UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DISEÑO DE UN SISTEMA DE CALEFACCIÓN SOLAR PARA INVERNADEROS SUSTENTABLES

TESIS DE GRADO

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

PRESENTA:

ING. JOSÉ HUMBERTO LÓPEZ DIAZ

DIRECTOR:

DR. EFRÉN FITZ RODRÍGUEZ

Chapingo, Estado de México, enero de 2019

DISEÑO DE UN SISTEMA DE CALEFACCIÓN SOLAR PARA INVERNADEROS SUSTENTABLES

Tesis realizada por José Humberto López Diaz bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA

DIRECTOR: _____

DR. EFRÉN FITZ RODRÍGUEZ

ASESOR: _____

DR. IRINEO L. LÓPEZ CRUZ

ASESOR: _____

DR. RAQUEL SALAZAR MORENO

DEDICATORIAS

A mí amada familia, “Lupita” y “Alancito” por todo el apoyo y su amor incondicional.

A mí querida madre, Victoria, que, por su amor y sabios consejos, me ha enseñado a superarme día a día y lograr mis metas.

A mis hermanos: Félix, Juan, Luis y Cristina, por su gran apoyo y motivación.

A todos mis compañeros de la generación por el apoyo y momentos vividos.

A los integrantes del *Laboratorio de Biosistemas* con los cuales he convivido durante los dos años de la maestría: Vicelis, Citlali, Regina, Ivan, Walver, Orbelín

Al profesor Jorge Torres del departamento de sociología rural por todo el apoyo y consejos que me ha brindado durante los últimos años.

A mi director de tesis, Dr. Fitz, por todo el apoyo y las facilidades brindadas para poder llevar a cabo este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACh) por el apoyo y servicios brindado para la realización de mis estudios licenciatura y de maestría.

Al programa de Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua de la UACh, por permitirme ser parte de su proyecto educativo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo de beca para la realización de mis estudios de maestría.

Al Dr. Efrén Fitz-Rodríguez por permitirme ser parte del equipo de trabajo del *Laboratorio de Biosistemas* y por incluirme en su proyecto de desarrollo de Invernaderos Sustentables para México. Por su paciencia y comprensión durante mis estudios, así como por sus valiosos consejos, conocimientos y palabras de motivación.

Al Dr. Irineo L. López-Cruz, por sus enseñanzas y siempre bien atinadas sugerencias en el proceso de revisión de la tesis.

A la Dr. Raquel Moreno-Salazar, por sus consejos, sugerencias y disponibilidad tanto en este trabajo como durante mi estancia en el posgrado.

A todos los profesores que han contribuido en mi formación académica en la UACh

A la Dirección General de Investigación y Posgrado (DGIP) de la UACh, por el financiamiento otorgado bajo la modalidad de Proyecto Convencional (#18175-C65) y Proyecto Estratégico Institucional (#18013-EI).

DATOS BIOGRÁFICOS DEL AUTOR

El autor del presente trabajo, José Humberto López-Diaz nació en San Andrés Larráinzar, Chiapas, México, el 25 de marzo de 1992. Realizó sus estudios de primaria en la escuela Benito Juárez García, ubicada en la zona centro de Larráinzar. Cursó sus estudios de secundaria en la Escuela Secundaria Técnica No. 57 en el mismo municipio.

En el 2008 ingresa a la Preparatoria Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo, donde culmina exitosamente sus estudios de nivel medio superior. Del 2011 al 2015 cursa la carrera de Ingeniería Mecánica Agrícola en la misma Universidad. De manera conjunta con el Ing. Eric Suarez Gaona, realiza la tesis titulada: *Diseño y construcción de un cabezal cosechador para el cultivo de higuerilla*, trabajo que se presentó en 2016.

En agosto del 2016 ingresa al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso integral del Agua de la UACh, y durante el periodo de estudios de maestría presenta los siguientes trabajos:1) *Propiedades físico-mecánicas de la planta de higuerilla relacionadas con el diseño de cosechadoras*, 2) *Simulación de la temperatura del aire interior de un invernadero usando Matlab-Simulink*, 3) *Calentadores solares con tubos de vacío: alternativa sustentable en la producción de cultivos en invernaderos y 4) Evaluation of heat-pipe solar collectors for heating a single-span greenhouse,* presentados en congresos nacionales e internacionales.

A principio de 2019 presenta el presente trabajo de tesis "*Diseño de un sistema de calefacción solar para invernaderos sustentables*" para obtener el grado de Maestro en Ingeniería.

Contenido

ÍNDICE DE CUADROS ……viii

ÍNDICE DE FIGURAS ……ix

NOMENCLATURA ……xi

RESUMEN ……xii

ABSTRACT ……xiii

CAPÍTULO 1 . INTRODUCCIÓN GENERAL 1

1.1 Objetivo general..... 4

1.2 Objetivos particulares 4

1.3 Estructura de la tesis 5

1.4 Planteamiento del problema 5

1.5 Literatura citada..... 6

CAPÍTULO 2 . REVISIÓN DE LITERATURA..... 10

2.1 Efecto de las temperaturas bajas sobre el cultivo..... 10

2.2 Sistemas de calefacción en invernaderos 12

2.3 Combustibles tradicionales y alternos usados en los quemadores de los sistemas de calefacción..... 16

2.4 Aplicación de energías renovables en la agricultura protegida 17

2.5 Literatura citada..... 21

CAPÍTULO 3. EVALUACIÓN DE CALENTADORES SOLARES CON TECNOLOGÍA *HEAT-PIPE* EN CALEFACCIÓN DE INVERNADEROS..... 24

3.1 Resumen 24

3.2 Introducción..... 25

3.3. Materiales y métodos..... 28

3.4 Resultados y discusión..... 35

3.5 Conclusión..... 41

3.6 Literatura citada..... 42

CAPÍTULO 4 . DISEÑO Y EVALUACION DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN HIDRÓNICO POR SUELO RADIANTE 44

4.1 Resumen 44

4.2 Introducción..... 44

4.3. Materiales y métodos 46
4.4 Resultados y discusión 54
4.5. Conclusión 59
4.6. Literatura citada 61

CAPÍTULO 5 . ANÁLISIS CFD DEL AMBIENTE NOCTURNO DE UN INVERNADERO CON SISTEMA DE CALEFACCIÓN DE PISO RADIANTE 62
5.1 Resumen 62
5.2 Introducción 63
5.3 Materiales y métodos 64
4.4 Resultados y discusión 72
4.5 Conclusión 76
4.6 Literatura citada 77

CAPÍTULO 6 . CONCLUSIONES GENERALES Y DISCUSIÓN 78

ÍNDICE DE CUADROS

CAPÍTULO 2

Cuadro 2.1. Temperaturas mínimas, óptimas y máximas para algunos cultivos hortícolas. 11
Cuadro 2.2. Ventajas y desventajas de los combustibles usados en los sistemas de calefacción. 16
Cuadro 2.3. Costo de diferentes combustibles usados en los sistemas de calefacción 17
Cuadro 2.4. Fuentes de energía renovable usadas en la agricultura. 18
Cuadro 2.5. Aplicaciones de la energía solar en la agricultura 19

CAPÍTULO 3

Cuadro 3.1. Resumen de tipos de colectores solares domésticos e industriales. 27
Cuadro 3.2. Especificaciones técnicas de los tubos del colector Sunnergy SEI-HP-30-1500/47 28
Cuadro 3.3. Sensores usados en la estación meteorológica 31

CAPÍTULO 4

Cuadro 4.1. Materiales comunes usados para conducir agua caliente con fines de calefacción. 46
Cuadro 4.2. Valores de U en función de la velocidad del viento 47
Cuadro 4.3. Datos necesarios para el cálculo de necesidades de calefacción 49
Cuadro 4.4. Pérdidas de calor por transmisión 50

CAPÍTULO 5

Cuadro 5.1. Parámetros seleccionados para el mallado del modelo 3D 68
Cuadro 5.2. Propiedades de los materiales del invernadero usado para la simulación. 70

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 3

Figura 3.1. Estructura de un calentador solar con tubos heat-pipe..... 27
Figura 3.2 Sistema de calefacción de agua. 1-módulo de colectores solares, 2- depósito de 10 m3 y 3- bomba de recirculación de 145 W..... 29
Figura 3.3. Módulo de calefacción solar de agua instalado en el Centro demostrativos de Energias Alternativas y de Biosistemas de la UACh 30
Figura 3.4. Ubicación de los sensores PT100 (C1, C2, C4, C8 y T1-T2, y T3). 30
Figura 3.5. Representación de los grados-hora. Las áreas sombreadas representan las necesidades de calefacción. Datos experimentales de Chapingo, Estado de México..... 34
Figura 3.6. Temperatura del agua a la salida de los colectores 1 (C1), 2 (C2), 4 (C4) y 8 (C8). INLET es la temperatura en la entrada del módulo, Ta es la temperatura del ambiente y SR la radiación solar global incidente. .. 35
Figura 3.7. Eficiencia horaria de los colectores 1 y 2..... 36
Figura 3.8. Eficiencia horaria de colectores en pares 36
Figura 3.9. Eficiencia horaria los primeros cuatro colectores (C1 al C4) vs los últimos cuatro (C5 al C8) y eficiencia global del módulo solar (C1-C8). 37
Figura 3.10. Eficiencia horaria de uno, tres y siete calentadores en serie. a) febrero y b) mayo 38
Figura 3.11. Eficiencia horaria de los colectores en los meses de noviembre (a) y diciembre (b), 2018. 39
Figura 3.12. Eficiencia horaria de los colectores..... 40
Figura 3.13. Energía captada en los primeros nueve días de diciembre, 2018 40

CAPÍTULO 4

Figura 4.1. Suelo radiante..... 45
Figura 4.2. Ubicación de los sensores de temperatura en el suelo..... 51

Figura 4.3. Perfil vertical de la ubicación de la tubería en el suelo del invernadero 52
Figura 4.4. Configuración de la tubería en el suelo, paralelo o en forma de bucle..... 53
Figura 4.5. Red de tubería instalada en el invernadero 54
Figura 4.6. Temperatura de la noche más fría de: a) febrero, marzo, abril y mayo; b) junio, julio, agosto y septiembre, 2018 55
Figura 4.7. Temperatura del aire interior durante las noches más frías de: octubre, noviembre y diciembre, 2018. 56
Figura 4.8. Temperatura del agua en la tubería. 57
Figura 4.9. Caída de temperatura en las secciones 1 (S1) y 2 (S2) 57
Figura 4.10. Variación de la temperatura del suelo durante la noche con el sistema de calefacción en operación. 58
Figura 4.11. Comportamiento de la temperatura interior con el sistema de calefacción en operación. 59

