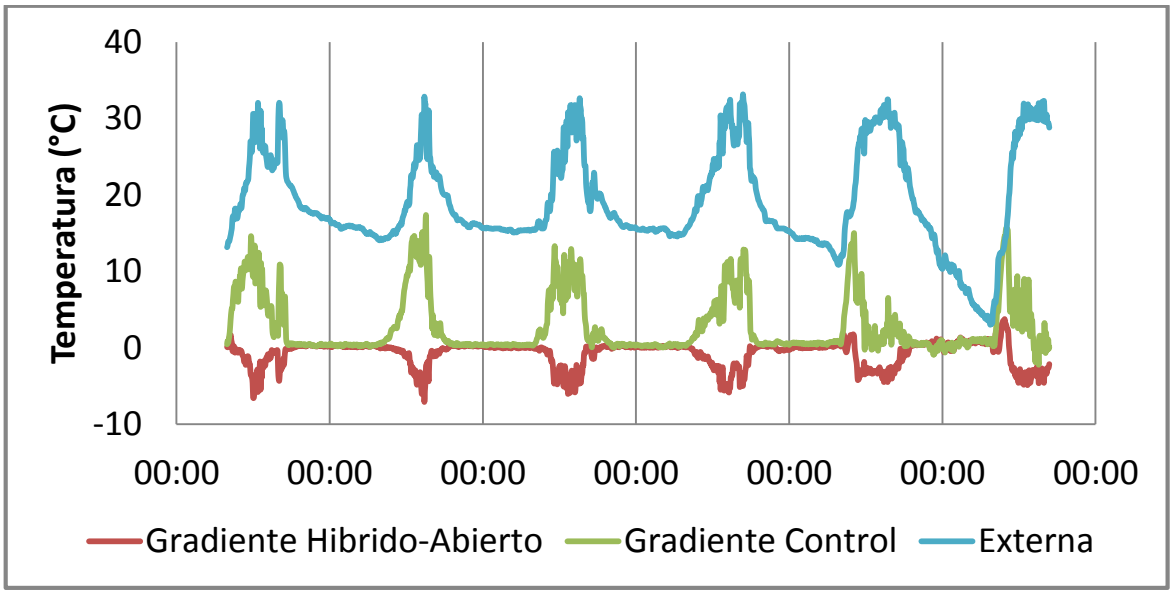


Figura26 Gradientes térmicos para un ciclo de 6 dias.

El análisis estadístico(Cuadro 7) nos refleja que no se encontró diferencia significativa de varianzas mediante prueba F, α=0.05 (1.168), entre el invernadero control y el invernadero hibrido por lo que se procedió a hacer una prueba entre las medias mediante una prueba T, α=0.05 (19.35)suponiendo varianzas iguales.

Cuadro 7 Análisis estadístico del gradiente de temperatura.

Variable	Control	Hibrido
Media	1.35	-4.65
Varianza	1.09	0.93
Observaciones	21	21

De lo cual se concluye que si hay diferencia entre los gradientes de ambas estructuras, quedando como valor medio un gradiente de +1.35 °C en el control y -4.65°C para el invernadero hibrido.

5.3 Simulación de modelos

Los resultados de la modelación fueron satisfactorios dado que nos permitieron observar la interacción de los invernaderos con los flujos de aire y temperaturas propuestas. El tamaño de dominio de 30x40 metros, a una altura de 20 metros, permitió que el flujo de aire propuesto se estabilizara y llegara al modelo con las velocidades de viento propuestas. En la figura siguiente observamos que la temperatura de entrada corresponde al valor propuesto, apreciando que cercano a la superficie del suelo la temperatura toma el valor medido en lo que respecta al viento, las velocidades llegan estables al modelo sin generar vórtices o alguna inestabilidad en el flujo.

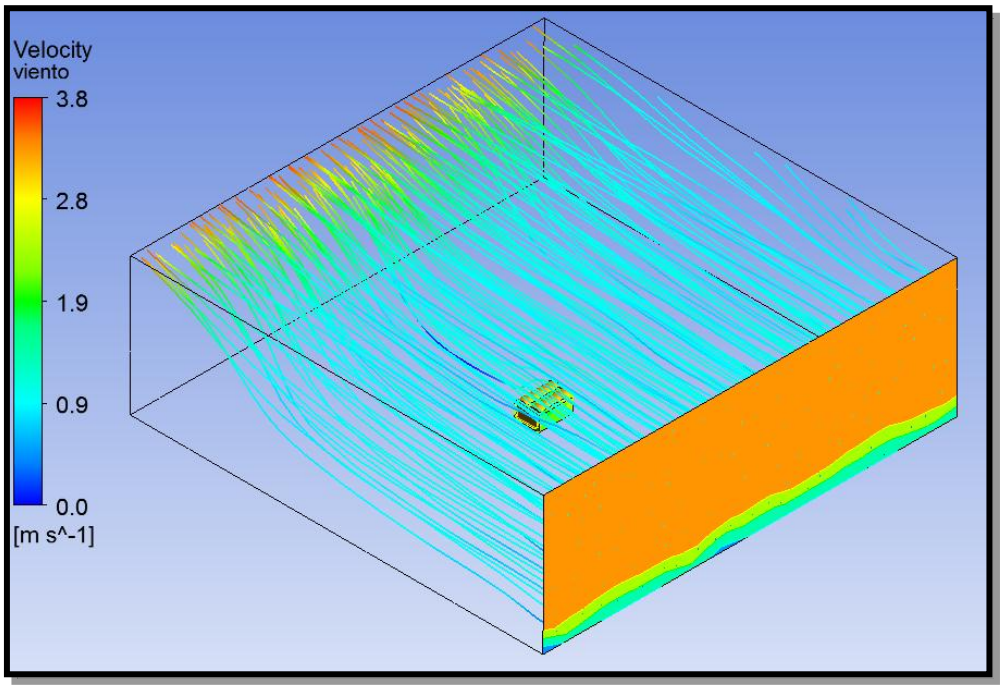


Figura 27 Flujo de viento estable en el modelo control.

La validación de los modelos, se realizó por medio de la comparación de los resultados experimentales con los resultados computacionales, se obtuvo el porcentaje de error respecto a las variables por medio de la siguiente formula:

$$Error(\%) = \frac{|T_{observada} - T_{simulada}|}{T_{observada}}$$

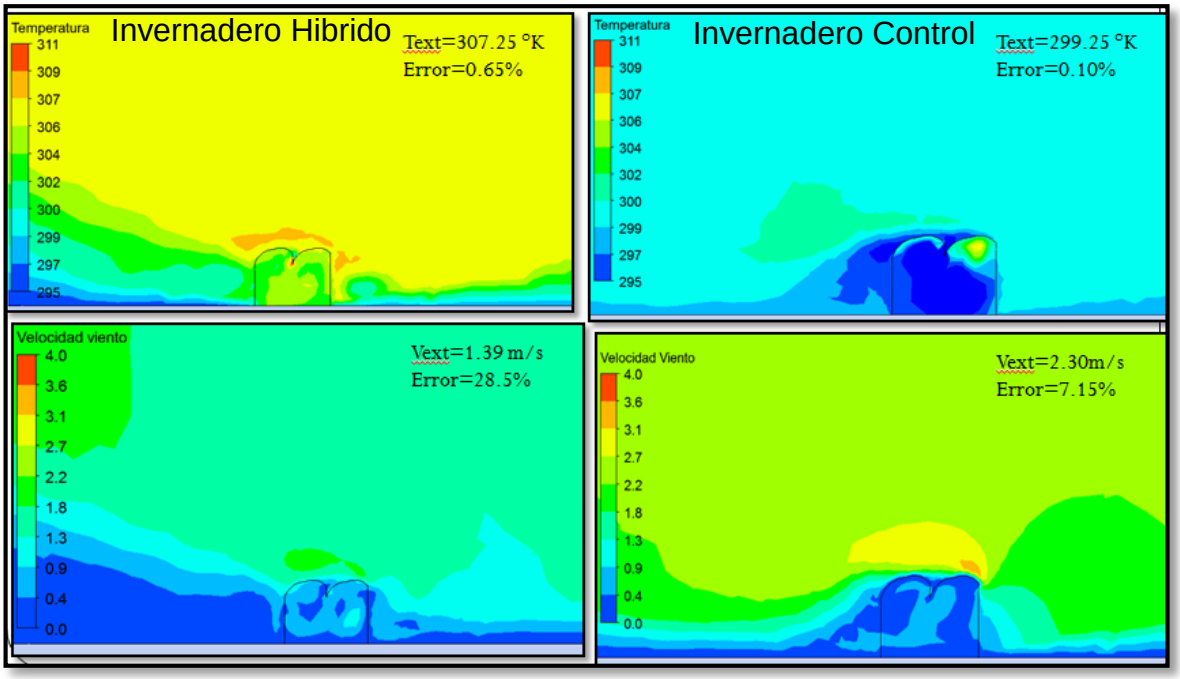


Figura 28 Porcentaje de error de los modelos

El grado de error registrado en los modelos fue inferior al 10% (Figura 28), por lo que se considera aceptable la modelación.

La ventaja de la herramienta CFD, es que nos permite hacer un análisis más detallado de las temperaturas al interior de las estructuras estudiadas, y no limitarnos a la toma de un dato de temperatura puntual. El invernadero hibrido en su condición abierta género un patrón de temperatura homogéneo en su interior, similar a la temperatura externa, no se observan acumulaciones de calor en la parte del techo. En lo que respecta al invernadero control, en el techo se puede apreciar que el aire caliente queda atrapado por la cubierta plástica evitando su desalojo (Figura 29).

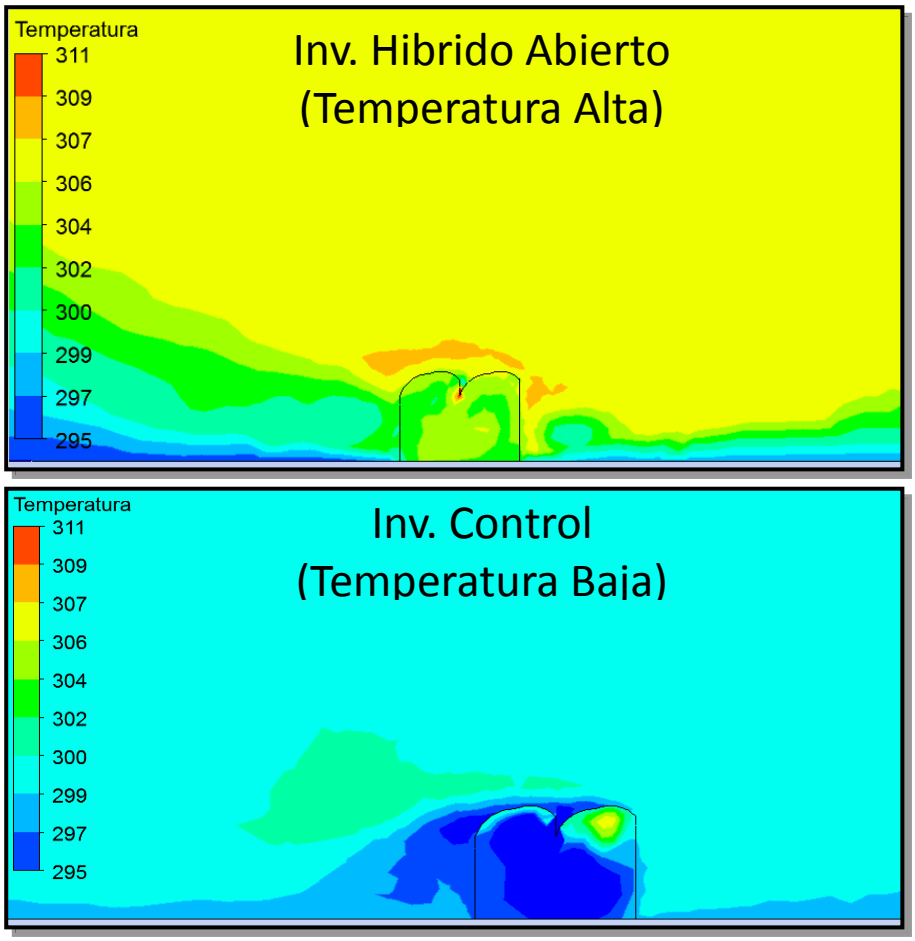


Figura 29 Temperatura en el Invernadero control e Hibrido abierto.

El patrón de velocidades en las estructuras es diferente, mientras que las velocidades en la parte superior del invernadero hibrido se mantienen del orden de los 0.6 m/s, la estructura control nos indica que el aire está estancado en velocidades de 0 m/s (Figura 30).

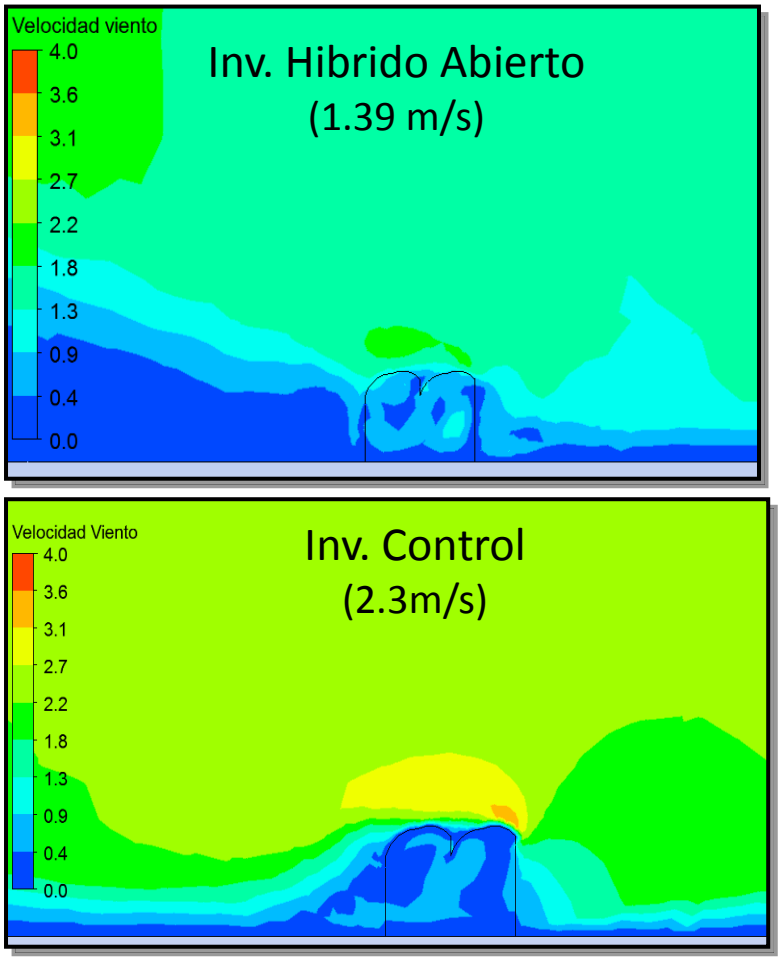


Figura 30 Velocidad de viento en el Invernadero control e Hibrido abierto.