CAPÍTULO 5

Figura 5.1. Invernadero mono-bahía, donde se tomaron los datos experimentales y se realizaron las simulaciones. 65
Figura 5.2. Modelo 3D del invernadero. A) Vista isométrica. B) Sección transversal. 66
Figura 5.3. Dominio circundante del modelo 3D 66
Figura 5.4. Mallado del modelo en ANSYS 67
Figura 5.5. Resultado del mallado. 68
Figura 5.6. Comportamiento de los residuos para 1000 iteraciones 72
Figura 5.7. Inversión térmica en invernaderos de polietileno. 73
Figura 5.8. Efecto del suelo radiante cuando la temperatura del aire exterior es de – 3 °C. Sección transversal del invernadero. 74
Figura 5.9. Efecto del suelo radiante cuando la temperatura del aire exteriores es de 3°C. Sección transversal. 74
Figura 5.10. Efecto del suelo radiante cuando la temperatura del aire exterior es de 10 °C 75

NOMENCLATURA

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	UNIDADES
A	Área total de la cubierta del invernadero	m^2
A_P	Área superficial del piso/suelo	m^2
CF	Calor específico del agua	$J \cdot kg^{-1} \cdot °C^{-1}$
D	Diámetro exterior del tubo	mm
ETC	Colectores solare de tubos de vacío	-
GB_T	Radiación incidente sobre superficies planas	$W \cdot m^{-2}$
GB	Radiación sobre una superficie horizontal	$W \cdot m^{-2}$
H	Profundidad de la tubería respecto la superficie del suelo	mm
HDH	Horas de grados-calor	°C
I_T	Radiación incidente	$W \cdot m^{-2}$
K_S	Conductividad térmica del suelo	$W \cdot m^{-1} K^{-1}$
L	Longitud de la tubería	m
$\dot{m}_w$	Tasa de flujo de agua	$kg \cdot s^{-1}$
N	Numero de tubos (subterráneos)	-
η_e	Eficiencia del captador solar	adim
ρ_w	Densidad del agua	$kg \cdot m^{-3}$
Q	Energía necesaria para calefacción	J
Q_T	Cantidad de energía necesaria para calefacción en una noche	J
$\dot{Q}_u$	Energía colectada	J
RB	Factor de radicación de un cuerpo inclinado	adim
TF	Temperatura del agua en cualquier instante	°C
TFO	Temperatura final del agua	°C
TFI	Temperatura inicial del agua	°C
TIW	Temperatura del agua a la entrada de la red de tuberías	°C
TI	Temperatura del aire interior del invernadero	°C
T_M	Logaritmo de la diferencia de temperaturas	adim
TP	Temperatura del suelo	°C
TPS	Temperatura promedio de las superficies no calentada dentro del invernadero	°C
TSP	Temperatura de set-point	°C
$TOUT$	Temperatura del aire exterior	°C
TOW	Temperatura del agua a la salida de la red de tuberías	°C
$\dot{V}_w$	Flujo volumétrico del agua	$L \cdot s^{-1}$

RESUMEN GENERAL

Diseño de un sistema de calefacción solar para invernaderos sustentables

Aun cuando las condiciones climáticas de la región central de México son aparentemente adecuadas para la producción de cultivos en invernaderos pasivos, de acuerdo a los promedios diarios de temperatura del aire (11 a 18 °C) durante todas las estaciones del año; las temperaturas mínimas diarias pueden alcanzar valores inferiores a los 5 °C y 10 °C en invierno y verano, respectivamente. Esto no es adecuado para los cultivos y limita su establecimiento para ciclos de producción durante todo el año. En este sentido, se propone un sistema de calefacción sustentable basado en energía solar, para mejorar las condiciones ambientales durante el periodo nocturno en un invernadero mono-bahía de 300 m^2 ubicado en Chapingo, Estado de México. El sistema de calefacción solar incluye: a) módulos de colectores solares con tubos de vacío con tecnología "*heat-pipe*" para calentar agua durante el día, b) un tanque de almacenamiento de 10 m^3 con aislamiento térmico para almacenar la energía, c) bombas de recirculación y distribución de agua caliente, y d) un piso radiante que consta de una red de tuberías, enterrada a 10 cm de profundidad, de polietileno por donde circula el agua caliente. Se realizaron simulaciones numéricas en estado estacionario, mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), para estimar los perfiles verticales de temperatura del aire interior en condiciones de bajas temperaturas, asumiendo el sistema de calefacción en operación. Con este sistema se alcanzaron saltos térmicos de 5 °C, en comparación con la temperatura exterior de 0 °C. Los resultados de las simulaciones se evaluaron con datos experimentales, con los cuales se establecieron condiciones de frontera. La eficiencia del módulo solar resultó de 60 %, cuando se tiene un flujo volumétrico de 2.65 $L \cdot min^{-1}$, un ángulo de 29 grados de inclinación y en condiciones de invierno.

Palabras clave: Almacenamiento de energía, energía renovable, colectores solares, dinámica de fluidos computacional, sistema hidrónico.

Tesis de Maestría en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo

Autor: José Humberto López-Díaz

Director de Tesis: Efrén Fítz-Rodríguez

GENERAL ABSTRACT

Design of a solar heating system for sustainable greenhouses

Even though climate conditions in the central region of Mexico are adequate for crop production in passive greenhouses, since daily-averages of air temperature (11 to 18°C) for all seasons; the daily minimum air temperatures could reach values lower than 5 °C and 10 °C, in winter and summer, respectively. This is not adequate for crops and limits their production for year-round cycles. In this sense, a sustainable heating system based on solar energy is proposed to improve the environmental conditions during night-time, in a single-span, 300 m^2, greenhouse located at Chapingo, State of México. The solar heating system includes: a) modules of solar collectors with vacuum tubes including heat-pipe technology for heating water during daytime, b) a storage tank of 10 m^3 with thermal insulation for storing energy, c) hot water recirculating and distribution pumps, and d) a radian floor which includes a 10 cm depth polyethylene network-pipe, where hot water is recirculated. Steady-state numerical simulations were performed, by means of Computational Fluid Dynamics (CFD), in order to estimate vertical air temperature profiles at the interior in low temperature conditions, assuming the heating systems is operating. With this system thermal jumps of 5 °C were reached, in comparison with the outside temperatures of 0 °C. Results from the simulations were evaluated against experimental data, which were used to stablish boundary conditions. The efficiency of the solar module resulted in 60 %, with a 2.65 $L \cdot min^{-1}$ volumetric flow, an inclination angle of 29 degrees and under winter conditions.

Keywords: Energy storage, renewable energy, solar collectors, computational fluid dynamics, hydronic system.

Thesis, Universidad Autónoma Chapingo
Author: José Humberto López-Díaz

Advisor: Efrén Fítz-Rodríguez

CAPÍTULO 1 . INTRODUCCIÓN GENERAL

El microclima de un invernadero depende de las interacciones entre los componentes internos, incluyendo: el equipamiento, piso, cubierta y el cultivo, y las condiciones del clima exterior, representado por variables como la temperatura del aire, contenido de humedad, la radiación solar y la velocidad del viento (Bargach, Dahman y Boukallouch, 1999).

Hasta el 2016, en México existían alrededor de 25000 hectáreas bajo agricultura protegida de las cuales el 66 % correspondían a invernaderos (SAGARPA, 2016), predomínate los de cubierta de polietileno (94 %), 3 ó 4 % de cristal y 2 % de otro tipo de material, como el policarbonato.

En invernaderos con cubiertas de polietileno las pérdidas de calor por radiación infrarroja son elevadas durante las noches, así como las pérdidas por convección y conducción (Iriarte, García y Saravia, 2001) debido a que el polietileno simple tiene un mayor coeficiente global de pérdidas (6 – 8 $Wm^{-2}°C^{-1}$) en comparación de otros materiales. Esto resulta en uno de los principales problemas para los invernaderos con este tipo de cubiertas y que están ubicados en climas templados, donde las bajas temperaturas durante las noches invernales representan un riesgo para los cultivos (Rouboa y Montero, 2007).

Las bajas temperaturas en las regiones templadas representan un riesgo de daños significativos en los cultivos, y esto ocurre con mayor frecuencia en invernaderos sin sistemas de calefacción. Para cumplir con el propósito fundamental de un invernadero, maximizar la producción en condiciones desfavorables, se requiere mantener las condiciones del microclima lo más cercano al optimo, por lo que, un control preciso sobre los factores como humedad y temperatura del aire resulta indispensable (Albright, 1991). Para controlar el ambiente aéreo, se implementan sistemas de calefacción, ventilación y enfriamiento para obtener temperaturas y contenidos de humedad adecuados en el interior del invernadero.

Para maximizar la producción y calidad del cultivo, la calefacción en un invernadero es esencial, principalmente en regiones con clima templado.

Los sistemas de calefacción comúnmente incluyen calentadores de aire, y agua. Esta última se distribuye en una red de tuberías (ya sea como vapor o agua caliente) y calentadores unitarios por convección forzada o radiación. Estos sistemas generalmente utilizan algún tipo de combustible fósil (diésel, gas LP, gas natural, keroseno, diésel), carbón, astillas de madera, troncos, residuos agrícolas, entre otros (Hassanien et al., 2016).

Sin embargo, dado el aumento constante del precio de los combustibles y de la disminución de las reservas, así como el impacto ambiental negativo que producen, a nivel mundial se ha desarrollado el interés por implementar nuevas técnicas para la conservación y para el uso de fuentes de energías alternativas (Both et al., 2007). Por otro lado, la implementación de políticas en muchos países, con el propósito de reducir las emisiones de dióxido de carbono, ha obligado a un uso eficiente de los combustibles, así como la implementación de energías renovables (Hepbasli, 2011).

El uso de la energía en la agricultura también es una preocupación mundial, dado el alto consumo de energía utilizada en la producción, procesamiento y distribución de productos agrícolas (Chel y Kaushik, 2010; Hepbasli, 2011; Salazar-Moreno et al., 2012). En la agricultura varias fuentes de energía, incluyendo: eólica, hidráulica, biomasa, desechos orgánicos y biocombustibles, proporcionan una solución simple, sostenible y eficaz ante los problemas antes mencionados. Tan solo la energía solar (fotovoltaica y térmica) puede ofrecer una solución en gran proporción a los problemas energéticos actuales (Chel, 2010), por ejemplo, el uso de la energía solar en los sectores agrícolas e industriales ha aumentado considerablemente en las últimas décadas (Sethi y Sharma, 2008; Hassanien et al., 2016). De acuerdo con datos de la IEA (2016) la producción de electricidad a nivel mundial mediante paneles solares y energía térmica pasó de 66,031 a 338,512 GWh de 2011 a 2016.