El sentido del flujo tiene gran influencia en el patrón de desalojo de aire en el invernadero control, por lo que cambiar el sentido en el modelo nos confirma lo concluido en la primera fase. Si el sentido de la ventilación cenital es contrario al flujo de viento en la parte superior, la ventana cenital no tendrá efecto alguno sobre el desalojo, sin embargo si estos van en el mismo sentido, se aumentaría su eficiencia de ventilación cenital (Figura 31).

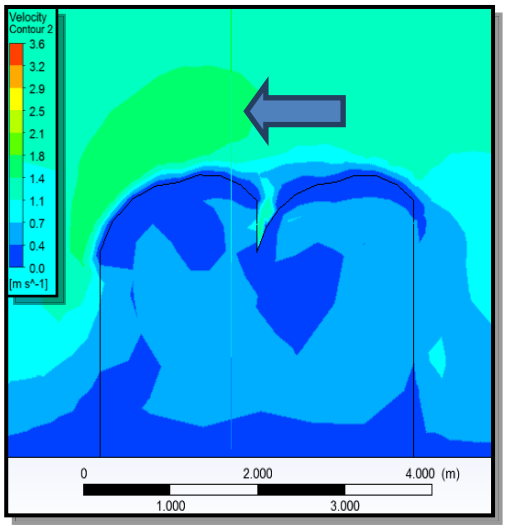


Figura 31 Flujo de viento de Derecha-Izquierda en el invernadero control.

El tamaño de la estructura tiene influencia en el comportamiento del aire a desalojar de ella, por lo que se generó un simulación para una estructura de 18mx24m con 7 metros de alto (Anexo 2), fue sometida a una temperatura de 26 °C con 1000 watts/m^2 con una velocidad de viento de 1 m/s.

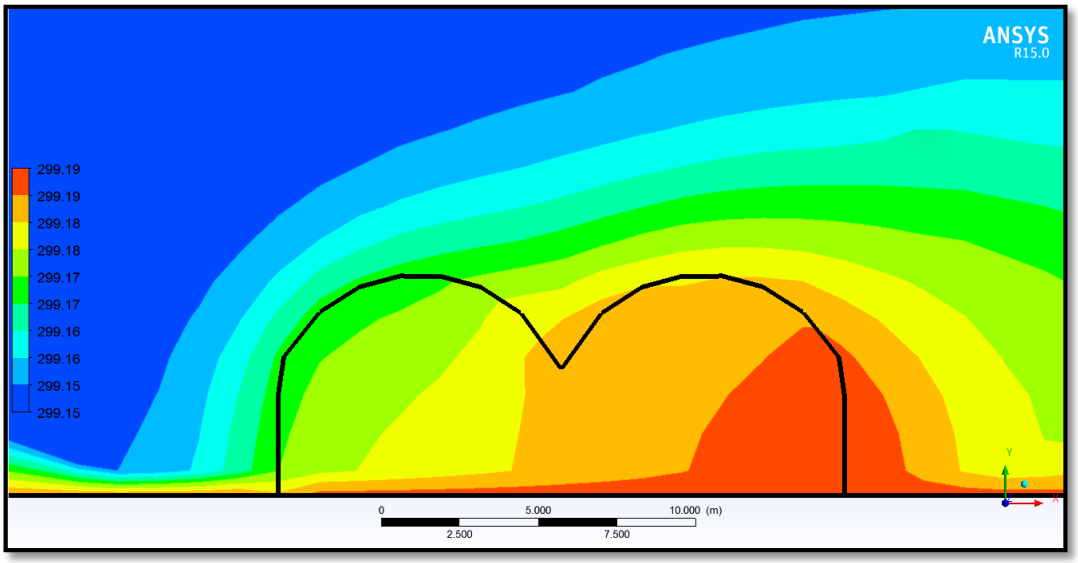


Figura 32 Temperatura estructura de malla sombra.

Claramente se observa en la Figura 32, que hay diferencias de temperatura en el interior del invernadero de malla sombra sin embargo, diferencias menores a un 1 °K, por lo que se puede tomar como igual la temperatura exterior a la interior de la malla sombra.

En lo que respecta a la flujo de aire (Figura 33), se observa que el aire esta en movimiento en la primera nave. El impulso del aire no es suficiente para poner en movimiento la masa de aire de la segunda nave, sin embargo podemos observar que el aire en la parte superior de esta nave, se mantiene en movimiento, lo cual es un indicio de que el aire caliente no se acumulara en la parte superior de esta.

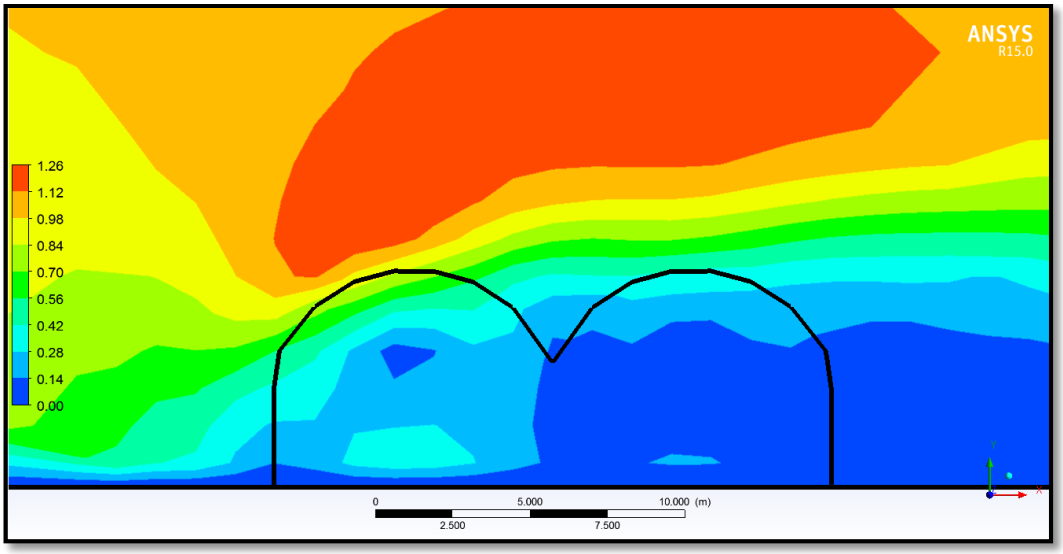


Figura 33 Velocidad de viento estructura de malla sombra.

Ahora analicemos el caso de una estructura que estuviera cubierta completamente de plástico, para la misma condición de temperatura, velocidad de viento y radiación, obtenemos que el aire al interior de la estructura se eleva en un 1 °C , similar al obtenido en la fase experimental.

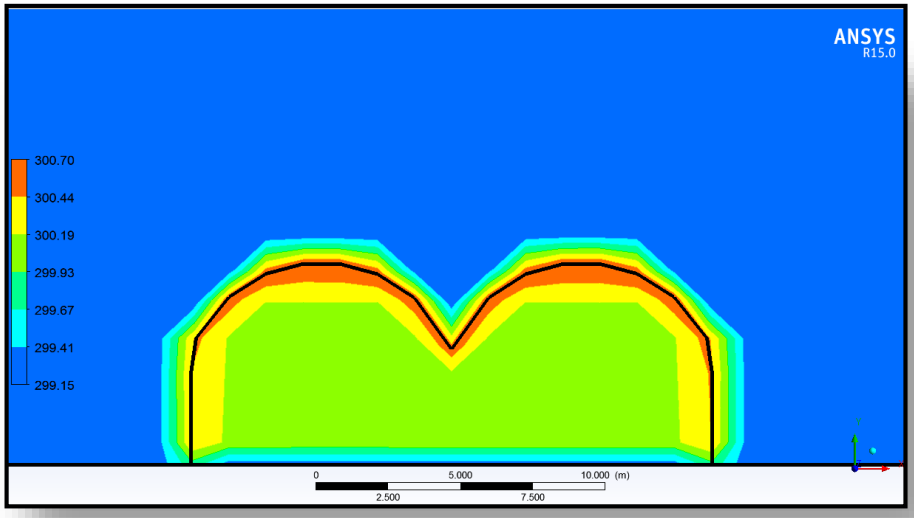


Figura 34 Temperatura estructura de cubierta plástica.

Habrá que notar que al estar cerrada la estructura nos genera un flujo de aire en la parte superior del invernadero, sin embargo, al interior de este el calor queda atrapado, y se eleva la temperatura.

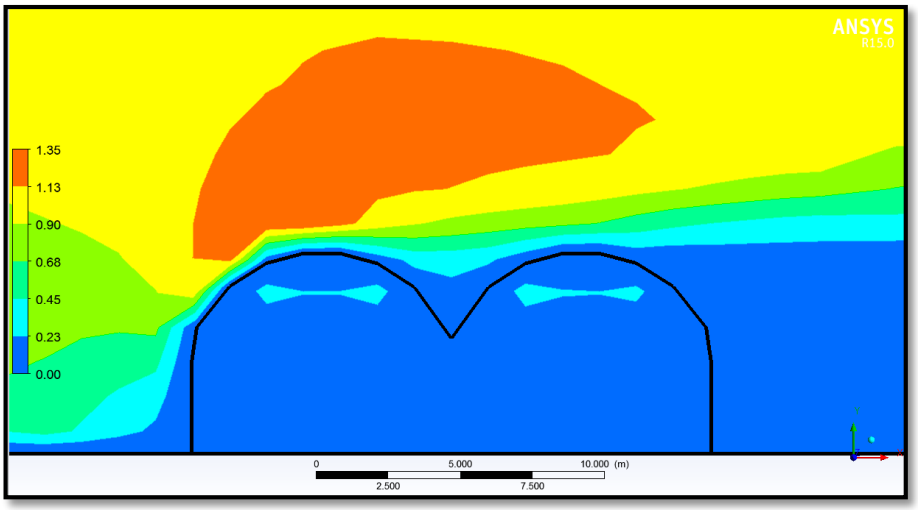


Figura 35 Velocidad de viento estructura de cubierta plástica.

VI. CONCLUSIONES

La estructura hibrida genero condiciones favorables de temperatura en el punto de máxima temperatura exterior, generando un gradiente de un gradiente térmico (GT=-4.65°C) negativo comparado con la estructura control que genero incrementos en las temperaturas (GT=1.35°C).

La temperatura externa y la temperatura del invernadero control son superiores a los valores de 26°C propuesto por casillas como rango máximo óptimo, sin embargo el estrés de temperatura se alcanza dentro del invernadero control al llegar al valor superior a 30°C de 12:00 hasta las 4:00 pm en un día soleado, en el cual la planta entra en un estrés por temperatura limitando la abertura de estomas, por lo que al no haber intercambio gaseoso se ve afectada la fotosíntesis y por ende la reducción de la productividad del cultivo.

La radiación total registrada durante el periodo de toma de datos nos revela que este valor alcanza un pico diario por encima de 1000 watt/m^2, el cual se da entre las 11:30 am y 1:30 pm, para el rango de datos tomados. El requerimiento de las hortalizas producidas en invernadero alcanza la saturación de radiación solar fotosintética de 50 a 150 watts/m^2 (Luis Bérriz, Manuel Alvarez y Lisandro Vázquez), considerando este rango de radiación, los valores registrados durante el experimento están por encima de los requerimientos de las plantas.

En lo que respecta a la herramienta CFD, permitió hacer un análisis más detallado de las temperaturas al interior de las estructuras estudiadas, y no limitarnos a la toma de un dato de temperatura puntual. El invernadero hibrido en su condición abierta género un patrón de temperatura homogéneo en su interior, similar a la temperatura externa, no se observan acumulaciones de calor en la parte del techo. En lo que respecta al invernadero control, en el techo se apreció que el aire caliente queda atrapado por la cubierta plástica evitando su desalojo.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahmed E. M., Abaas O., Ahmed M., Ismail M. R., 2011. Performance evaluation of three different types of local evaporative cooling pads in greenhouses in Sudan.S. J. of BiologicalSciences 18, 45-51.

Alpi A., Tognoni F., 1991. Cultivo en invernadero. Ediciones Mudi-Prensa. España.

BournetP.E., Boulard T., 2010. Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: A review of experimental and CFD studies. Computers and Electronics in Agriculture 74, 195-217.

Castilla Nicolás, 2005. Invernaderos de plástico, Tecnología y manejo. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.

Dai Y., Shen Z., Liu Y., Wang L., Hannaway D., Lu H., 2009. Effects of shade treatments on the photosynthetic capacity, chlorophyll fluorescence, and chlorophyll content of *Tetrastigmahemsleyanum*Diels etGilg. Enviromental and Experimental Botany 65, 177-182.

Ilic Z. S., Milenkovic L., Stanojevic L. , Cvetkovic D., Fallik E., 2012. Effects of the modification of light intensity by color shade nets on yield and quality of tomato fruits. ScientiaHorticulturae 139, 90–95.

Katsoulas N., Bartazanas T., Boulard T., Memier M., Kittas C., 2006. Effect of Vent Openings and Insect Screens on Greenhouse Ventilation.BiosystemsEngineering 93 (4), 427–436

Kittas C., Tchamitchian M., Katsoulas N., Karaiskou P., Papaioannou Ch., 2006. Effect of two UV-absorbing greenhouse-covering films on growth and yield of an eggplant soilless crop.ScientiaHorticulturae 110, 30–37.

Litago J., Baptista F. J., Meneses J. F., Navas L. M., Bailey B. J., Sánchez-Girón V., 2005. Statistical Modelling of the Microclimate in a Naturally Ventilated Greenhouse.Biosystems Engineering 92 (3), 365–381.

Nobel Park, 2009.Physicochemical and Enviromental Plant Physiology.Elsevier.Los Angeles, California.

Sánchez-Hermosilla J., Páez F., Rincón V.J., Callejón A.J., 2013. Evaluation of a fog cooling system for applying plant-protection products in a greenhouse tomato crop. Crop Protection 48, 76-81.

Tanny J., 2013. Microclimate and evapotranspiration of crops covered by agricultural screens: A review. Bios. Eng. II3, 26-43.

Teitel M., 2007. The effect of screened openings on greenhouse microclimate. Agricultural and Forest Meteorology 143, 159–175.

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Artículo publicado

Side and Roof Vents for Natural Ventilation of Greenhouses.

Argüelles-Castillo L. A. [1*], Rico-García E.[1]
[1] Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro. Cerro de las campanas, Santiago de Querétaro, México.
*e-mail: siul.arguelles@gmail.com

Abstract-**Temperatures above 40 °C are generated inside naturally ventilated greenhouses during the summer, so the aim of this study was to determine the area and configuration of windows necessary to design a greenhouse that mitigate high temperatures. Techniques of Computational Fluid Dynamics (CFD) with the commercial program ANSYS (FLOTRAN module) were used to simulate a greenhouse with a polyethylene cover (density: 930 kg/m^3) and windows of anti-aphid net.**
The simulation included a percentage variation in the lateral ventilation in 50% and 100%, as well as a variation in the roof opening percentage of 5%, 25%, 45% and 65%, under a wind speed of 1.7m/s. The models 25%-100% and 25%-50% produced the highest wind speed (0.32 m/s) at the side vent. Increasing the roof ventilation area favors more the ventilation rate than the increase in the side windows.

Key Words- **CFD, Ventilation rate, Lateral Window, Cenital Window, Temperature, Greenhouses.**

I. INTRODUCTION

Building structures to protect crops from inclement weather is becoming a usual practice as a tool to have intensive agriculture, such structures ranging from implementing rustic minimum protection to high-tech greenhouses that completely insulate the crop from outside weather. However, this type of greenhouses are not suitable for the climatic and socio-economic conditions in Mexico, thus this work represents a proposal for a specific greenhouse that takes advantage of the local climate to maximize resources and minimize costs investment.

The Mexican Republic have high radiation which combined with covers of greenhouses generate temperatures above 40 ° C in a greenhouse without a method of active cooling. This temperature for most crop plants produces a stress that causes a reduction in the rate of growth and development of the crop. So growers are forced to control high temperatures using cooling equipment (extractors, wet walls, fogging, etc.) methods that are cost restrictive for small producers.
The first part of the work is to understand how the local climate interacts with the climate inside the greenhouse and then to consider the culture inside so that the conditions generated will be suitable for the crop.

Studying the behavior of climate variables in greenhouses has been supported by modeling tools in which the physical variables involved to simulate the dynamic behavior in the greenhouses for better operation are included. In experiments that studied the behavior of different models of greenhouses conditions in wind tunnels where you can control the specific conditions and see how they react [14], however this type of installation is very expensive and is often supplemented with numerical modeling based approaches. These techniques are now replaced by the use of Computational Fluid Dynamics (CFD). The main advantage of CFD lies not only in predicting the ventilation rate but also the pattern of air movement and the distribution of temperature and humidity inside the greenhouse [3]. It also allows us to evaluate the effect of the structure shape to different climatic conditions and make changes to the structure without investing money in construction. We can excel in time and reduce cost to determine the effect, the proposed modifications or interaction with the external environment and the microclimate inside the greenhouse.

A greenhouse design is multifactorial problem highlighting radiation, temperature, ventilation and crop [5]. However Litago et al., concluded that the inside temperature is largely linked to solar radiation, external temperature and ventilation rate [9]. This article is focus on maximize the ventilation rate by the configuration of side and roof vents to avoid high temperatures.

II. THEORETICAL FOUNDATIONS

A. Radiation

Solar radiation conditions in greenhouses are very important from the point of view of production, not only quantitatively but also qualitatively. The first alteration generated by the greenhouse upon microclimatic parameters is to reduced sunlight [4]. Light plays an important role in the life of crops; an increase of 1% of light can provide a 1% increase in production [4]. The amount of light, its intensity and duration influence the amount of photosynthesis by a plant. Only a fraction of global solar radiation is used in photosynthesis, this is known as Photosynthetic Active Radiation (PAR) [4]. The appropriate level of radiation to saturate the photosynthetic system of many plants (C3 type) is about 400umol / m^{2}s, when it is given for 16 hours a day.

B. Air Temperature

Air temperature essentially affects all processes in plants. Physiological processes are carried out in a small range of temperature, the biochemical reactions has an optimum temperature value [10], as the temperature has a great effect on plants, they have evolved to react and adapt to conditions limiting their activity under stress conditions.

Photosynthetic activity has a clear response to temperature, showing a minimum (about 5 °), reaches an optimum (from 25 to 35 ° C in most vegetable species) and decreases at higher values. The optimum temperature increases with the level of radiation and CO_2. In practice, it is of interest to maintain high temperatures with low radiation. At high temperatures the crops grow best with high radiation, hence, we must try to limit shadowing in conventional horticultural crops (which are radiation demanding) but when the plant is subjected to stress conditions at 35 ° C or 30 ° C in the case of dry air, reacts by closing stomata to limit water loss, which limits the exchange of CO_2 and thus the growth rate and plant development [4] is reduced.

C. Wind

The main forces responsible for the movement of air in greenhouses are: The stack effect, associated with density gradients, and the strength of convection associated with the wind. Buoyancy forces resulting from pressure gradients induced by the uneven distribution of temperature and humidity to cause displacement of the flow increases the circulation of air within the greenhouse. The chimney effect is the main force of air movement when the greenhouse is closed or when wind velocity is very weak. Since the worst case condition is when the greenhouse is completely confined, as the movement of air is controlled by the thermal effects of which the operator has very little influence [3]. Natural ventilation allows air renewal of hot air inside with fresh air from outside. It's achieved by means of permanent or temporary roof windows and by side walls. The ventilation efficiency, measured by the rate of air exchange depends on the weather conditions: strength and direction of external wind and temperature difference between inside and outside. These two effects, wind effect and thermal effect generated pressure differences that create air movement (natural convection), from the highest to the lowest pressures. Ventilation efficiency also depends on the characteristics of the apertures (surfaces and position) and vegetation (plant lines orientation regarding the side windows).

D. Computational Fluid Dynamics

CFD is a sophisticated design and analysis tool that uses computers to simulate fluid flow, heat and mas transfer, phase change, and solid and fluid interaction [11]. CFD simulations consist of numerically solving the Navier-Stokes equations over a discrete domain [1]. The set of equations for steady-state, incompressible flow is as follows:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \qquad (1)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \qquad (2)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(k \frac{\partial T}{\partial x_i}\right) + \frac{\partial P}{\partial T} + u_i \frac{\partial P}{\partial x_i} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \qquad (3)$$

where u_i is the velocity component in i-direction (m s^{-1}), x_i indicates i-direction, r is the air density (kg m^{-3}), P is the pressure (Pa), g_i is any field acceleration in the i-direction (m s^{-2},only gravitational acceleration for this case), h is the enthalpy (J kg^{-1}), k is air conductivity coefficient (W m^{-1} K^{-1}), T is the absolute air temperature (K), and μ is the air molecular viscosity (kg s^{-1} m^{-1})[13].

III. METHODOLOGY

This work consisted in the analysis of a greenhouse using the modeling tool ANSYS 14.0 (FLOTRAN, module). The greenhouse analyzed is 10.0 m wide with walls of 2.0 m high with a thickness of 0.001 m and 3.0 m from the ground to the highest point of the roof. The walls and roof were cover with polyethylene and insect proof screen (e. g. Fig. 1). Eight models were generated by varying the ratio of the plastic cover and net. The variation of the wall was 50% and 100% of net, and the percentage of net in the roof was 5%, 25%, 45% and 65%, with the rest as a plastic cover.

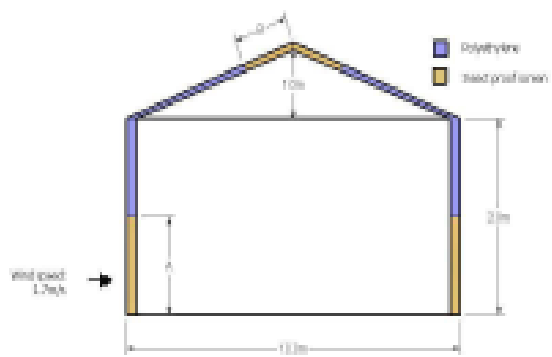


Fig. 1. General shape and dimensions of greenhouse (A: Side vent of Insect proof screen, B: roof vent of Insect proof screen.)

All models were placed at the center of a rectangle of 110m wide and 20 m high to simulate the atmosphere, the inlet on this domain was 1.7 m/s and the outlet was a pressure of 0 Pa. In this study, the k-e model was used as a way to take into account air turbulence as it has been widely applied in practical parametric studies with reasonable accuracy [2,7].

The considerations to solve the simulation were:

1) The finite element used was FLUID141
2) It was consider as a steady state and a turbulent flow.

3) Turbulence model employed was the standard k-ε, since it is suggested to the greenhouse conditions [2], [7].
4) Gravity as -9.81 at axis Y.
5) The plastic cover was Polyethylene of density 930kg/m^3.
6) The wind speed at the ground and the upper line of the domain were considered as 0 m/s.
7) Insect proof screen properties:

Permeability	182415177
Hydraulic diameter	0.00027083
Coeff of Reynold's number	1.6259
Exponent of Reynold's number	0.25

IV. DISCUSSION AND RESULTS

The ventilation rate is highly dependent on wind speed and the type of cover that is used, as well as settings of opening and closing of vents. Wind speed of leeward side vent was reduced to values between 18.95% and 7.07% of the initial condition. The wind speed at the leeward side vent presented a response to opening variation of the roof as shown in Table I. Exchanging roof covering to anti-aphid net allows the air inside the greenhouse to be dislodged easily, having an optimal value of 18.95% reached at models of 25% anti-aphid roof.

TABLE I

OUTPUT WIND SPEED*

Model (Roof %, side %)	Leeward Side Vent	Leeward Roof Vent	Windward Roof Vent
5%-100%	0.1413	0.0851	0.0290
25%-100%	0.3222	0.0559	0.1081
45%-100%	0.1526	0.0510	0.0285
65%-100%	0.1489	0.0471	0.0332
5%-50%	0.1767	0.0441	0.0192
25%-50%	0.3222	0.2059	0.2204
45%-50%	0.1295	0.0332	0.0208
65%-50%	0.1203	0.0308	0.0257

*Wind Speed in meters/second

Reducing side vent make the air to travel a greater distance causing higher wind speed at the roof vents. However, the windward vent was limited by the wind passing over the roof that acts as a barrier, in TABLE II are shown the percentage of operation for all configurations.

TABLE II

OPERATION OF WINDWARD ROOF VENT

Model (Roof %, side %)	Vent Side	Operation (%)
5%-100%	0.25	100.0
25%-100%	1.28	85.0
45%-100%	2.29	70.0
65%-100%	3.31	85.0
5%-50%	0.25	35.0
25%-50%	1.28	100.0
45%-50%	2.29	60.0
65%-50%	3.31	80.0

In the present work it was determined that roof vents allows better flow inside the greenhouse, as they act as an outlet to air trapped in the top of the greenhouse. This is consistent with the findings of [6] who determined that in settings where there is no roof windows will be a decrease of 32% in exchange rate. Katsoulas et al. found that the most efficient configuration of windows is the combination of side and zenith windows and there is a reduction of 46% when only used side windows and 71% when only zenith windows are used [8].

Based on the information generated at 1.7 m /s, it is counterproductive to have roof opening vents higher than 25 %because the wind passing over the greenhouse acts as a barrier preventing the exit of indoor air. However, at lower wind speeds, where the exchange rate depends on convection and external wind speed does not block the roof vent, the ventilation is more efficient when having only roof ventilation as reported by [12] being the least desirable when you have only side windows.

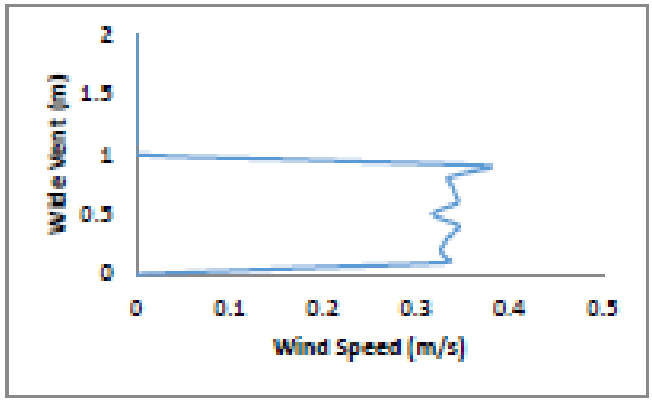


Fig. 2. Velocity profile of Leeward Side Vent for model 50%-25%.