Desde hace tres décadas, diversas investigaciones han demostrado resultados exitosos en el uso de energías renovables en invernaderos tal como en los sistemas de calefacción y refrigeración (Yildiz et al, 2012 y Hassanien, 2016). Por mencionar algunos, Mears (1981) reporta el diseño de

un sistema de calefacción solar para una residencia integrado con un invernadero para plantas de interior, este sistema se respaldó de una estufa de madera para minimizar el uso de combustibles derivados del petróleo. von Zabeltitz (1986) usó la energía solar para calefacción de invernaderos ubicados en Alemania y países mediterráneos, la cantidad de energía solar almacenada representó el 12 – 25% del requerimiento anual de calefacción para las condiciones de Alemania mientras en los países del sur, la energía solar cubrió entre el 60 – 80% del requerimiento anual. Grafiadellis (1986) reporta el diseño y construcción de un sistema solar pasivo para calefacción de invernaderos que básicamente se trata de tubos de plástico llenos de agua y colocados en el suelo entre los surcos, estos tubos de agua almacenan energía solar durante el día. De igual manera, Santamouris et al. (1994) hace una recopilación de las tecnologías disponibles para calefacción solar, enfocándose en los sistemas pasivos. Lazaar et al. (2004) usaron intercambiadores capilares de polipropileno suspendidos y enterrados en el invernadero. Los primeros recuperan el exceso de energía durante el día, esta energía es almacenada en los intercambiadores enterrados y durante la noche se librera la energía térmica guardada.

En los últimos años se siguen reportando los resultados de trabajos en donde se usa la energía solar con fines de calefacción, tal como, Xu et al. (2014) informan sobre el rendimiento de un invernadero de 2 304 m^2 calentado con energía solar. El sistema utiliza 4 970 m^3 de subsuelo para almacenar la energía térmica capturada por 500 m^2 de colectores solares. Joudi y Farhan, (2014) investigaron experimentalmente un sistema de calentador de aire solar (SAH), combinando un invernadero tradicional y un banco de calentadores solares de aire, en el techo como estructura; esta disposición no afectó la penetración de radiación solar. Attar y Farhat, (2015) trabajaron en la determinación de la eficiencia de un sistema de calefacción solar, durante el periodo más frio en Borj Cedria, Tunisia; el sistema se compone de un colector solar plano, un tanque de almacenamiento y bombas de recirculación. En los resultados reportan una eficiencia del 64.9% en diciembre para un invernadero de 10 m^3. Para comprender el progreso actual de las tecnologías

más relevantes, Ge et al. (2017) presenta un resumen acerca de la situación actual y futuros desarrollos de la calefacción y enfriamiento solar.

Otras fuentes energéticas importantes para proporcionar el calor necesario en los invernaderos a parte de la energía solar son: geotérmica y biomasa (Vourdoubas, 2015).

De acuerdo con Kumari et al. (2003), la fuente de energía que recibe una consideración más seria para fines de calefacción en invernaderos, es la energía solar. Siendo México un buen candidato para su implementación, dada sus condiciones climáticas y por la disponibilidad de irradiación solar, por su ubicación geográfica. El territorio total de México se encuentra entre las latitudes 14° y 33° N y las longitudes 86° y 119° W, por lo que es uno de los pocos países que están 100 % dentro del cinturón solar. De esta manera, la radiación diaria en el país oscila entre los 4.4 $kWhm^{-2}$ y 6.3 $kWhm^{-2}$ lo cual ayuda a que la implementación de tecnologías que funcionan a base de energía solar sea altamente factible (Romero-Hernández et al., 2012).

En este sentido, el presente trabajo se enfoca en una evaluación experimental del potencial de la energía solar para la calefacción de invernaderos, ubicados en la zona central de México, derivándose así los siguientes objetivos:

1.1 Objetivo general

Diseñar, construir y evaluar un sistema de calefacción solar para invernaderos ubicados en regiones templadas de México.

1.2 Objetivos particulares

- Determinar los requerimientos energéticos del invernadero en la región central de México.
- Instrumentar el sistema de calefacción para su monitoreo y evaluación.
- Determinar la eficiencia de los calentadores solares con tecnología *heat-pipe*.

- Simular con Dinámica de Fluidos Computacional el clima interior del invernadero bajo la operación del sistema de calefacción.

1.3 Estructura de la tesis

Este trabajo está estructurado en seis capítulos, en los cuales se incluyen:

1) introducción general y planteamiento del problema,

2) revisión del estado del arte de los sistemas sustentables de calefacción en invernaderos y en particular los sistemas solares,

3) diseño del sistema de calefacción hidrónica por suelo radiante,

4) evaluación de calentadores solares con tecnología “heat-pipe”,

5) análisis CFD del sistema de calefacción con piso radiante en un invernadero de 300 m^2, y

6) conclusiones generales sobre el sistema de calefacción, las energías limpias, así como acerca de la simulación numérica mediante CFD.

1.4 Planteamiento del problema

A nivel mundial los grandes retos de la agricultura tienen implicaciones desde la seguridad alimentaria hasta la seguridad hídrica y la reducción del uso de energías fósiles (Flores, 2016). En el contexto nacional, México atiende algunos o ninguno de esos indicadores, esto impide lograr un impacto en el sector agrícola en cuanto a incremento en el rendimiento de los cultivos, reducción de costos económicos y ambientales. Un punto a favor para México es el aumento de la superficie de agricultura protegida en los últimos años, desde el 2009 ha tenido un crecimiento del 11% anual en promedio (AMHPAC, 2017). Si bien el territorio nacional presenta una gran diversidad de condiciones climáticas apropiadas para la instalación de diferentes tecnologías y estructuras para la protección de cultivo, la obtención de productos agrícolas de calidad durante todo el año no ha sido posible o es poco rentable a pesar de que la necesidad de energética es menor comparada con los países nórdicos. Dependiendo de las condiciones climáticas, la

energía representa el mayor porcentaje de los costos de producción en cultivos de invernadero (Hassanien, Li, Lin, 2015). Este costo se eleva más cuando el invernadero cuenta con algún sistema de calefacción, dado que los precios actuales de los combustibles fósiles son elevados y están en constante aumento (y muy particular en México). Por lo que es necesario desarrollar nuevas estrategias para superar los desafíos planteados anteriormente, la introducción de energías renovables en los procesos agrícolas es una opción. Hoy en día, existe una tendencia muy fuerte en el uso de energías renovables en las instalaciones agrícolas, de tal manera que es posible implementar tecnologías que aprovechen las condiciones climáticas del lugar con la finalidad de aumentar la eficiencia energética en la producción bajo invernadero, reduciendo los costos de producción y asegurando la producción durante los meses más fríos.

De esta manera se plantea, evaluar el uso de la energía solar en la calefacción de invernaderos. Esto implica la captación de energía solar y su almacenamiento en forma de calor, durante el día, y su distribución al interior del invernadero durante la noche (bajas temperaturas). El sistema implementado en el invernadero incluye un sistema de calefacción hidrónico (por agua caliente). Este sistema se ha empleado en diferentes proyectos, ya que son muy eficientes y la distribución de temperatura es uniforme en comparación con otros sistemas de calefacción.

1.5 Literatura citada

Albright LD. (1991). Production solar greenhouses. In: Parker BF, editor. Solar energy in agriculture. New York: Elsevier, 1991.

AMHPAC (Asociación Mexicana de Horticultura Protegida). http://www.amhpac.org/es/ consultado el 20/10/2018

Arinze, E.; Schoenau, G. y Besant, R. (1985). Thermal performance evaluation of active and passive water heat-storage schemes for solar energy applications. Energy 10(11): 1215-1223. DOI: 10.1016/0360-5442(85)90038-6

Attar, I.; Naili, N., Khalifa, N., Hazami, M. y Farhat, A. (2013). Parametric and numerical study of a solar system for heating a greenhouse equipped

with a buried exchanger. Energy Conversion and Management 70: 163–173. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.02.017

Attar, I. y Farhat, A. (2015). Efficiency evaluation of a solar heating system applied to the greenhouse climate. Solar Energy 119: 212–224. DOI: 1016/j.solener.2015.06.040

Chel, A. y Kaushik, G. (2010). Renewable energy for sustainable agriculture. Agron. Sustain. Dev. 31:91-118. DOI: 10.1051/agro/2010029

Bargach, M.N., Dahman, A.S. y Boukallouch, M. (1999). A heating system using flat plat collectors to improve the inside greenhouse microclimate in Morocco. Renewable Energy Vol.18: 367-381. DOI: 10.1016/S0960-1481(98)00803-9

Bot, G. (2003). The solar greenhouse; technology for low energy consumption. Acta Hort 611. DOI: 10.17660/ActaHortic.2004.633.2

Bot G.; Van de Braak, N.; Challa, H.; Hemming, S.; Rieswijk, T.; van Straten, G. y Verlodt, I. (2005). The solar greenhouse: state of the art in energy saving and sustainable energy supply. Acta Hortic; 691:501–8. DOI: 10.17660/ActaHortic.2005.691.59

Both, A.; Mears, D.; Manning, T.; Reiss, E. y Ling, P. (2007). Evaluation energy saving strategies using heat pumps and energy storage for greenhouses. ASABE Meeting. Paper 074011.

García, J.L., De la Plaza, S., Navas, L.M., Benavente, M. y Luna, L. (1998). Evaluation of the feasibility of alternative energy sources for greenhouse heating. J. agric. Engng. Res. 69(2): 107-114 DOI:107-114. 10.1006/jaer.1997.0228

Granfiadellis, M. (1986). Development of a passive solar for heating grenhouses. Agricultural Research Center of Northern Greece. Acta Horticulturae, 191.

Ge, T.; Wang, R.; Xu, Z.; Pan, Q.; Du, S.; Chen, X.; Ma, T.; Wu, X.; Sun, X. y Chen, J. (2018). Solar heating and cooling: Present and future development. Renewable Energy 126:1126-1140. DOI: 10.1016/j.renene.2017.06.081

Hassanien, R.H.E., Li, M. y Lin, W.D. (2016). Advanced applications of solar energy in agricultural greenhouses Renew. Sust. Energy Rev. 54: 989-1001. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.095

Hepbasli, A. (2011). A comparative investigation of various greenhouse heating options using exergy analysis method. Energy 88: 4411–4423. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.05.022

IDEA (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía). (2008). Ahorro y Eficiencia energética en invernaderos. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Madrid. 66 pp.

International Energy Agency (IEA). (2016). https://www.iea.org/

Iriarte, A.; García, V. y Saravia, L. (2001). Modelo para la predicción de perdidas nocturnas y necesidades de calefacción de invernaderos. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 5: 02.55-60.