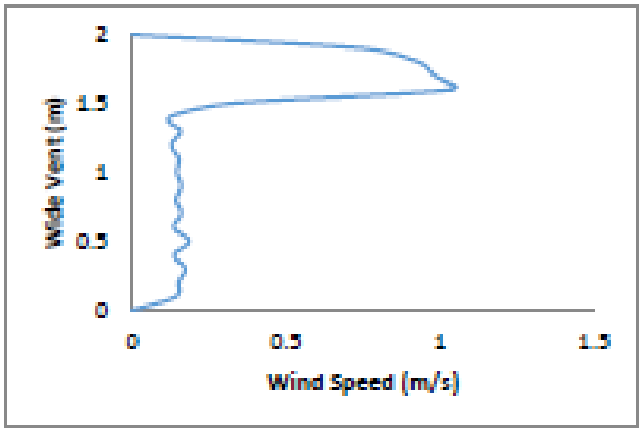


Fig. 3. Velocity profile of Leeward Side Vent for model 100%-25%.

As is shown in Fig. 2, the velocity profile in the side vent with an opening of 50% remains constant while for the 100% opening speeds are concentrated at the top and it make the air at the bottom to get stuck (Fig. 3). Analyzing the distribution of velocities within the model 25%-50%, it is observed in Fig. 4 that mass of air closest to the intake window has a higher speed of renewed.

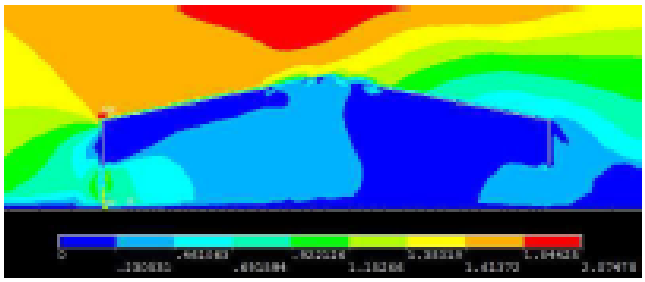


Fig. 4. Velocity distribution (m/s)

The air flowing thru the roof decreases the speed of the outgoing air from the roof vent, blocking it (Fig. 5). Otherwise in the leeward vent roof, the air flow generates a drag. A better response would be obtained if the roof vent was displaced from the center toward the leeward roof to generate the suction effect causing the air from the second part of the greenhouse goes out.

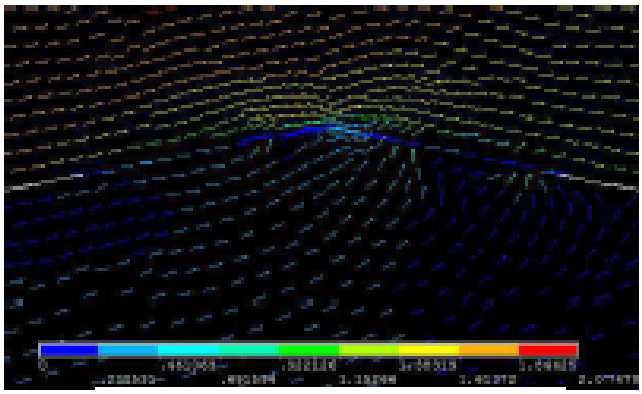


Fig. 5. Roof Vent Flow (m/s)

V. CONCLUSION

The CFD models 25%-50% and 25%-100% produced the highest wind speed (0.32 m/s) at the side vent. Increasing the roof vent favors the ventilation rate. Although the windward roof vent is blocked for the air flowing thru the roof.
A roof vent displaced from the center toward the leeward roof will generate the suction effect causing the air from the second part of the greenhouse goes out

ACKNOWLEDGMENT

The authors wish to express their gratitude to the Mexican Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología for partially financing the present work by means of Becas Nacionales.

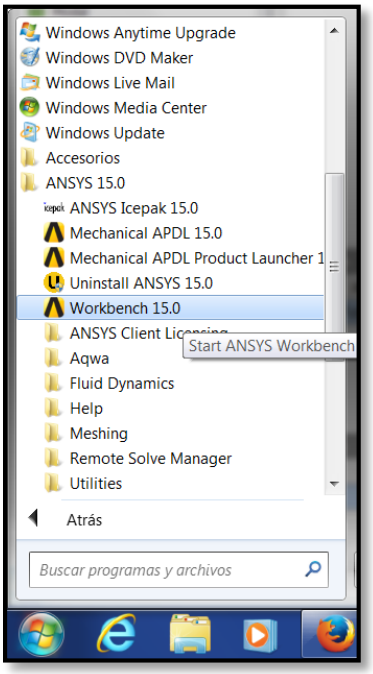
REFERENCES

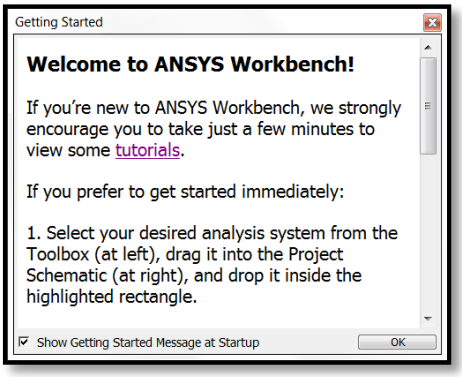
[1] Anderson, J. D. Computational Fluid Dynamics. The Basics with Applications. McGraw-Hill Inc. New York. USA. 547 p. 1995.
[2] Boulard, T., C. Kittas, J. C. Roy, and S. Wang. Convective and ventilation transfers in greenhouse, Part 2: determination of distributed greenhouse climate. Biosystems Eng. 83: 129-147, 2002.
[3] Bournet P.E., Boulard T., Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: A review of experimental and CFD studies. Computers and Electronics in Agriculture 74, 195-217, 2010.
[4] Castilla Nicolás, "Invernaderos de plástico, Tecnología y manejo." Ed. Madrid, Spain: Mundi-Prensa, 2005.
[5] Critten, D.L. ,1, Bailey, B.J., A review of greenhouse engineering development during the 1990s. 2002
[6] Espejel-Trujano D. , Lopez-Cruz, I. L. Determination of rates of natural ventilation in greenhouse using theoretical models and tracer gases. Rev. Mex. Cienc. Agric. Vol. 4 Num. 2, March 2013.
[7] Haxaire, R., T. Bourlard, and M. Mermier. 2000. Greenhouse natural ventilation by wind forces. Acta Horticulturae 534: 31-40.
[8] Katsoulas, N.; Bartzanas, T; Boulard, T.; Mermier, M. and Kittas, C. 2006. Effect of vent openings and insect screens on greenhouse ventilation. Biosys. Eng. 93(4):427-436.
[9] Litago J., Baptista F. J., Meneses J. F., Navas L. M., Bailey B. J., Sánchez-Girón V., Statistical Modelling of the Microclimate in a Naturally Ventilated Greenhouse. Biosystems Engineering 92 (3), 365–381, 2005.
[10] Nobel Park, Physicochemical and Environmental Plant Physiology. Elsevier. Los Angeles, California. , 2009.
[11] Norton T. , Sun Da-wen, Grant, J. , Fallon, R. Dodd, V. , Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modeling and desing of ventilation systems in the agricultural industry: A review. Bioresource Technology 98, 2386-2414, 2007.
[12] Papadakis, G.; Mermier, M.; Meneses, J. F. and Boulard, T. 1996. Measurement and analysis of air exchange rates in a greenhouse with continuous roof and side openings. J. Agric. Eng. Res. 63:219-228.
[13] Romero-Gomez, P. , Choi , C. Y. , Lopez-Cruz, I. Enhancement of the greenhouse air ventilation rate under climate conditions of central mexico. Agrociencia 44: 1-15. 2010.
[14] Sherman, M. H. 1990. Tracer-gas techniques for measuring ventilation in a single zone. Building Environ. 25(4):365-374.

Anexo 2. Manual Ansys 15.0 (Fluent)

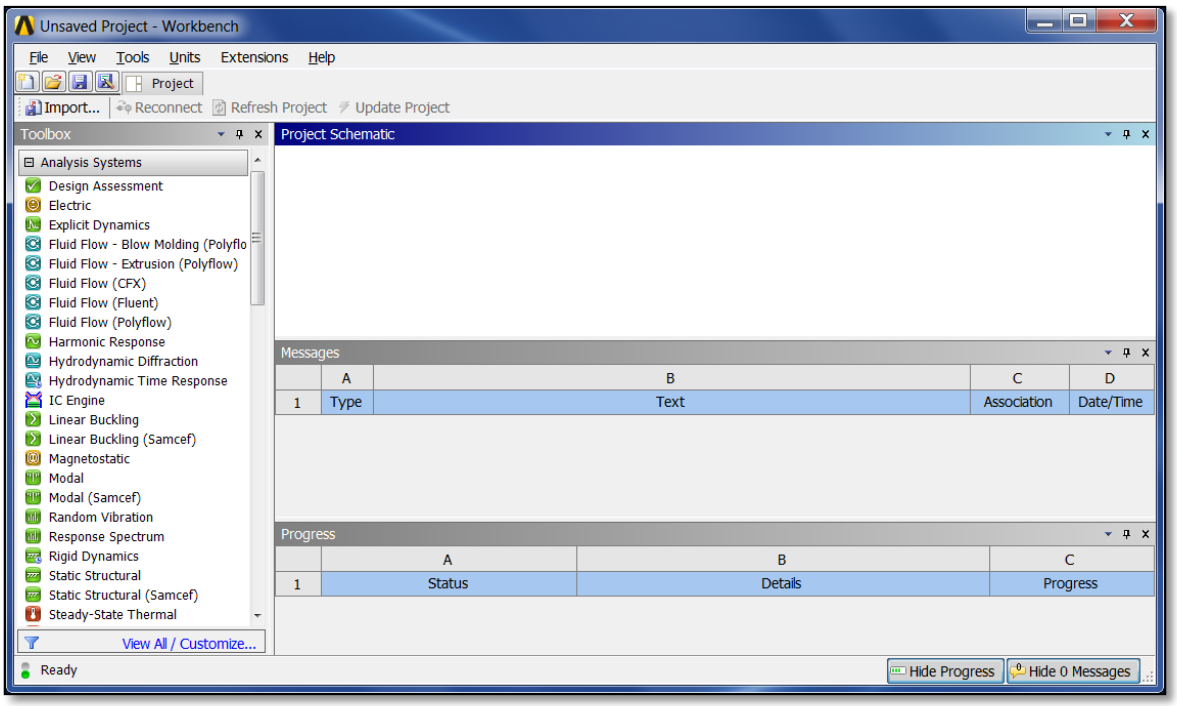
El programa ANSYS dinámica de fluidos computacional es una herramienta de simulación que permite predecir, con cierta confianza, el impacto del flujo de fluidos en un producto. Este módulo se trabaja a partir de la plataforma ANSYSWorkbench.

Una vez instalado el programa para iniciarlo damos click en el botón de Iniciar de Windows, Todos los programas. Encontramos la carpeta ANSYS 15.0, y dentro de ella damos doble click a Workbench 15.0 desplegándose la ventana de consejos para el uso del programa.



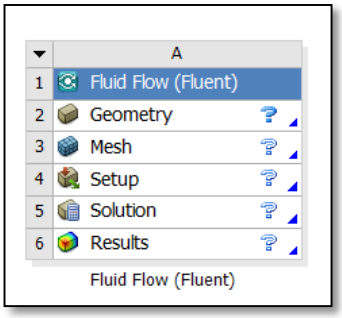


Workbench 15.0 consistirá en una serie de módulos que se administraran a partir de una ventana principal. La ventana principal consta de las siguientes partes: Barra de herramientas, Ventana de mensajes, Área de trabajo..

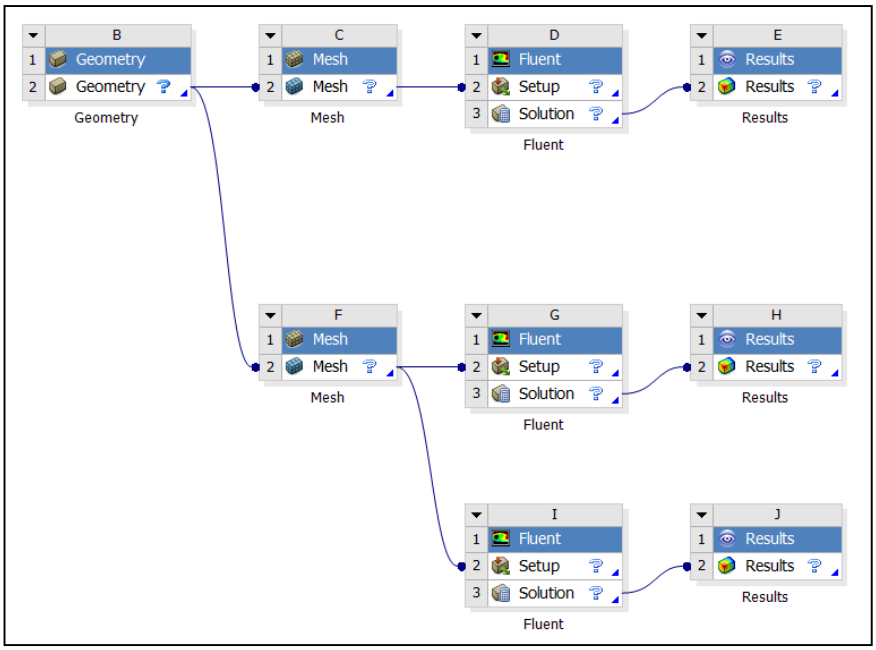


En el área de trabajo se cargaran los módulos que formaran parte de nuestro proyecto, una simulación consiste en 5 etapas: Geometría, Mallado, Setup (carga de información), Solución, Resultados. En la plataforma de workbench se tiene dos opciones para cargar las diferentes etapas:

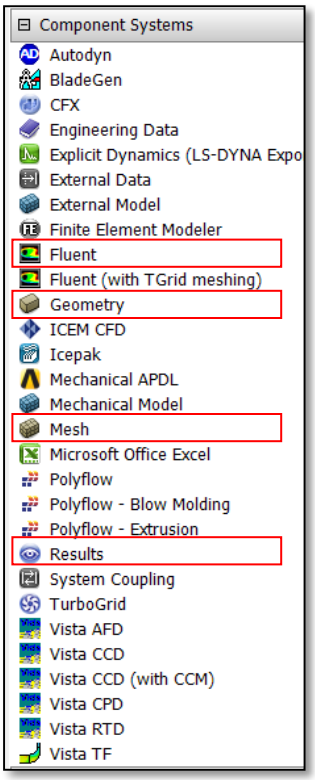
La primera consiste en un bloque que contiene las 5 etapas, para resolver un único problema. Esta opción la encontraremos en la barra de Herramientas (Toolbox) con el nombre de Fluid Flow (Fluent) el cual está enfocado hacia la modelación de dinámica computacional de fluidos.

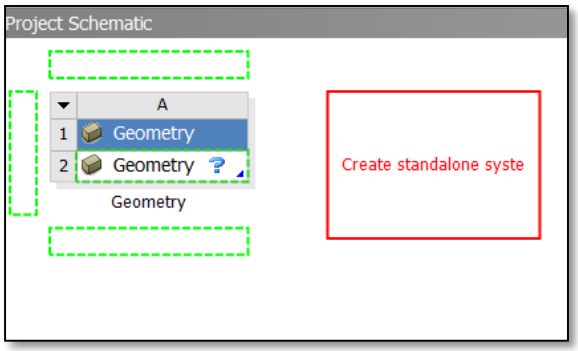


La segunda opción, consiste en implementar los módulos por separado para luego ser ligados entre sí, lo cual permite llegar a distintas soluciones sin perder la información generada.

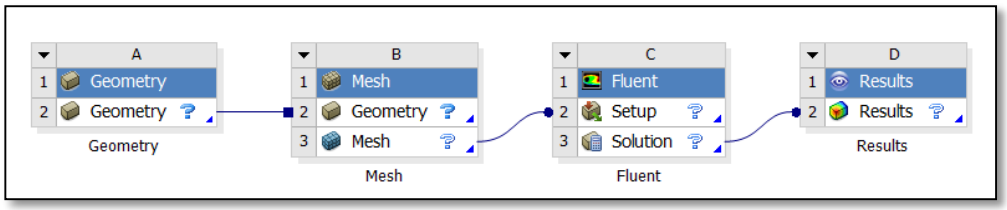


Para utilizar esta opción se arrastra cada componente de la barra de herramientas en la opción "ComponentSystems" hacia el área de trabajo, el componente se soltara dentro del cuadro verde, que indicara que se está colocando en esa opción.





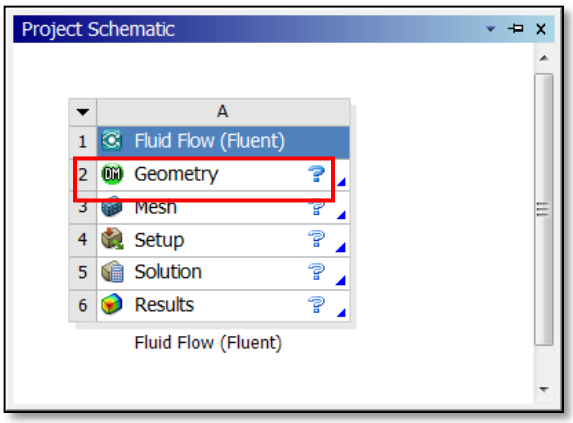
Una vez cargados los diferentes componentes, será necesario ligarlos para que la información que genere uno sea procesada y actualizada en todos los componentes. Se colocara el cursor sobre Geometry de la pestaña 2, y se arrastrara hacia el módulo de mallado, a la opción de Geometry. La opción Mesh se unirá de la misma forma con la pestaña de Setup, y la opción Solution se unirá a la pestaña Results, como se indica en la figura.



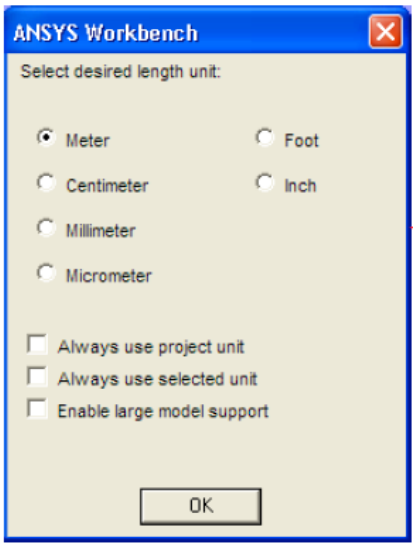
Será necesario cargar información para cada uno de estos módulos ya sea si los manejamos por separado o en un solo bloque, a continuación se describe cada una de las etapas de la simulación.

GEOMETRÍA

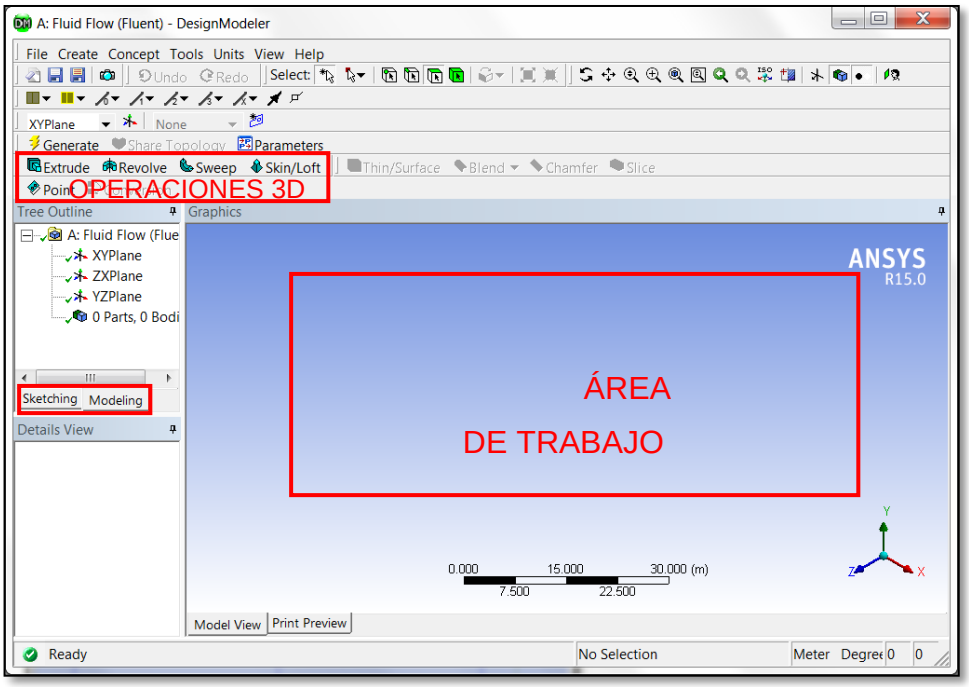
La geometría de modelo consiste en la disposición espacial de los diferentes componentes que se incluirán en el problema. Se generarán las interacciones y medios, que serán necesarios en los siguientes módulos para poder ingresar las características de materiales. Para ingresar la Geometría del modelo, se dará doble click en la pestaña 2 Geometry, el cual nos abrirá el DesingModeler.



Al iniciar por primera vez el DesingModeler nos preguntara las unidades en las que queremos trabajar, en nuestro caso seleccionaremos Meter (Metros).



De la ventana principal del DesignModeler se resalta el área de trabajo y las pestañas de herramientas Sketching, Modeling y Operaciones 3D.



1) Área de trabajo: Crear, editar y visualizar geometrías.

2) Modeling: Manipulación de los planos, configuración de los elementos creados en el área de trabajo.

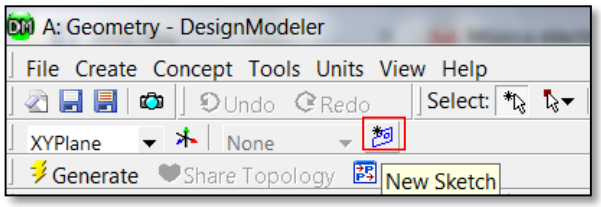
3) Sketching: Herramienta de dibujo: Dibujo de líneas, arcos, configuración de líneas, etc.

4) Operaciones 3D

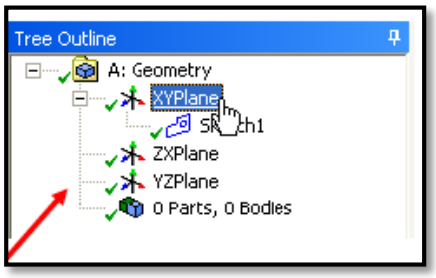
Para el ejemplo se generará un invernadero con dos naves en el plano XY, inmerso en un prisma rectangular que simulara las condiciones atmosféricas que rodean la estructura. La gravedad actuara sobre el eje Y.

Sketching

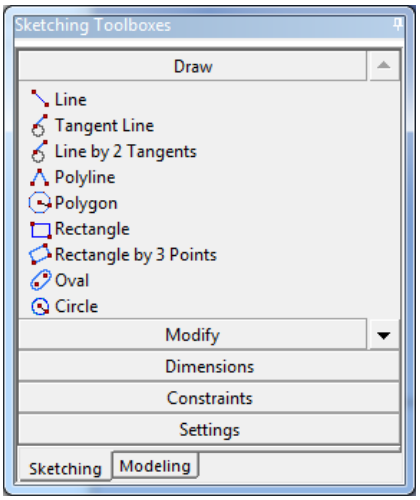
En esta aplicación se trabaja por planos. Dentro de cada plano se genera un Sketch, que será el elemento en el que se guardan cada dibujo. Para crear un skecth, seleccionamos el plano en el que trabajaremos, y damos click en el icono de New Sketch.



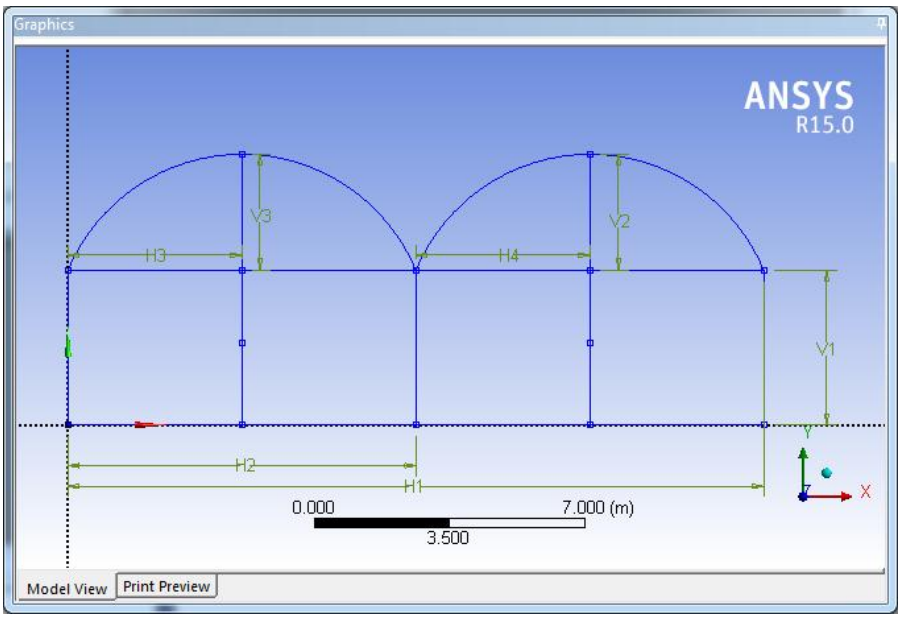
En la ventana TreeOutline, se desplegara el Skecth creado. En la esquina inferior derecha daremos click sobre el eje Z, para poder comenzar a dibujar sobre el plano XY.



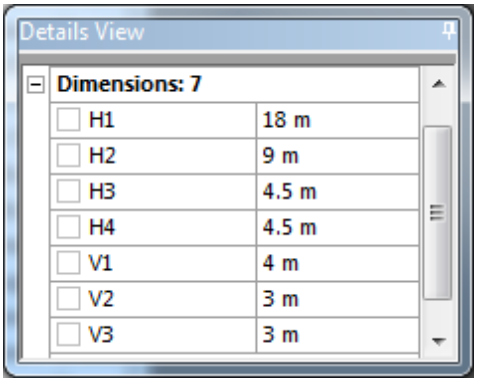
Para colocar trazos se dará click en la pestaña Sketching, lo que nos desplegará la Barra de herramientas de dibujo.



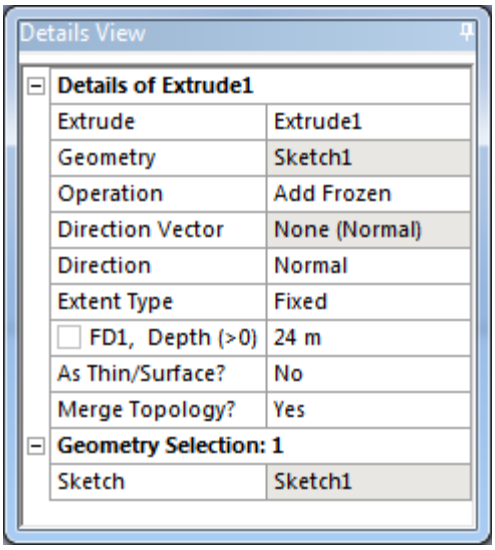
Nos apoyamos en estas herramientas para realizar el siguiente dibujo, en el cual podemos observar líneas que están en los arcos, las cuales sirven de apoyo para dimensionar.



Para asignar las magnitudes de las líneas dará click sobre la pestaña Dimensions, quedando de la siguiente manera.