Joudi, K. y Farhan, A. (2014). Greenhouse heating by solar air heaters on the roof. Renewable Energy 72: 406 – 414. DOI: 10.1016/j.renene.2014.07.025

Kumari, N.; Tiwari, G., Sodha, M. (2003). Modelling of a greenhouse with integrated solar collector for thermal heating. International Journal of Ambient Energy 27 (30), 125–136. DOI: 10.1080/01430750.2006.9675012

Lazaar, M.; Kooli, S.; Hazami, M.; Farhat, A. and Belghith, A. (2004). Use of solar energy for agricultural greenhouse autonomous conditioning. Dasalination 168: 169 – 175. DOI: 10.1016/j .desal.2004.06.183

Mears, D.R. (1981). Solar heated home using an attached greenhouse and a woodburning stove. NAR-ASAE Meeting. Paper no. NAR-81-212.

Photiades, I. (1994). Heating plastic greenhouse with a solar passive water-sleeve system. Agricultural Res. Inst., Nicosia (Cyprus). http://www.ari.gov.cy/

Katsoulas, N., Kittas, C., Fidaros, D., Bartzanas, T. y Baxevanou, K. (2011). Study of a Passive Solar Heating Greenhouse Crop Grow Gutter. Acta Hort. 893: 381-388 DOI: 10.17660/ActaHortic.2011.893.35

Salazar-Moreno, R., Cruz-Meza, P. y Rojano-Aguilar, A. (2012). Eficiencia en el uso de la energía en invernaderos mexicanos. Revista Mexicana de Ciencias Agricolas. 4:736-742.

Santamouris, M.; Balaras, C.; Dascalaki, E. y Vallindras, M. (1994). Passive solar agricultural greenhouses: a worldwide classification and evaluation of technologies and systems used for heating purposes. Solar Energy 53(5): 411-426.

Sethi, V.P. y Sharma, S.K. (2008). Survey and evaluation of heating technologies for worldwide agricultural greenhouse applications. Solar Energy 82 (2008) 832–859. DOI: 10.1016/j.solener.2008.02.010

Sujata, N. y Tiwari, G.N. (2010). Energy metrics of photovoltaic/ thermal and earth air heat exchanger integrated greenhouse for different climatic conditions of India. Applied Energy 87: 2984–2993. DOI: 10.1016/j.apenergy.2010.04.010

Susheela, N. y Sharp, M. (2001). Heat pipe augmented passive solar system for heating of buildings. Journal of energy engineering. J. Energy Eng. 127:18-36. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9402(2001)127:1(18)

Teitel, M., Segal, I., Shklyar, A. y Barak, M. (1999). A comparison between pipe and air heating methods for greenhouses. .J. Agric. Engng Res. 72, 259-273. DOI: 10.1006/jaer.1998.0370

Reiss, E., Mears, D.; Manning, T.; Wulster, G. y Both, A. (2007). Numercial modeling of greenhouse floor heating. Transactions of the ASABE. Vol. 50(1): 275−284.

Roberts, W.J. y Mears, D.R. (1980). Floor heating of greenhouses. ASAE 1980. Paper no. 80-4027.

Romero-Hernández, S., Rodríguez-Granada, B.D., Romero-Hernández, O., Wood, D. 2012. Solar Energy Potential in Mexico's northern border states. Woodrow Wilson International Center for Scholars. 30 pp.

Rouboa A, Monteiro E (2007). Computational Fluid Dynamics analysis of greenhouse microclimates by heated underground tubes. J. Mech. Sci. Tech. 21(12): 2196 - 2204.

von-Zabeltitz, C. (1986). Greenhouse heating with solar energy. Energy in Agriculture, 5: 111-120.

Vourdoubas, J. (2015). Overview of heating greenhouses with renewable energy sources a case study in Crete-Greece. Journal of Agriculture and Environmental Sciences 4: 70-76. DOI: 10.15640/jaes.v4n1a9

Xu, J., Li, Y., Wang, R.Z. y Lui, W. (2014). Performance investigation of a solar heating system with underground seasonal energy storage for greenhouse application. Energy 67: 63-73. DOI: 10.1016/j.energy.2014.01.049

Wang, D., Wu, C., Liu, Y., Chen, P. y Liu, J. (2017). Experimental study on the thermal performance of an enhanced-convection overhead radiant floor heating system. Energy and Buildings 135: 233-243. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.11.017

Yıldız, A., Ozgener, O. y Ozgener, L. (2012). Energetic performance analysis of a solar photovoltaic cell (PV) assisted closed loop earth-to-air heat exchanger for solar greenhouse cooling: an experimental study for low energy architecture in Aegean Region. Renew Energy 44: 281–287. DOI: 10.1016/j.renene.2012.01.091

CAPÍTULO 2 . REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Efecto de las temperaturas bajas sobre el cultivo

La temperatura del aire es el factor principal que afecta directamente la tasa de desarrollo y crecimiento de una planta. Cada proceso fisiológico que llevan a cabo, requiere de un rango de temperaturas idóneo, y por encima o por debajo de este, no se realizan o se ven dificultadas. El rango de temperaturas idóneas (Cuadro 2.1) para el desarrollo y crecimiento de las plantas es diferente para cada especie y para cada ciclo biológico (Serrano, 2005).

Uno de los factores que más influye el proceso de fotosíntesis es la temperatura del aire, puesto que el aire alrededor de las hojas, influye en el intercambio gaseoso, así como en las tasas de transpiración, respiración y otras reacciones metabólicas. La temperatura del suelo, por otro lado, influye en la germinación, la absorción de nutriente y el desarrollo de las raíces. Se ha demostrado que la absorción de nutrientes, tales como calcio (Ca), boro (B), nitrógeno (N) y fósforo (P) aumentan al incrementarse la temperatura del medio radicular (Hopkins y Hüner, 2008).

Las especies cultivadas al aire libre o bien, en invernaderos sin sistemas de calefacción se ven expuestas a las fluctuaciones diarias de la temperatura del aire. Por un lado, temperaturas muy bajas en invierno y por otro, muy elevadas en verano (Azcón y Talón, 2008); por lo que es muy probable que no se alcancen los niveles necesarios de temperatura para el crecimiento y desarrollo de la planta y eventualmente sufran estrés térmico, debido al calor o al frio. La mayoría de las plantas ralentiza su crecimiento a temperaturas superiores a 40°C (Azcón y Talón, 2008; Castilla, 2007).

El estrés por frio aparece entre 15 °C y 0 °C; a medida que desciende la temperatura el desarrollo se hace más lento (FAO, 2001). Con temperaturas inferiores a – 4°C o – 5°C, se produce hielo dentro de las células dando lugar a deshidrataciones en el interior de las células y finalmente la ruptura de las membranas (Serrano, 2005).

Cuadro 2.1. Temperaturas mínimas, óptimas y máximas para algunos cultivos hortícolas.

Especie	Mínima letal (°C)	Mínima biológica (°C)	Óptima (°C)		Máxima biológica (°C)	Sustrato (°C)
			Noche	Día		
Tomate	-2 a 0	8-10	13-16	22-26	26-30	15-20
Pepino	0	10-13	18-20	24-28	28-32	20-21
Melón	0	12-14	18-21	24-30	30-34	20-22
Judía	0	10-14	16-18	21-28	28-35	15-20
Pimiento	-2 a 0	10-12	16-18	22-28	28-32	15-20
Berenjena	-2 a 0	9-10	15-18	22-26	30-32	15-20

Fuente: Ahorro y eficiencia en invernaderos, IDEA, 2008

En la mayoría de los cultivos hortícolas con algún tipo de protección, se presentan las siguientes alteraciones cuando la temperatura del ambiente desciende al rango de 10 a 12 °C (López et al., 2000):

a) Reducción del crecimiento, especialmente de la elongación, de la expansión foliar y en consecuencia de la radiación absorbida por el cultivo.
b) Disminución de la tasa de asimilación neta.
c) Reducción en la tasa de respiración.
d) Reducción del transporte y distribución de asimilados.
e) Disminución de la absorción de agua y sales minerales debido a: aumento de la viscosidad del agua, aumento de la resistencia del tejido de la planta por la disminución de permeabilidad de la membrana celular, reducción de la absorción y acumulación activa de iones y disminución del crecimiento de la raíz.
f) Cambios anatómicos y morfológicos: tendencia a desarrollar hojas más anchas y cortas, reducción de la longitud del peciolo, aumento del grosor de la hoja y disminución del área foliar específica.
g) Pérdida de fertilidad.
h) Envejecimiento precoz del tejido fotosintético por necrosis celular.

2.2 Sistemas de calefacción en invernaderos

Actualmente los invernaderos de baja a mediana tecnología ubicados en México no cuentan con un sistema de calefacción dado los altos costos monetarios en la instalación y operación de los sistemas comúnmente usados. Los pocos invernaderos que tienen sistemas de calefacción, los usan básicamente para evitar daños en los cultivos por heladas durante los periodos más fríos. Es importante mencionar que alrededor del 70 % de invernaderos ubicados en el territorio nacional son de baja a mediana tecnología (Moreno-Reséndiz et al., 2011), es decir, no están automatizados, usan cubiertas de polietileno y están expensas a los cambios climáticos.

Un sistema de calefacción tiene como objetivo aportar calor en el interior del invernadero durante la producción de cultivos en periodos fríos. Permitiendo establecer los ciclos de la producción durante todo el año. La selección del equipo de calefacción depende del tamaño y tipo del invernadero, las estructuras y disponibilidad, así como el costo de los componentes del sistema de fuente de calor.

Un sistema de calefacción se compone de: 1) quemador de combustible, 2) intercambiador de calor y 3) sistema de distribución del calor y controles (Aldrich y Bartok, 1994). Los sistemas de calefacción más usados en invernaderos son los equipos generadores de aire cliente o “cañones”, ya sean de combustión directa o indirecta.

En el diseño o la selección de un sistema de calefacción se tiene que procurar que el aporte de calor sea eficaz y eficiente. El calor se debe de distribuir de manera uniforme, minimizando los gradientes de temperatura, principalmente los horizontales, dado que se requiere que la temperatura a nivel de planta sea uniforme en toda área ocupada por el cultivo.

Como parte de las estrategias de control de temperatura, se recomienda que la temperatura de los cultivos debe ser superior a la temperatura del punto de rocío, para evitar la condensación y reducir así el riesgo de enfermedades fungosas, además de cuidar que el consumo de energía del sistema de calefacción sea lo más bajo posible (Teitel et al., 1998).

De acuerdo con López et al. (2000), por la forma en la que el calor se puede transferir (convección, conducción y radiación), los sistemas de calefacción usados en invernaderos se clasifican como:

- **Sistemas de calefacción de tipo convectivo**

Son sistemas en los que el elemento conductor del calor es el aire. Debido a su poca inercia, proporcionan un aumento rápido de la temperatura del aire, enfriándose de igual forma al dejar de actuar. Generan importantes gradientes térmicos y pérdidas de calor al ir localizados, normalmente, sobre el cultivo

El costo de instalación es inferior al de los sistemas por agua caliente, aunque su vida útil es más corta.

Existen tres sistemas que usualmente se aplican en la producción de aire caliente, incluyendo: 1) aerotermos, 2) generadores de aire caliente y 3) bombas de calor (Castilla, 2007).

• Aerotermos: consiste en un cuerpo caliente que transmite calor al aire del invernadero, mediante un elemento intercambiador de calor. En el mayor de los casos el aire suele ser calentado con agua.

• Generadores de aire caliente: estos queman un combustible para calentar el aire que posteriormente es forzado a circular dentro del invernadero.

• Bombas de calor: Las bombas de calor toman la escasa energía que coexiste en el ambiente y lo transfieren por medio de un sistema de intercambio de calor a un sistema y este a su vez lo transferirá al invernadero.

Los sistemas de calefacción convectivos son definidos por ser sistemas un tanto ineficientes debido a la poca inercia térmica. Sin embargo, son instalaciones relativamente económicas comparadas con las otras (Urban, 1997).

- **Sistemas de calefacción por convección y radiación**

La transferencia de calor se realiza a través de tuberías aéreas o dispuestas sobre el medio de cultivo, por donde circula agua caliente, pudiendo trabajar a altas (hasta 90 ºC) o bajas temperaturas (entre 30 ºC y 50 ºC) en función del

material utilizado (metal o plástico). En alta temperatura, la utilización de las tuberías metálicas como rieles, permite la incorporación de carros para prácticas.

Estos sistemas modifican la temperatura del aire, al calentarse por convección al contacto con los tubos, y la de los objetos (suelo, planta, cubierta del invernadero, etc.) que se encuentran a su alrededor por intercambio radiativo. La distribución del calor es más uniforme que en los sistemas por aire, al situar las tuberías cerca del cultivo y mantener unos gradientes térmicos bajos.

- **Sistemas de calefacción por conducción**

Estos sistemas están diseñados para proporcionar una temperatura adecuada en la zona radicular. Desde una caldera central se transfiere calor al suelo a través de tuberías enterradas, circulando agua a temperatura inferior a 40 ºC, la distribución del calor es uniforme y proporciona mayor eficiencia que los sistemas por aire caliente. El elevado coste inicial y la dificultad para realizar labores en el suelo (al ir enterradas las tuberías a menos de 50 cm) han limitado el desarrollo de estos sistemas en cultivos establecidos directamente en el suelo. En cultivos fuera de suelo (p.e. macetas), permite la instalación de intercambiadores de calor bajo los sustratos o sobre los mismos y esto ha permitido su expansión en estos sistemas de cultivo, generando así el sistema de calefacción hidrónica por suelo radiante:

- **Suelo radiante**

Se trata de un sistema de calefacción por conducción-radiación, en donde, mediante una o varias calderas se calienta agua a alta temperatura y un sistema de impulsión (bombas hidráulicas) que la distribuye por el invernadero mediante un circuito de tuberías metálicas. Este sistema de calefacción en invernadero se está imponiendo debido, entre otras ventajas, a que el calor producido se puede concentrar cerca del suelo, donde es más necesario.

Además, según el combustible utilizado es factible implementar un sistema combinado de calefacción y enriquecimiento carbónico, lo que hace aumentar aún más la productividad.

La instalación de tubería subterránea, por la cual circula el agua a una cierta temperatura depende principalmente de los requerimientos energéticos del invernadero. Este tipo de sistema suele ser de costos elevados, sin embargo, gracias a la excelente eficiencia térmica que presenta, se considera uno de los mejores (García et al., 1997).

Este tipo de calefacción es utilizado principalmente para cultivos dispuestos en macetas, con el fin de aprovechar al máximo la calidez del suelo.

Existen diversas maneras de construir un sistema de calefacción de este tipo. Algunos constan de una plancha de hormigón o concreto, la cual está en contacto directo con la planta. Este tipo de sistema más elaborado consta de una capa aisladora que impide la transferencia de calor a capas más bajas del suelo o a los costados, optimizando el calor, de tal manera que se le obliga a dirigirse hacia la superficie. Otros sistemas son menos elaborados y no constan de aislantes, ni conductores tan efectivos, pues su medio de transferencia es el suelo directamente. La eficacia de conducción del suelo, dependen altamente del porcentaje de agua presente y su textura.

En algunos casos la calefacción por suelo no llega a calentar las capas de aire más altas del invernadero, por lo que es recomendable acudir a sistemas que complementen la temperatura del aire.

Por último, hay que mencionar los sistemas de calefacción a baja temperatura, ya que, aunque son menos efectivos que la calefacción a alta temperatura, también mejoran la productividad y suelen tener menos costes de producción ya que la energía agregada al agua es menor. La gran desventaja de estos sistemas es que no suelen ser suficientes para evitar heladas puntuales, por lo que suelen ser complementado con una instalación de aerotermos (García et al., 1997; Emeish, 1999).

2.3 Combustibles tradicionales y alternos usados en los quemadores de los sistemas de calefacción.

La elección del combustible puede condicionar la del sistema de calefacción y su rentabilidad. Los combustibles, tanto gaseosos como líquidos, más usados son: propano, gas natural, diésel y combustóleo (López et al., 2000; Aldrich y Bartok, 1994).

Aunque son menos usados, los combustibles como: pellets de madera, astilla de madera, leña, geotérmica y eléctrica, conforman la variedad de combustibles alternos disponibles, desde luego con sus ventajas e inconvenientes (Cuadros 2.2 y 2.3) (Enervin®Duo, 2016).

Cuadro 2.2. Ventajas y desventajas de los combustibles usados en los sistemas de calefacción.

	Impacto negativo en el ambiente	Costo de operación	Costo de inversión	Fiabilidad	Mantenimiento	Integración con energía solar
Pellet de madera	B	B	A	A	R	si
Astilla de madera	B	B	R	R	A	si
Leña	B	B	A	A	R	si
Geotérmica	R	B	A	A	B	si
Gas natural	R	R	B	A	B	si
Eléctrica	A	A	B	A	B	si
Gasoil	A	A	R	A	B	si

Dónde: B-bajo; R-regular y A-alto. Adaptado de Enervin®Duo, 2016.

Cuadro 2.3. Costo de diferentes combustibles usados en los sistemas de calefacción

Combustible	Poder calorífico	Eficiencia en la combustión (%)	$/Millón BTU
Combustóleo	138 500 Btu/gal	75	$\frac{\$}{\text{gal}} \text{x } 9.6$
Gas natural	100 000 Btu/them	75	$\frac{\$}{\text{therm}} \text{x } 13.3$
Propano	92 500 Btu/gal	75	$\frac{\$}{\text{gal}} \text{x } 14.4$
Carbón mineral	25 000 000 Btu/ton	60	$\frac{\$}{\text{ton}} \div 15.0$
Leña	20 000 000 Btu/cord	60	$\frac{\$}{\text{cord}} \div 12$
Pelets	8 200 Btu/lb	80	$\frac{\$}{\text{ton}} \div 13.1$
Biocombustible (aceite vegetal)	120 000 Btu/gal	70	$\frac{\$}{\text{gal}} \text{x } 11.9$
Electricidad	3 412 Btu/kW-h	100	$\frac{\$}{\text{kW} - \text{h}} \text{x } 293$

Adaptado de Bartok (2005).

2.4 Aplicación de energías renovables en la agricultura protegida

Las energías renovables representan una piedra angular para dirigir nuestro sistema de energía hacia la sostenibilidad y seguridad del suministro. La generación de electricidad, calor o biocombustible a partir de fuentes de energía renovable se ha convertido en una alta prioridad en las estrategias de política energética a nivel nacional y mundial. Se han establecido objetivos desafiantes para estas “nuevas” opciones de suministro de energía para satisfacer nuestras demandas (Gustav et al., 2008).

Las diversas fuentes de energía, e.g. solar, eólica, hidráulica, biomasa y biocombustibles proporcionan una solución simple, sostenible y eficaz para la conservación de los recursos fósiles no renovables sin producir contaminación (Chel y Kaushik, 2010). Las fuentes de energía renovable usadas en la agricultura se resumen en el Cuadro 2.4.

Cuadro 2.4. Fuentes de energía renovable usadas en la agricultura.

Fuente	Tecnología	Tamaño
Energía solar	- Calentadores de agua de uso domestico - Calentadores de agua industriales - Red de paneles fotovoltaicos para generación de electricidad	- Pequeño - Mediano - Grande
Energía eólica	Generadores eólicos	Mediano a grande
Energía hidráulica	Plantas o centrales hidroeléctricas	Pequeño a mediano
Biomasa	Calderas de madera de alta eficiencia	Pequeño
	CHP que usan residuos agrícolas	Mediano
Estiércol	CHP que usan biogás	Pequeño
Cogeneration or Combined heat and power (CHP)	- Iluminación de alta eficiencia - Alta eficiencia eléctrica - Calderas de alta eficiencia	Amplio

Fuente: Omer (2008)

- **Sistemas de energía solar en calefacción de invernaderos**

Por su gran disponibilidad, la energía solar es uno de los recursos renovables con mayor potencial para muchas necesidades agrícolas, además, los sistemas diseñados para su aprovechamiento son rentables y confiables (Gustav et al., 2008). Los sistemas solares modernos, bien diseñados y de fácil mantenimiento pueden proporcionar la energía que se requiere en los diferentes procesos agrícolas, tal como en la calefacción de invernaderos.

En general, hay dos tipos de sistemas para el aprovechamiento de la energía solar: 1) los que convierten la energía solar en corriente continua y 2) los que convierten la energía solar en calor (IDEA, 2008). Ambos sistemas se han aplicado en la agricultura con buenos resultados, Cuadro 2.5.