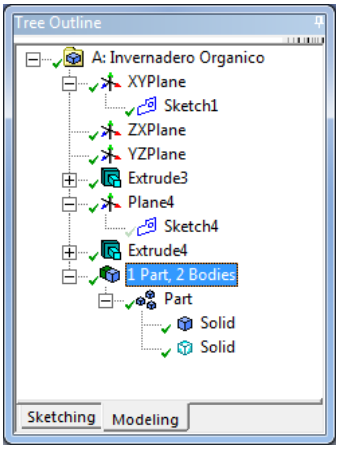


Una vez terminado el dibujo se procederá a eliminar las líneas que sirvieron de apoyo, se selecciona el sketch y se genera el modelo en 3D mediante la herramienta Extrude. La configuración quedará de la siguiente manera:



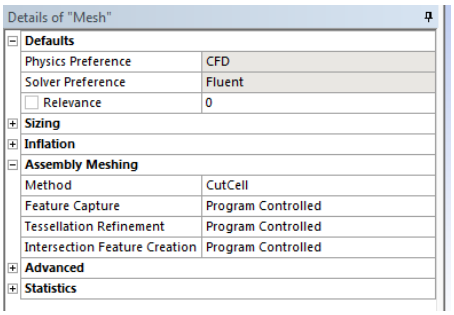
Sera necesario crear otro prisma rectangular que contenga al invernadero que hemos hecho, el cual simulara las condiciones atmosféricas a las que estará sometido nuestro modelo. Las dimensiones del dominio serán modificadas de acuerdo a cada simulación, sin embargo, lo que determinará que el tamaño es correcto será la estabilidad que presenten las variables propuestas en el dominio.

Para finalizar los sólidos generados se deberán unir en una parte con la finalidad que el programa los reconozca como dos fluidos que tienen interacción.



MALLADO

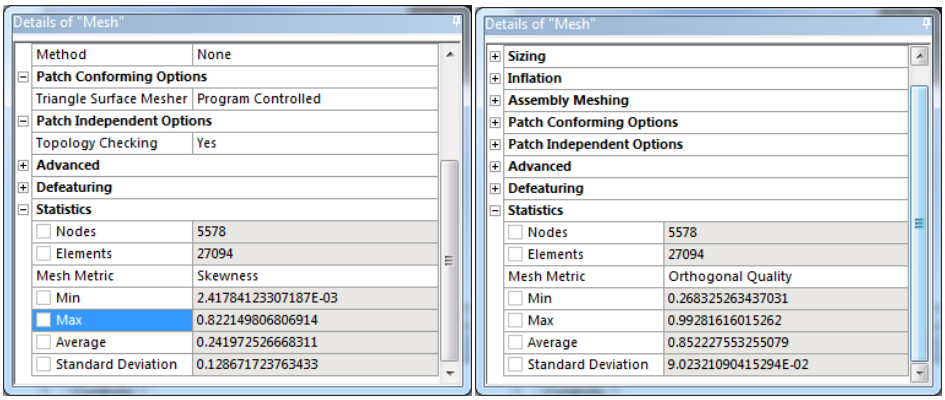
El mallado de nuestro modelo será fundamental para obtener resultados en nuestra simulación, ya que un mallado deficiente generara problemas de convergencia. La configuración del mallado deberá ser en CFD- Fluent, sin embargo los métodos elegidos podrán ser modificados. el programa genera un mallado de manera automático, será de nuestra elección optar por cierto tipo de figura geometría.



Details of "Mesh"

Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Relevance	0
Sizing	
Inflation	
Assembly Meshing	
Method	CutCell
Feature Capture	Program Controlled
Tessellation Refinement	Program Controlled
Intersection Feature Creation	Program Controlled
Advanced	
Statistics	

Lo que si habrá que tener en cuenta para aceptar o no un mallado serán los estadísticos Skewness y Orthogonal Quality.



Details of "Mesh"

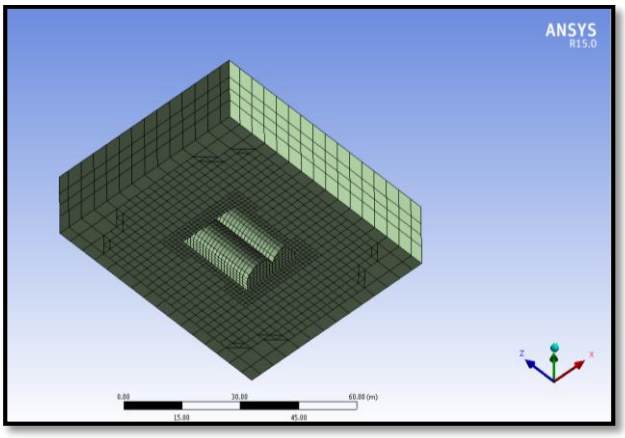
Method	None
Patch Conforming Options	
Triangle Surface Mesher	Program Controlled
Patch Independent Options	
Topology Checking	Yes
Advanced	
Defeaturing	
Statistics	
Nodes	5578
Elements	27094
Mesh Metric	Skewness
Min	2.41784123307187E-03
Max	0.822149806806914
Average	0.241972526668311
Standard Deviation	0.128671723763433

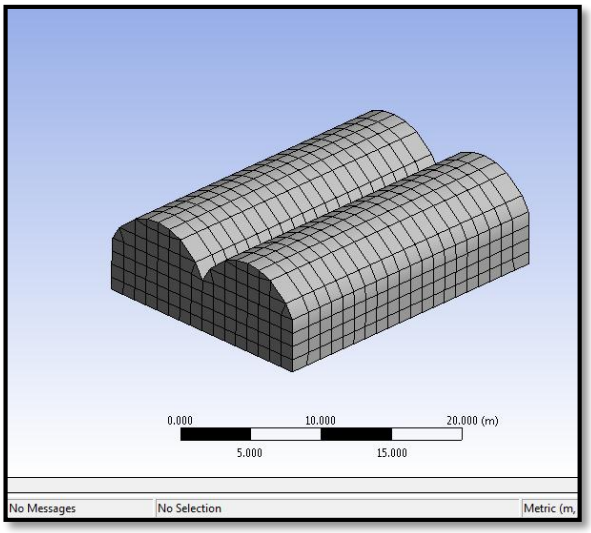
Details of "Mesh"

Sizing	
Inflation	
Assembly Meshing	
Patch Conforming Options	
Patch Independent Options	
Advanced	
Defeaturing	
Statistics	
Nodes	5578
Elements	27094
Mesh Metric	Orthogonal Quality
Min	0.268325263437031
Max	0.99281616015262
Average	0.852227553255079
Standard Deviation	9.02321090415294E-02

Parámetro	Excelente	Muy Bueno	Bueno	Aceptable	Malo	Inaceptable
Skewness	0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00
Orthogonal Quality	1-0.95	0.95-0.70	0.69-0.20	0.20-0.10	0.10-0.001	0.001-0.0

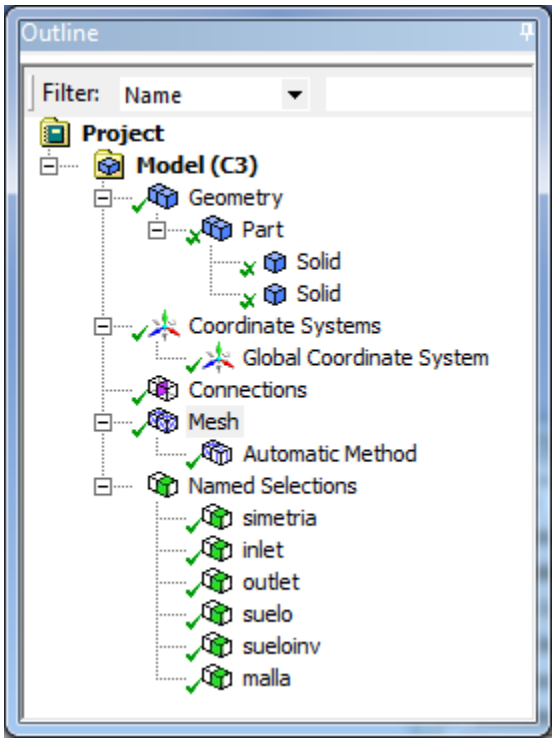
En el ejemplo escogimos el método de Cutcell, generándose el siguiente mallado.





Como último paso en el mallado, se procederá a darle nombre a cada una de las superficies de modelo. Para esto se da click sobre la superficie a nombrar, seguido de un click derecho. Se selecciona Created Named Selection y se le asigna el nombre. Habrá que tener en cuenta que todas las superficies del modelo deberán llevar un nombre ya que de esta manera es como se le asignara las características de los materiales.

Las entradas del dominio se designaran como inlet, las salidas como outlet y las paredes con simetry. En nuestro caso quedara de la siguiente manera.

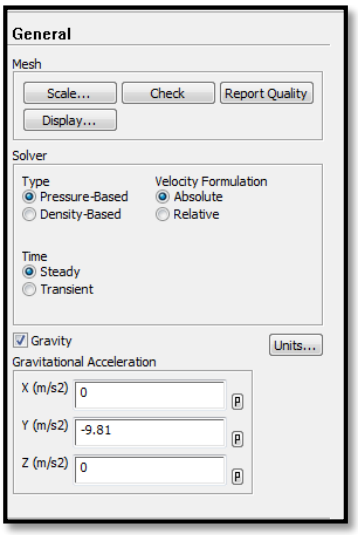


SETUP

El siguiente paso es la configuración del modelo, en esta sección se deberá cargar las características de materiales, valores de frontera, modelos, etc.

General

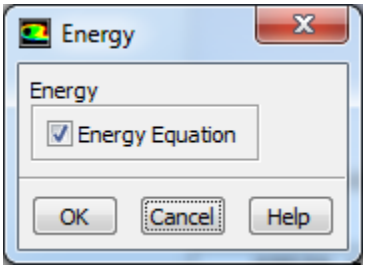
Aquí se ingresara las condiciones de la simulación, así como deberemos activar la casilla Gravity para que el programa nos permita acceder a todas las herramientas que ocuparemos.

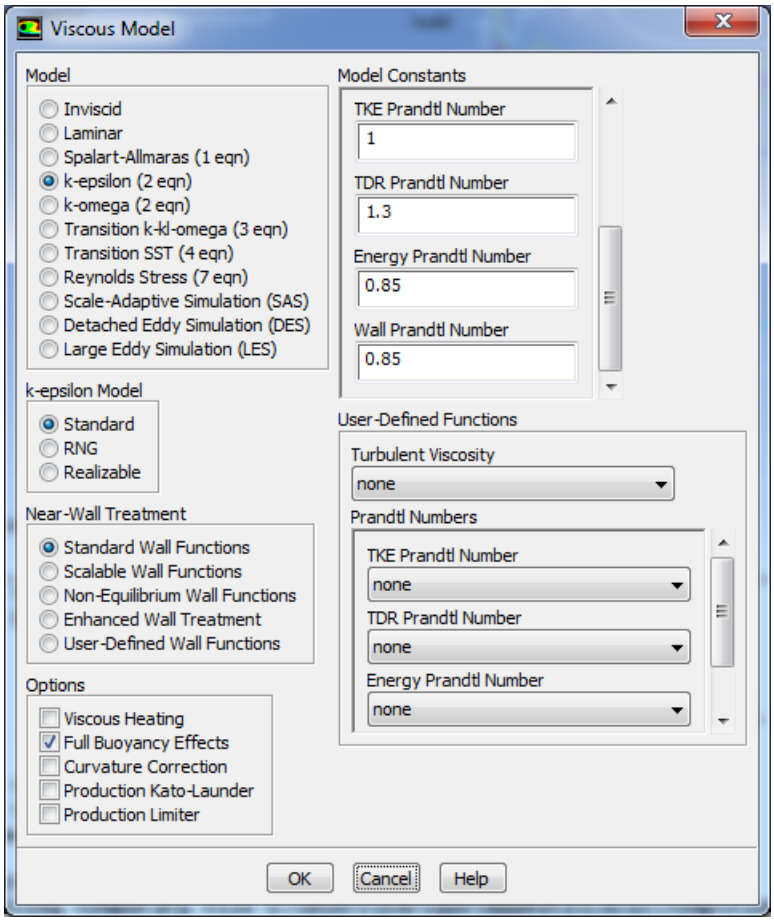


Modelos

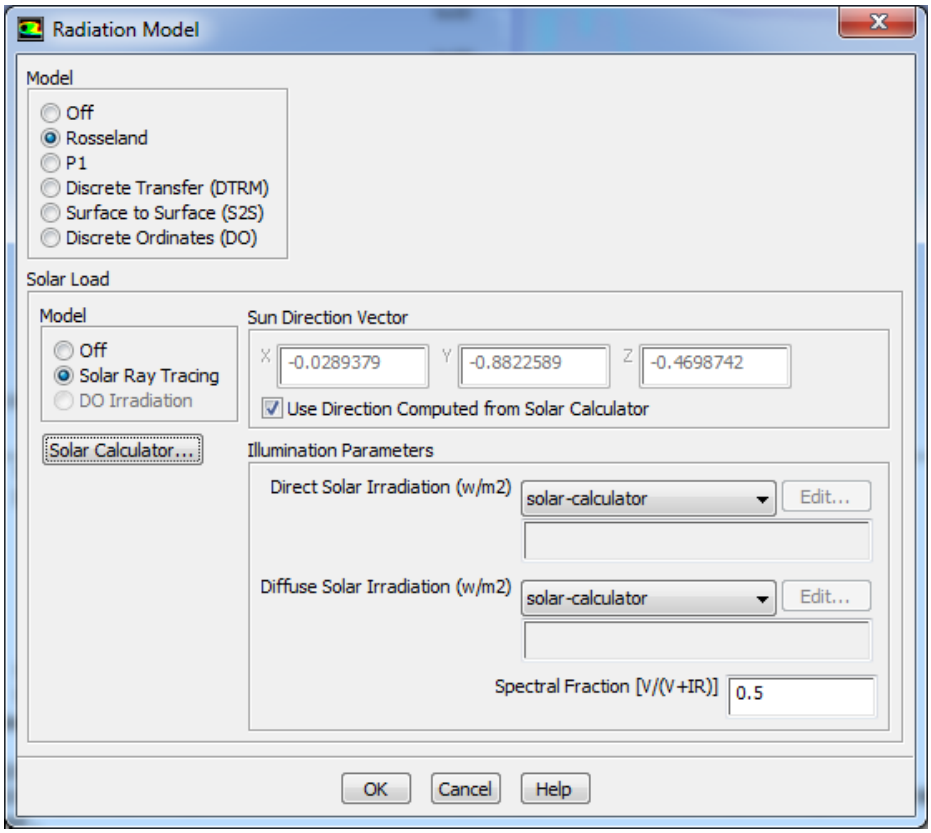
En esta pestaña activaremos los modelos que pensamos cargar para que el programa resulta el problema, en este punto se deberá revisar la literatura para determinar cuál es el modelo adecuado a nuestra simulación.