Cuadro 2.5. Aplicaciones de la energía solar en la agricultura

Aplicación	Referencia	Descripción
Secado de cultivos y granos	Lokeswaran, S. y Eswaramoorthy, M. (2013).	Presenta un análisis experimental y numérico de la convección natural en secadores solares
	Sahdev, R. (2014).	Comparación del secado al cielo abierto y secado bajo secador solar en invernadero.
	Garduño, A. (2017)	Construyó un secador solar tipo invernadero para el deshidratado de diferentes productos agrícolas. El tiempo de secado fue de dos días para la stevia y 7 horas para el deshidratado del tomate rojo.
Calefacción de espacios y agua	Joudi, K. and Farhan, A. (2014).	Usando colectores solares de aire colocados en el techo de invernadero se puedo proveer cerca del 62% de la energía requerida diaria para calefacción.
	Elbatawi, (2003)	La calefacción solar permitió mantener el ambiente del invernadero entre 16 a 20 °C durante las noches, esto permitió que la germinación del pimiento verde fuera del 100% mientras que la geminación sin calefacción fue del 60 a 80 %.
	García, (2014)	Se logró incrementar 3 °C la temperatura del aire interior de un invernadero usando calefacción solar, el rendimiento del pepino aumentó en un 60 % respecto a un invernadero sin calefacción.
Enfriamiento de espacios	Maerefat, M. y Haghighi, A. (2010)	Mediante un sistema de enfriamiento pasivo se remueve el calor del ambiente.

Suministro de electricidad (fotovoltaico)	Purohit y Kandpal, (2005)	Bombeo de agua para riego
	Yano et al., (2009)	Generación de electricidad mediante paneles fotovoltaicos colocados en los techos de invernaderos
	Orozco, (2015)	Implementa un sistema de generación fotovoltaica interconectado a la red con capacidad energética para controlar y automatizar las variables de temperatura, humedad y ventilación de un invernadero para producción de tomate rojo.

Las tecnologías de energía solar más prometedoras están relacionadas con los sistemas térmicos (Omer, 2006); como, por ejemplo, calentadores de agua domésticos e industriales, calentadores de aire, cocina solar, secadores solares, desalinizador solar de agua, entre otras más.

La energía solar térmica se puede almacenar como calor sensible, calor latente, calor de reacción, o la combinación de éstos. En la mayoría de estos sistemas, el calor se almacena como calor sensible en materiales tales como agua y rocas. En sistemas latentes el almacenamiento del calor es acompañado por un cambio de fase de un material que se utiliza para el almacenamiento de energía térmica. La mayor parte de la demanda de calefacción del invernadero se puede suministrar por los sistemas del almacenamiento de calor latente, (Ozgener y Hepbasli, 2007).

2.5 Literatura citada

Aldrich, R. y Bartok, J. (1994). Greenhouse Engineering. 3rd revisión. Ithaca, NY: NRAES.

Azcon, J. y Talón, M. (2008). Fundamentos de fisiología vegetal. Ed. McGraw-Hill. p. 581-583.

Bartok, J. (2005). Comparing Fuel Costs chart and Approximate Heating Value chart. University of Connecticut, Storrs.

Castilla, N. (2007). Invernaderos de plástico: tecnología y manejo (segunda edición). Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España p. 169

Chel, A. y Kaushik, G. (2011). Renewable energy for sustainable agriculture. Agron. Sustain. Dev. 31: 91–118. DOI: 10.1051/agro/2010029

Elbatawi, I. (2003). Heating inside a greenhouse at night using solar energy. ASAE Annual Meeting. Paper 034040.

Food and Agriculture Organization od the United Nations (FAO). (2001). Trigo Regado: Manejo del cultivo. Rawson, H. y Gómez, H. Roma. 112 pp García, J., De la Plaza, S., Durán, J., Navas, L., Benavente, J. y Luna, L.1997. Calefacción por suelo radiante. Horticultura 124: 105-108

García, C. (2014). Energía solar para calefacción de un invernadero en la producción de pepino. Tesis de maestría. Instituto Politécnico Nacional. Jiquilpan, Michoacán, México.

García, J.; De la Plaza, S.; Durán, J.; Navas, L.; Benavente, R. y Luna, L. (1997). Calefacción por suelo radiante. Horticultura 124. Dptos. Ingeniería Rural y Producción Vegetal: Fitotecnia. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. España. Pp 105-108

Gustav, R.; Anne, H.; Thomas, F.; Christian, P.; Felipe, T. y Reinhard, H. (2008). Potentials and prospects for renewable energies at global scale, Energy Policy 36: 4048–4056. DOI: 10.1016/j.enpol.2008.06.029.

Hopkins, W. y Hüner, N. (2008). Introduction to plant physiology. Fouth Edition. WILEY. The University of Western Ontario. p 223-234.

IDEA (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía). (2008). Ahorro y Eficiencia energética en invernaderos. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, Madrid. 66 pp.

Joudi, K. and Farhan, A. (2014). Greenhouse heating by solar air heaters on the roof. Renewable Energy 72: 406–414. DOI: 10.1016/j.renene.2014.07.025

Lokeswaran, S. and Eswaramoorthy, M. (2013). An experimental analysis of a solar greenhouse drier: computational fluid dynamics (CFD) validation. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 35(21): 2062-2071. DOI: 10.1080/15567036.2010.532195

López, J., Lorenzo, P., Medrano, E., Sánchez, M., Pérez, J., Puerto, H. y Arco, M. (2000). Calefacción de invernaderos en el sudeste español: resultados experimentales para cultivos de pepino y judía. Ed. CAJA RURAL DE ALMERIA. 54 pp.

Maerefat, M. and Haghighi, A. (2010). Passive cooling of buildings by using integrated earth to air heat exchanger and solar chimney. Renewable Energy 35: 2316–2324. DOI: 10.1016/j.renene.2010.03.003

Moreno-Resediz, A.; Aguilar-Durón, J. y Luévano-González, A. Características de la agricultura protegida y su entorno en México. Revista Mexicana de Agronegocios 29: 763-774.

Omer, A. (2008). Green energies and the enviroment. Renewable and Sustainable Energy Reviews 12: 1789–1821. DOI: 10.1016/j.rser.2006.05.009

Orozco, M. (2015). Proyecto fotovoltaico sustentable para invernaderos de producción de jitomate. Ciudad de México, México: Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Ozgener, O. y Hepbasli, A. (2007). A parametrical study on the energetic and exergetic assessment of a solar-assisted vertical ground-source heat pump system used for heating a greenhouse. Building and Environment 42:11–24. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.07.003

Purohit P., Kandpal T.C. (2005). Renewable energy technologies for irrigation water pumping in India: projected levels of dissemination, energy delivery and investment requirements using available diffusion models, Renew. Sustain. Energy Rev. 9: 592–607. DOI: 10.1016/j.rser.2004.07.002

Rode, P.; Gamarra, R.; Espinosa, H.; Guizar, A.; Díaz, D.; Cruz, P. y Gutiérrez, A. (2010). Invernadero inteligente basado en un enfoque sustentable para la agricultura mexicana. Cuernavaca, Morelos, México: VIII Congreso Internacional sobre innovación y desarrollo tecnológico.

Sahdev, R. (2014). Open sun and greenhouse drying of agricultural and food products. A review. International Journal of Engineering 3(3): 1053-1066.

Serrano, Z. (2005). Construcción de invernaderos. Ed. Mundi-Prensa. 3ª ed. España. 507pp.

Teitel M., Segal, I., Shklyar, A. y Barak, M. (1999). A Comparison between Pipe and Air Heating Methods for Greenhouses. J. Agric. Engng Res. 72: 259-273. DOI: 10.1006/jaer.1998.0370.

Urban, L. (1997). Introduction a la production sous serre: la gestion du climat (Tomo 1). 2 ed. Paris. Ed. Tec. & Doc. 356 p.

Yano, A.; Furue, A.; Kadowaki, M.; Tanaka, T.; Hiraki, E.; Miyamoto, M.; Ishizu, F. y Noda, S. (2009). Electrical energy generated by photovoltaic modules mounted inside the roof of a north–south oriented greenhouse. Biosystem Engineering 103: 228–238. DOI 10.1016/j.biosystemseng.2009.02.020

CAPÍTULO 3 . EVALUACIÓN DE CALENTADORES SOLARES CON TECNOLOGÍA *HEAT-PIPE* EN CALEFACCIÓN DE INVERNADEROS

CHAPTER 3: EVALUATION OF HEAT-PIPE SOLAR COLLECTORS FOR GREENHOUSE HEATING

José H. Lopez-Diaz[1]; Efrén Fitz-Rodríguez[1*]; Irineo L. Lopez-Cruz[1]; Raquel Salazar-Moreno[1].

[1]Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco, km 38.5, Chapingo, Estado de México, C.P. 56230, México.

Correo-e: efitz@gmail.com tel.: 01 595 952 1500 ext. 6253 (*Autor de correspondencia)

3.1 Resumen

La energía solar es una alternativa eficiente y limpia en comparación con los combustibles fósiles, que se empieza a implementar tanto en México como en muchos otros países. Dada la creciente preocupación sobre el calentamiento global, el incremento en el uso de los combustibles derivados del petróleo, con tasas anuales cada vez mayores y por ende el declive de las reservas mundiales, muchos países buscan seriamente el uso doméstico e industrial de las energías limpias. De esta manera, se han desarrollado tecnologías más eficientes para el aprovechamiento de estas. Los colectores solares, con tubos de vacío y tecnología heat-pipe, son captadores solares muy eficientes y prometedores en la agricultura. En este artículo, se presenta el rendimiento térmico de un sistema de calentamiento solar de agua bajo las condiciones climáticas del centro de México. Se obtuvieron datos experimentales mediante sensores resistivos de temperatura y sensores de flujo de efecto hall. Con un flujo másico de 0.041 $kg \cdot s^{-1}$ la temperatura del agua en la salida del módulo solar rebasa los 85 °C así como eficiencias superiores al 60 %.

Palabras clave: *Eficiencia horaria, agua caliente, circulación forzada, sensor termoresistivo, Evacuated Tube Collector (ETC)*

3.2 Introducción

El uso de calefacción con combustibles tradicionales en invernaderos siempre ha resultado beneficioso para los cultivos (Mattas, 1989), pero en muchos casos, antieconómico debido a que los precios de los combustibles fósiles en México aumentan continuamente. Las soluciones para mejorar la situación comúnmente implican métodos para agregar calor lo más económico posible (Hanan, 1997). Una solución más adecuada implica aplicar diferentes fuentes de energías renovables, como lo son: solar, geotérmica, eólica, biomasa, bombas de calor; en lugar de utilizar combustibles fósiles. Por lo que se requiere desarrollar sistemas de bajo costo, simples, eficientes y que usen energías renovables para cubrir en gran medida la gran demanda energética para calefacción. Varios autores coinciden que la producción bajo invernaderos es uno de los sistemas de la agricultura que más energía consume, de hecho, entre el 70 % y 80 % de la energía total consumida en un invernadero corresponde a la calefacción (Moreno-Salazar at al., 2012)**.**

La cantidad de energía utilizada en la producción agrícola, incluyendo la distribución y el procesamiento debe de ser adecuada para alimentar la creciente población y alcanzar otros objetivos tanto sociales, económicos y ambientales. Tan solo en México, el tipo de agricultura protegida va en aumento, de acuerdo con las estadísticas de la AMHPAC (2017) desde el 2009 ha tenido un crecimiento del 11 % anual en promedio y en 2015 se registraron 23 251 Ha. Por lo que la demanda de energía también va en aumento. Una de las tendencias es el uso de sistemas agrícolas sostenibles, que se basen en el uso prudente de los recursos renovables, como la energía solar que proporciona una solución simple, sostenible y efectiva (Chel y Kaushik, 2010). El uso de energía solar para calefacción de invernaderos puede reducir costos monetarios, así como emisiones de CO_2 (García et al., 1997; Bot, 2003; Cuce et al., 2016). Las energías alternativas se han implementado en los sistemas de producción de invernadero en algunos países desarrollados, sin embargo, no ha habido un solo caso de acoplamiento de sistemas de energía alternativa a los invernaderos para las condiciones de México (Fitz et al., 2017). Las condiciones climatológicas, principalmente la radiación, prometen ser una solución para la reducción de

costos de calefacción. Los retos a resolver cuando se usa energía solar para calefacción son principalmente dos: 1) la transformación de radiación solar a energía calorífica y 2) el almacenamiento de la energía calorífica (Zabeltitz, 1994). Una opción para resolver el primer problema planteado por Zabeltitz (1994) es el uso de captadores solares altamente eficientes y a la vez accesibles económicamente, como son los calentadores solares con tecnología *heat-pipe*. Estos calentadores tienen un mayor rendimiento que los de placa plana, en particular para operaciones a altas temperaturas, además de la alta eficiencia cuando los días son nublados o fríos. Por lo tanto, en esta investigación se plantea determinar la eficiencia energética de un sistema solar tipo industrial para su posterior uso en la calefacción de invernaderos. Se evaluaron variables como temperatura del agua en los colectores, temperatura del termo-tanque y tasa de flujo del agua.

El objetivo de este estudio fue obtener el rendimiento energético de calentadores solares con tecnología *heat-pipe* como calentador de agua con fines de calefacción.

- **Colector solar con tubos de vacío y tecnología heat-pipe**

Existen diferentes tipos de colectores solares, según la aplicación a la que se destinen (domesticas o industriales,), como se muestra en el Cuadro 3.1.

Los colectores solares de tubos de vacío consisten en una serie de tubos de vidrio de doble pared; la cámara intermedia está al alto vacío para disminuir las pérdidas de calor, y existen tres sistemas:

- Flujo directo: el agua circula por los tubos, como los captadores planos.
- Flujo indirecto con tubos calóricos o “heat-pipe”.
- Flujo indirecto sin tubos calóricos.

El calentador de tubos al vacío con tubos calóricos ha significado un gran avance en la tecnología de transferencia de calor, aplicada en este caso al colector solar. En este modelo, Figura 3.1, por dentro del tubo de vidrio no fluye el agua, sino que alcohol o similar, tiene en su eje central un tubo calórico para transmitir la energía solar al agua del tanque-termo o cabezal (Pérez y

Álvarez, 2008). El fluido de trabajo al calentarse, pasa al estado de vapor; sube entonces por el tubo y llega al extremo superior, que está conectado a un condensador que funciona a modo de intercambiador de calor. Aquí el vapor se condesa y vuelve al estado líquido. El líquido retorna a la parte baja del tubo por la gravedad repitiendo el ciclo evaporación-condensación (Sánchez, 2012).

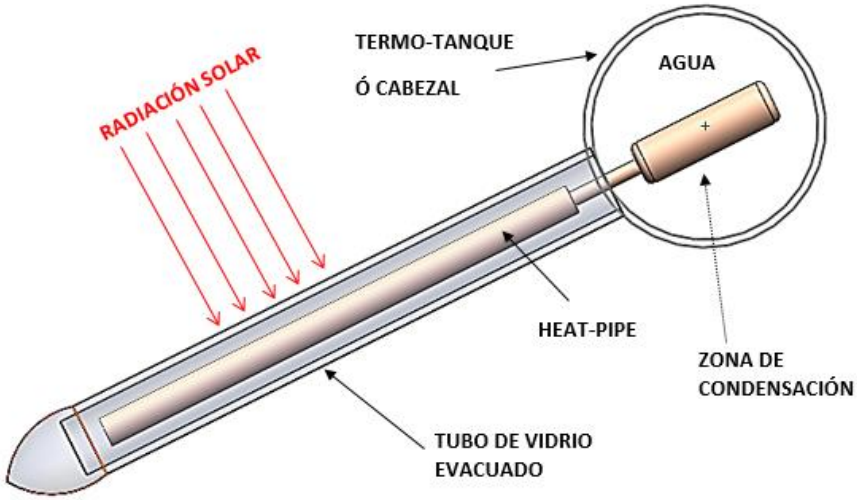


Figura 3.1. Estructura de un calentador solar con tubos *heat-pipe*.

Estos colectores son capaces de aprovechar la radiación difusa y también funcionan en periodos fríos. Permiten obtener mayores temperaturas y tienen un rendimiento superior a los colectores planos o de tubos al vacío sin heat-pipe. Su durabilidad es mayor, pero su costo también es elevado.

Cuadro 3.1. Resumen de tipos de colectores solares domésticos e industriales.

TIPOS DE COLECTORES SOLARES		
Clase	**Características**	**Tipos**
De baja temperatura (< 100 °C)	- No utiliza ningún dispositivo para concentrar los rayos solares. - La temperatura del fluido a calentar está por debajo del punto de ebullición del agua.	- Colectores solares no vidriados. - Colectores solares de placa plana. - Colectores solares de tubo de vacío.

De media temperatura (100 – 400 °C)	- Capaces de concentrar los rayos del sol en una superficie reducida.	- Colectores solares parabólicos.
De alta temperatura (400- 1000 °C)	- Capaces de concentrar la radiación solar en un solo punto. - No se usan de modo comercial, tan solo para la investigación. - Utiliza un campo heliostatico, espejos que siguen la trayectoria del sol automáticamente.	- Colector de campo heliostático. - Colector de espejo parabólico.

Fuente: Sánchez, (2012).

3.3. Materiales y métodos

Se implementó un sistema de calefacción solar, el cual consiste de: a) ocho colectores conectados en serie con una superficie total efectiva de 20.8 m^2. Cada colector con 30 tubos de cristal al alto vacío y tubo de cobre para la trasferencia de calor (*heat-pipe*), los datos técnicos son presentados en el Cuadro 3.2; b) tanque de almacenamiento de agua de 10,000 L, con aislamiento térmico Thermaflex® de 2.54 cm de espesor, c) una bomba de recirculación y distribución de agua con potencia variable (70 W, 100 W y 140 W) y e) instrumentación para el monitoreo y control del módulo de calefacción. Este sistema se instaló en el área del Centro Demostrativo de Energías Alternativas y de Biosistemas ubicado en la Universidad Autónoma Chapingo (coordenadas 19°29’28.54” N y 98°53’ 36.31” O).

Cuadro 3.2. Especificaciones técnicas de los tubos del colector Sunnergy SEI-HP-30-1500/47

Material	Cristal de borosilicato 3.3 mm
Heat-pipe	Cobre
Longitud/diámetro	1.5 m / 47 mm
Pared interna/externa	1.6 mm/ 1.7mm
Recubrimiento	Tricapa (Co/Al-N/Al)
Coeficiente de absorción	>96% (AM 1.5)

Coeficiente lineal de pérdidas de calor	$\leq 0.8\,\mathrm{W}\cdot\mathrm{m}^{-2}\mathrm{°C}^{-1}$
Emisividad térmica	$\leq 4\,\%\ @\ 80\,°C$
Presión entre tubos (vacío)	$5x10^{-3}$ Pa
Resistencia al granizo	Hasta 25 mm de diámetro

3.3.1 Descripción del sistema de calefacción solar de agua

En las Figuras 3.2 y 3.3 se muestra el sistema de calefacción *solar activo*, de acuerdo a la clasificación propuesta por Ge et al. (2017). Se trata de un conjunto de ocho colectores solares con tubos evacuados (ETC, Evacuated Tube Collector) y en el interior de cada tubo de cristal hay un tubo de cobre (comúnmente llamado "*heat pipe*") de alta conductividad térmica que contiene en su interior una pequeña cantidad de un fluido de trabajo. Cada colector solar se conforma de 30 tubos de cristal conectados en serie que calientan el agua durante el día. El agua es desplazada mediante una bomba de re-circulación de 145 W, con un flujo promedio de 6.5 $L{\cdot}min^{-1}$. La tubería y accesorios, principalmente metálicos, fueron aislados con espuma de polietileno. La energía colectada en forma de agua caliente se almacena en un tanque de polietileno de 10 m^3 de capacidad y con aislamiento térmico de 25.4 mm de espesor para evitar grandes pérdidas de energía, principalmente durante las noches.

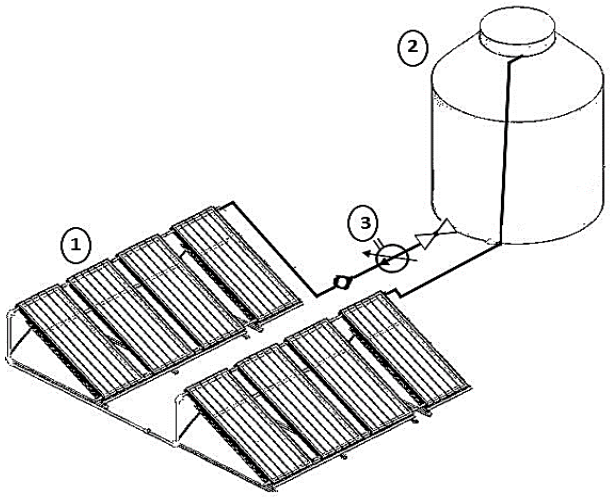


Figura 3.2 Sistema de calefacción de agua. 1-módulo de colectores solares, 2- depósito de 10 m^3 y 3- bomba de recirculación de 145 W.



Figura 3.3. Módulo de calefacción solar de agua instalado en el Centro demostrativos de Energias Alternativas y de Biosistemas de la UACh

3.3.2 Mediciones

Se instrumentó una red de sensores para medir la temperatura del agua en diferentes puntos del sistema. La red de sensores está compuesta por ocho sensores resistivos de temperatura comúnmente conocido como sensores RTD, particularmente, se usó el modelo PT100 de tres hilos (100 Ω @ 0 °C y 138.5 Ω @ 100 °C). Cuatro de estos sensores están insertados en los ductos a la salida de los calentadores (en las posiciones 1, 2, 4 y 8) tal como se muestra en la Figura 3.4 y los otros cuatro, sumergidos en el depósito de agua caliente a diferentes alturas (T1, T2 y T3).