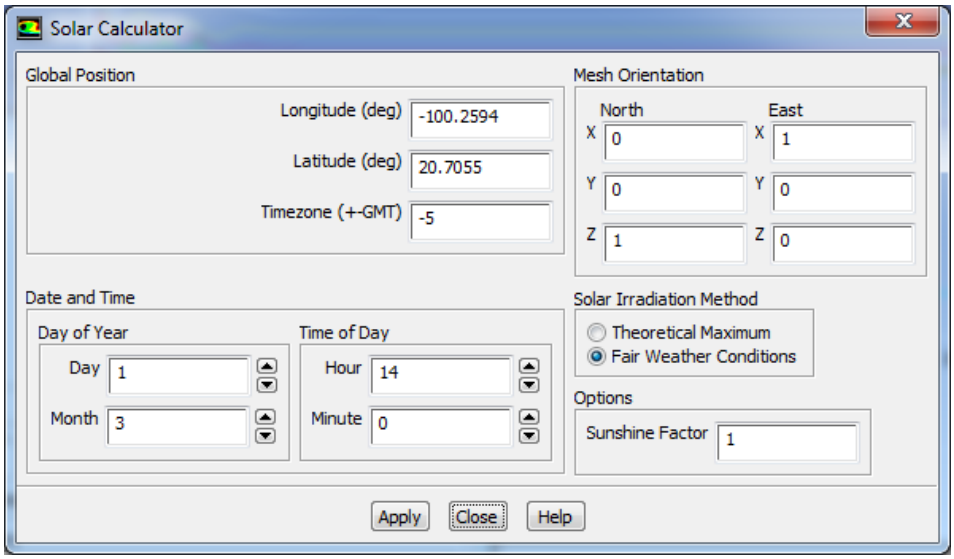
En nuestro caso activamos el modelo de energía, el modelo de viscosidad, y el de radiación, quedando de la siguiente manera:





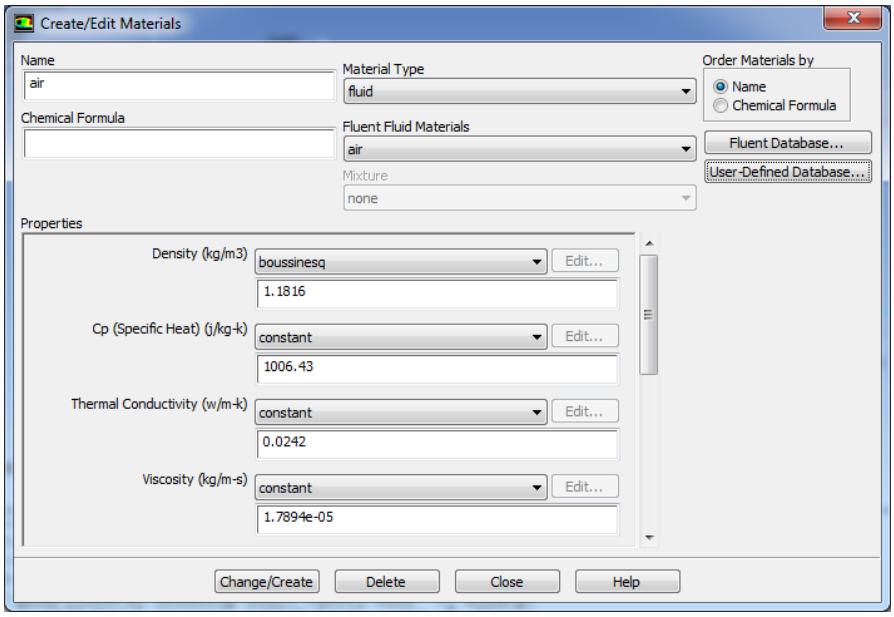
El modelo de radiación nos permitirá cargar la carga de radiación mediante valores conocidos o generarlos a partir de la latitud, longitud del lugar.

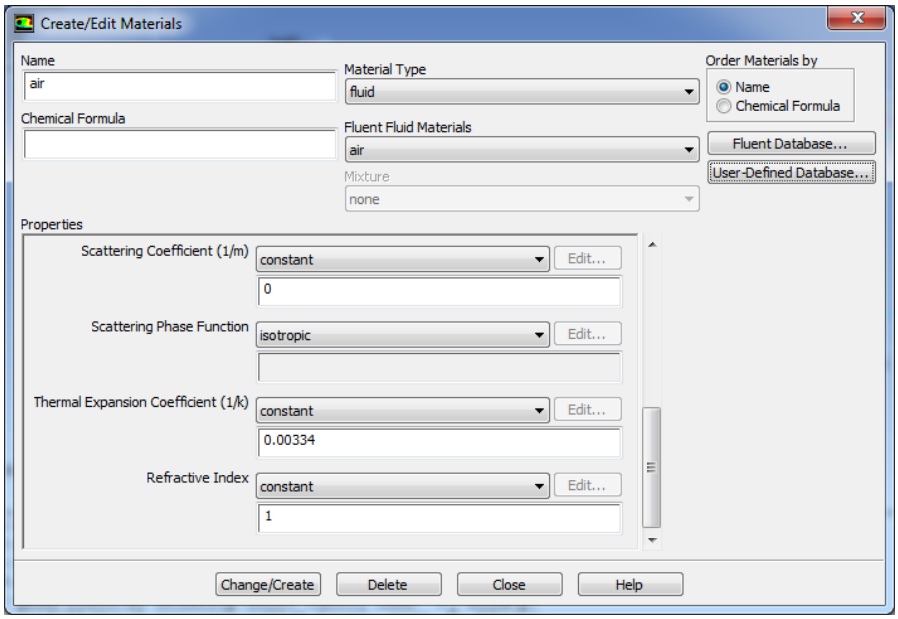




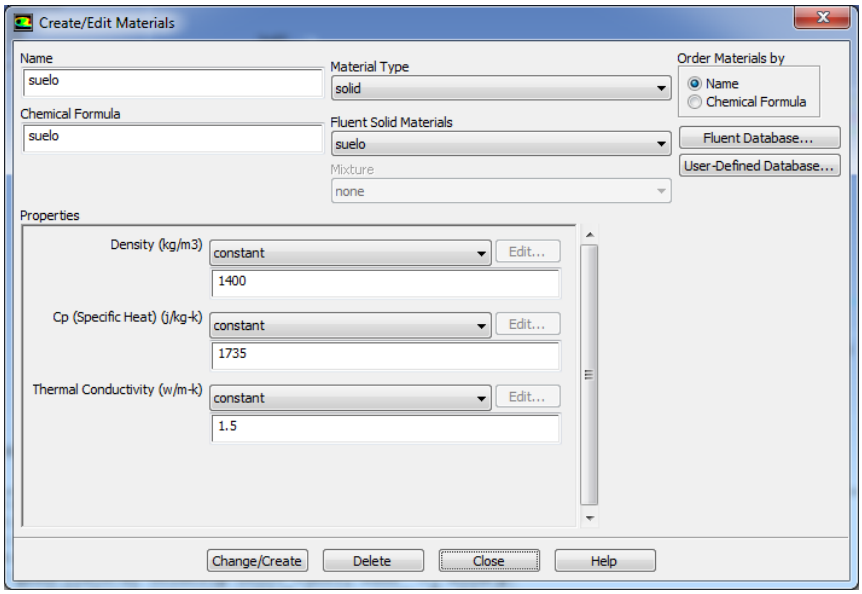
Materiales

En esta pestaña meteremos las características del aire, en densidad, se asignara el modelo de boussinesq, y la densidad de la temperatura a la que trabajemos, así mismo se deberá incluir el coeficiente de expansión térmico, adecuado.



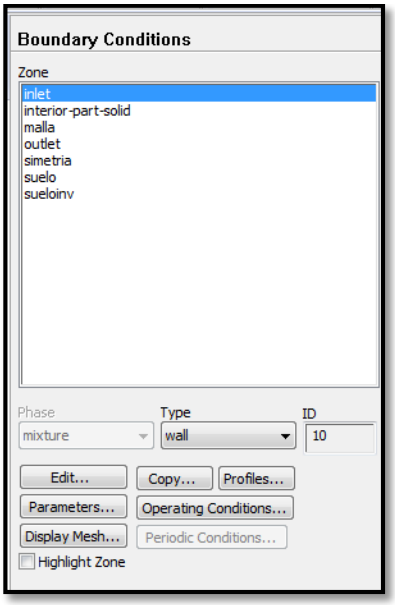


En lo que respecta al suelo se ingresaran los datos de densidad, calor específico y conductividad térmica.



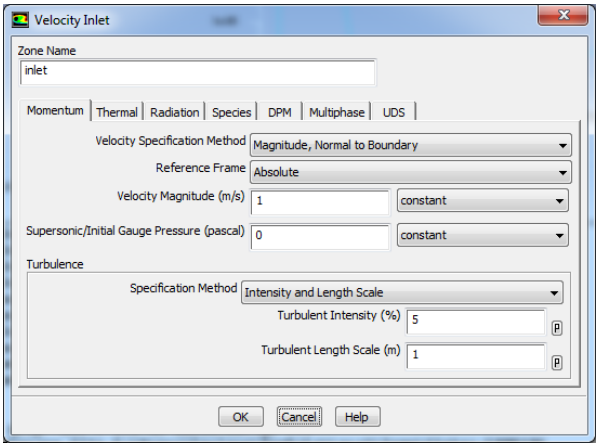
Condiciones de Frontera

Una vez nombradas todas las superficies del modelo se procede a cargar las especificaciones para cada una de ellas.

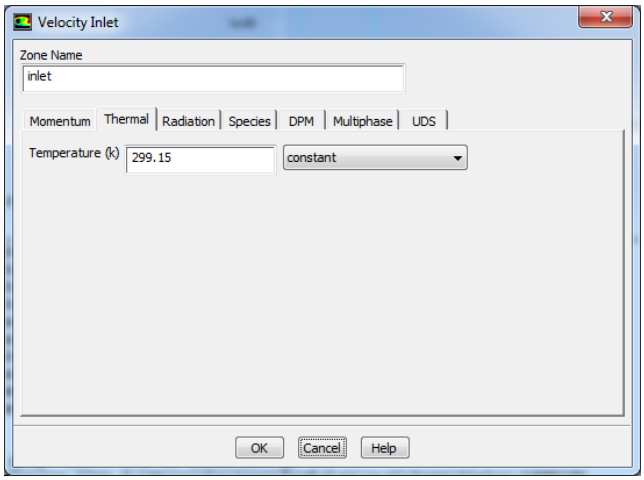


Inlet

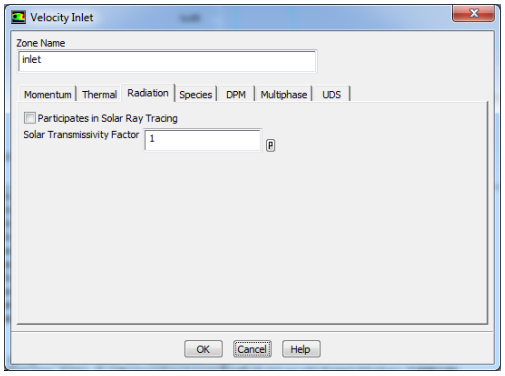
a) Se le carga la velocidad en m/s.



b) Se asigna la temperatura en grados Kelvin.

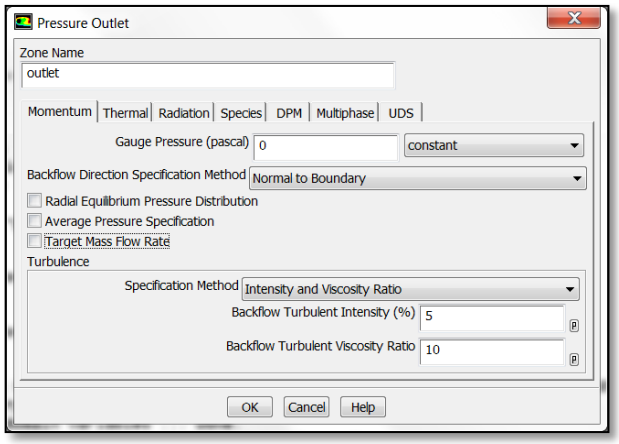


c) Se descarga la influencia en la radiación.

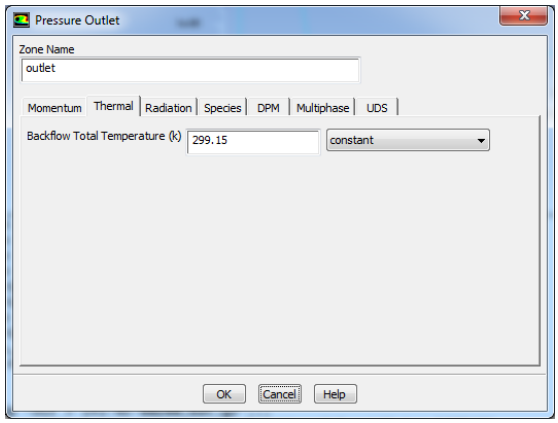


Outlet

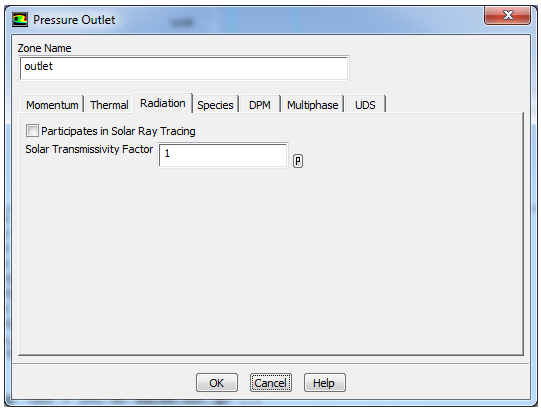
a) Se asigna la presión de salida de 0, para que el programa itere hasta encontrar una velocidad de salida.



b) Se asigna una temperatura de salida igual a la de entrada.

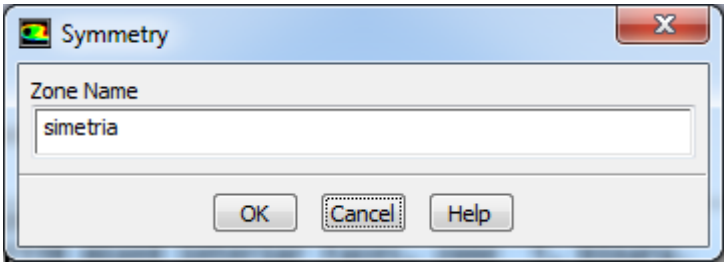


c) Se descarta la influencia en la radiación.



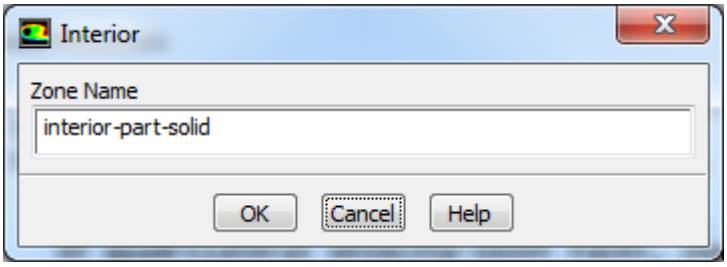
Simetría

Las paredes y techo del dominio se consideran como simetría, para simular que continúa esa condición.



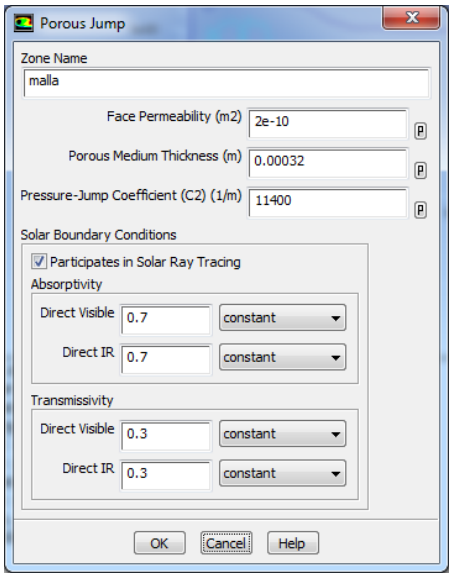
Interior

El fluido se designa como Interior.

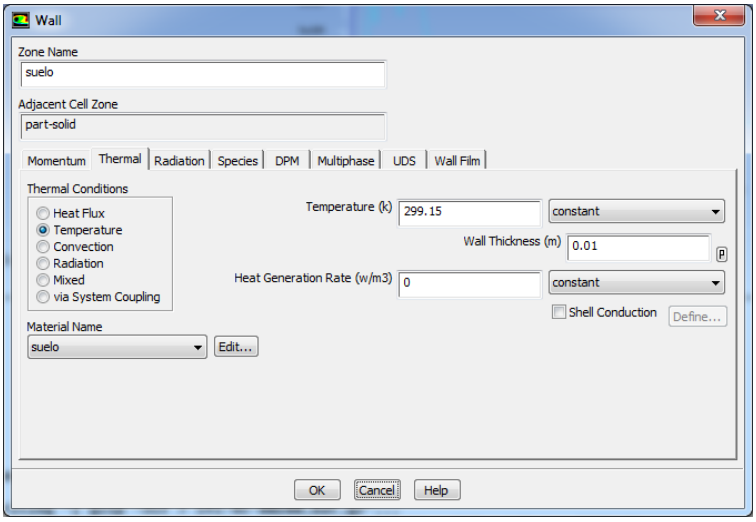


Materiales

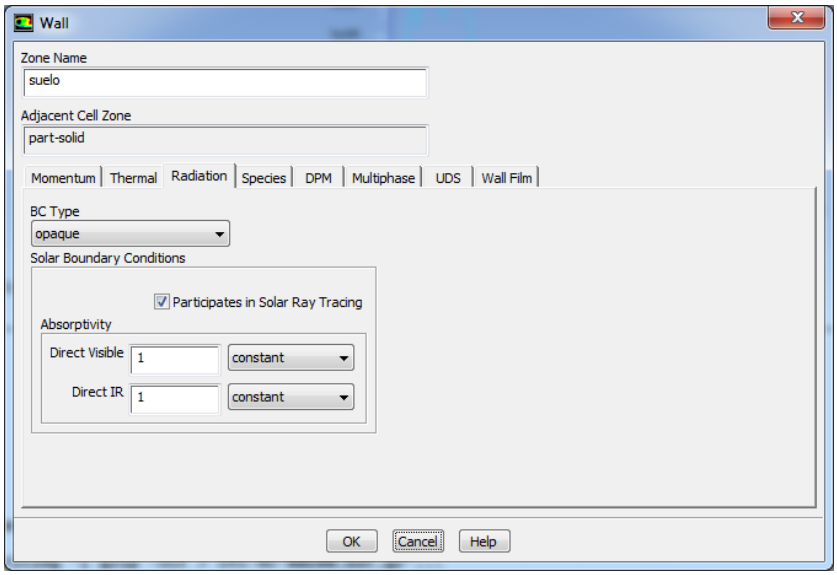
a) Se carga la malla anti-afido como un medio poroso, en el que se asignan los valores de permeabilidad, espesor y su coeficiente de presión. Al estar activado el modelo de radiación nos permitirá ingresar valores de absorción y transmisividad.



b) Las paredes de plástico, el techo, y el suelo se cargan como un Wall. En el que le asignaremos una temperatura, y el tipo de material que es.

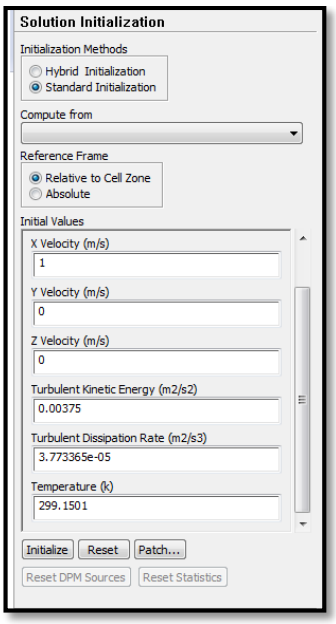


En lo que respecta a radiación, se considera como un cuerpo opaco, y podremos determinar la absorbencia de acuerdo al tipo de suelo.

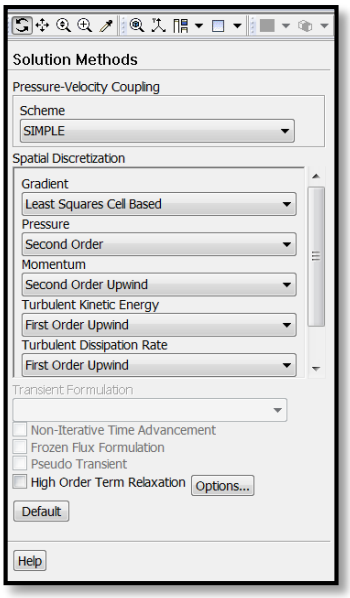


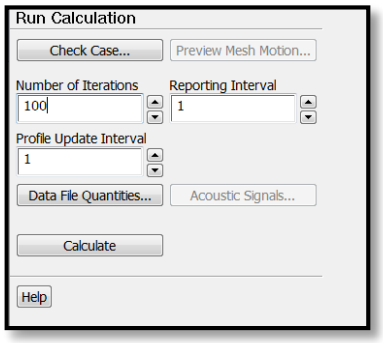
Inicialización

Se deberá generar valores iníciales para que el programa comience las iteración antes de ejecutar los cálculos. Podremos selecciona en este punto hasta por que superficie o zona queremos que empiece.

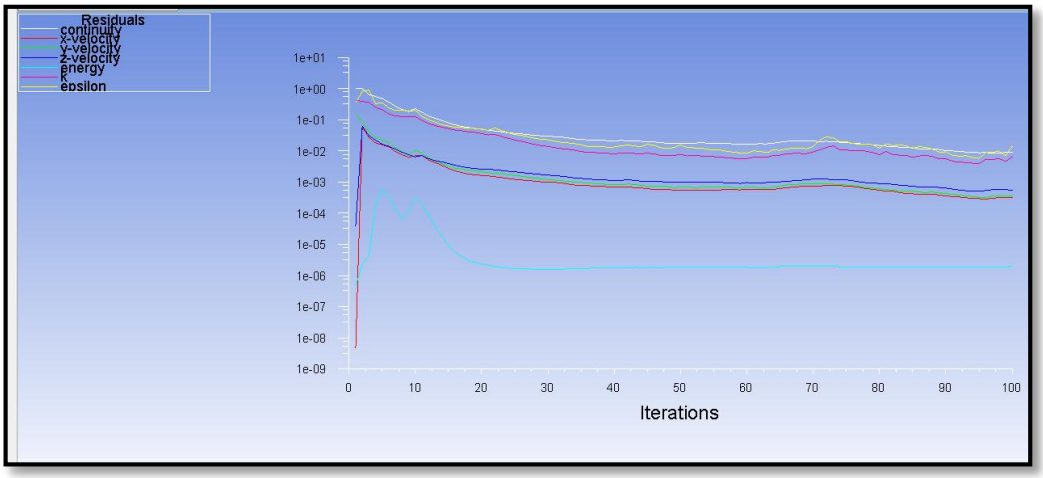


Una vez cargados todos los materiales asignamos el número de iteraciones, determinamos cada cuando queremos que nos reporte los avances y iniciamos la simulación.



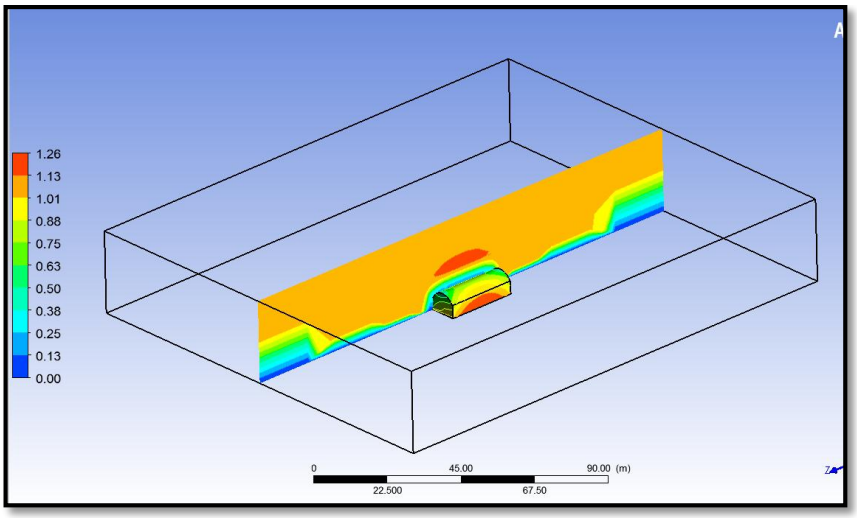
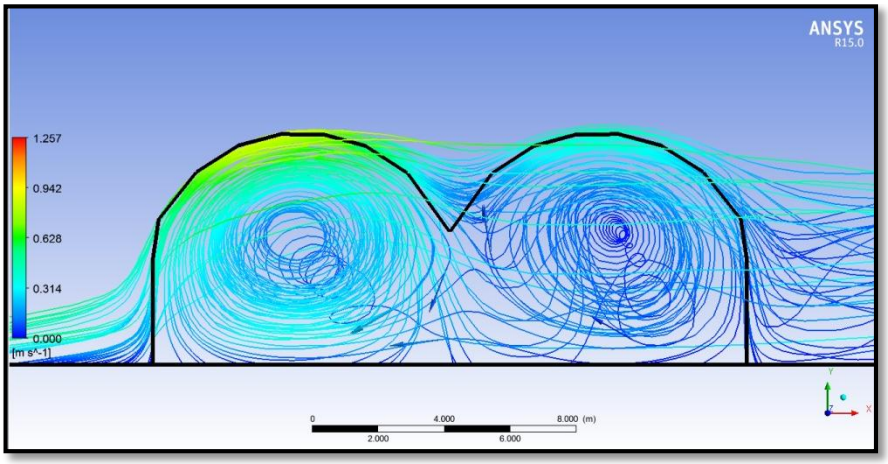


Si todo fue cargado correctamente la simulación continuara hasta llegar a la estabilidad.



RESULTADOS

La herramienta de resultados nos permitirá visualizar los datos obtenidos a partir de nuestra simulación. Para esto tiene la opción de incluir puntos, líneas, planos, volúmenes a los cuales se les podrá asignar un contorno que incluya los valores de temperatura, velocidad de viento, presión, etc.



También nos permitirá meter líneas de flujos, basados en los planos o superficies generadas y estos mismos nos permitirán hacer una visualización mediante videos.