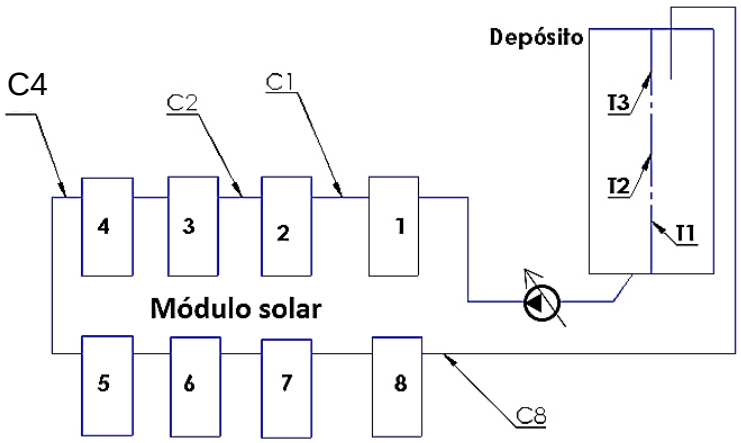


Figura 3.4. Ubicación de los sensores PT100 (C1, C2, C4, C8 y T1-T2, y T3).

Para cuantificar el caudal del agua en la entrada del módulo solar se instrumentó un sensor de flujo de efecto hall modelo YF-S201.

Se registraron datos climatológicos (radiación solar, temperatura y humedad del aire, dirección y velocidad del aire) promedios a intervalos de cinco minutos, cuyos sensores se describen en el Cuadro 3.3. La estación climatológica está ubicada a 40 metros del módulo solar, y contigua al invernadero sustentable. Se instrumentó un registrador de datos CR1000 de (Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA) para el monitoreo, control y adquisición de datos del sistema de calefacción.

Cuadro 3.3. Sensores usados en la estación meteorológica

Variable climática	**Sensor**
Radiación solar directa	Silicon Pyranometer SP-212-L (Apogee Instruments, Logan, UT, USA)
Temperatura del aire exterior e interior del invernadero	Temperature and Relative Humidity Sensor HMP50-L, (Vaisala, Helsinki, Finland)
Velocidad y dirección del viento	Wind Speed and Wind Direction Sensors 05305-L (R.M. Young Co., Traverse City, Michigan USA)

3.3.3 Energía colectada

La energía colectada por los calentadores solares se determinó de acuerdo a la Ecuación 3 (Norton, 1992; Tiiwari, 2006; y Kalogirou, 2009):

$$\dot{Q}_u = \dot{m_w} \cdot C_f \cdot (T_{fo} - T_{fi}) \quad (3)$$

Donde: $\dot{m}_w$ es la tasa de flujo de agua a través del calentador, kg·s^{-1}; C_f es el calor especifico del agua, J·kg^{-1}·°C^{-1}; T_{fo} , T_{fi} son las temperaturas del agua en la salida y entrada del módulo solar respectivamente, °C.

La tasa de flujo de agua $\dot{m}_w$ esta dada por:

$$\dot{m}_w = \rho_w \cdot \dot{V}_w \tag{4}$$

Donde:

ρ_w – es la densidad del agua, que varía en función de la temperatura (Ecuación 5) (Sinem, 2011), $\dot{V}_w$ – es el flujo volumétrico del agua, $m^3 \cdot s^{-1}$.

$$\rho_w = 1000 \cdot \left(1 - \frac{T+288.9414}{508929.2} \cdot (T + 68.12963)\right) \cdot (T - 3.9863)^2 \tag{5}$$

Donde: T- es la temperatura del agua, °C.

3.3.4 Eficiencia de los colectores solares

La eficiencia de un colector puede obtenerse experimentalmente, aunque también puede determinarse por medio de un cálculo teórico, como lo propone Duffie and Beckman (2006):

$$\eta_e = \frac{\dot{m_w} \cdot C_f \cdot (T_{fo} - T_{fi})}{A_c \cdot I_t} \tag{6}$$

Dónde: A_c - es el área efectiva de los colectores solares, m^2; I_t es la radiación incidente sobre el colector, $\mathrm{W \cdot m^{-2}}$.

La radiación incidente en un área inclinada depende de diversos factores, como la latitud del lugar, el ángulo de inclinación del área, declinación solar, ángulo horario y la radiación incidente en áreas planas. La radiación que incide en un área inclinada, 29° en el caso particular de los calentadores solares usados, suele ser mayor de la que se dispone cuando se trata de un área plana (suelo). Sin embargo, el rendimiento de estos equipos cambia (mejora o empeora) según el ángulo de declinación de la tierra y el ángulo horario principalmente. Por lo que se puede obtener la radiación incidente en superficies inclinadas de la siguiente forma (Kalogirou, 2014):

$$GB_t = GB \cdot RB \quad (7)$$

donde:

GB_t – es la radiación incidente en superficies inclinadas, W·m^{-2}.;

GB – es la radiación incidente en superficies planas, W·m^{-2}.

RB – es el factor de radiación del cuerpo inclinado.

3.3.5 Requerimientos energéticos de calefacción del invernadero

Existen varios métodos para calcular el consumo de energía diaria, mensual o anual para edificios, tal como la metodología propuesto por: Aldrich y Bartok (1994), Hellickson y Walker (1993) y Hannan (1997). Sin embargo, el método grado-hora (Satman y Yalcinkaya,1999) es uno de los más simples.

Los grados-hora se calculan simplemente sumado las diferencias por hora entre las temperaturas del bulbo seco y las temperaturas de referencia o "set-point" (Coskun, 2009). Esta suma se extiende al periodo que se pretende analizar y los valores de la diferencia de temperatura de toman para intervalos de tiempo fijos, generalmente cada hora (Castro-López et al., 2010). El concepto de grados-hora se muestra en la Figura 3.5. El método supone que la temperatura ambiente es constante durante los intervalos de tiempo de una hora, y por lo tanto la cantidad de calor que fluye a través de la estructura del edificio durante este periodo es:

$$Q = U \cdot A \cdot \left(T_{s-p} - T_{out}\right) \quad (8)$$

Donde: U = coeficiente global de transferencia de calor de la cubierta del invernadero, W·m^{-2}·°C^{-1}; A = área total superficial de la cubierta del invernadero, m^2.; T_{sp} – es la temperatura base (de referencia o set-point), °C y T_{out} – es la temperatura del bulbo seco del aire exterior, °C.

Formalmente, los grados hora (HDH) puede calcularse para un periodo (i hasta n) como:

$$HDH = \sum_{i=1}^{n} (T_{sp} - T_{out}) \quad (9)$$

Esta ecuación es válida solo para el caso de calentamiento, donde para cada $T_{out} < T_{st}$. La temperatura base, T_{sp}, se seleccionó de acuerdo con el cultivo. Para la aplicación del método grados-hora se requiere conocer la variación horaria de temperatura del ambiente exterior, para esto, se puede usar registros históricos de temperatura, si existen, o es posible usar modelos matemáticos estadísticos, que pueden generar dicha información a partir de los datos climáticos y geográficos disponibles de la región.

Una vez determinado el HDH, se obtuvo la energía necesaria por metro cuadrado de superficie expuesta para mantener el invernadero a la temperatura pre-establecida, o bien, la temperatura del aire óptima para el cultivo, de acuerdo con la Ecuación 10

$$Qt(noche) = U \cdot A \cdot HDH \tag{10}$$

Donde: $Qt(noche) =$ la cantidad de energía necesaria para mantener al invernadero a la temperatura pre-establecida, J·m^{-2}.

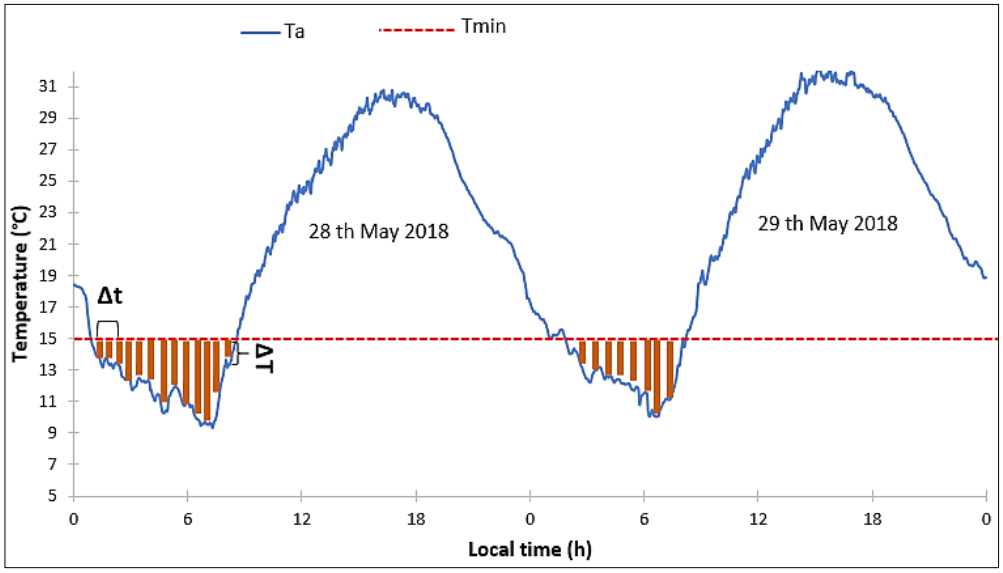


Figura 3.5. Representación de los grados-hora. Las áreas sombreadas representan las necesidades de calefacción. Datos experimentales de Chapingo, Estado de México

3.4 Resultados y discusión

Los colectores solares se conectaron en una configuración en serie dado que se querían alcanzar temperaturas altas, se conoce de literatura que el rendimiento global de un módulo de colectores siempre será menor que en una conexión en paralelo; esto se debe al salto térmico que hay en cada colector. En una conexión en serie el caudal del agua no varía durante su recorrido en el módulo, la temperatura del agua va aumentado progresivamente, lo que afecta al último colector, que presenta un rendimiento energético menor que el resto (Figura 3.7).

En un día típico de mayo (28/05/2018) se registraron las temperaturas del agua (Figura 3.6) después de pasar por los colectores solares (C1, C2, C4 y C8). El flujo volumétrico se mantuvo constante a 2.65 $L \cdot min^{-1}$.

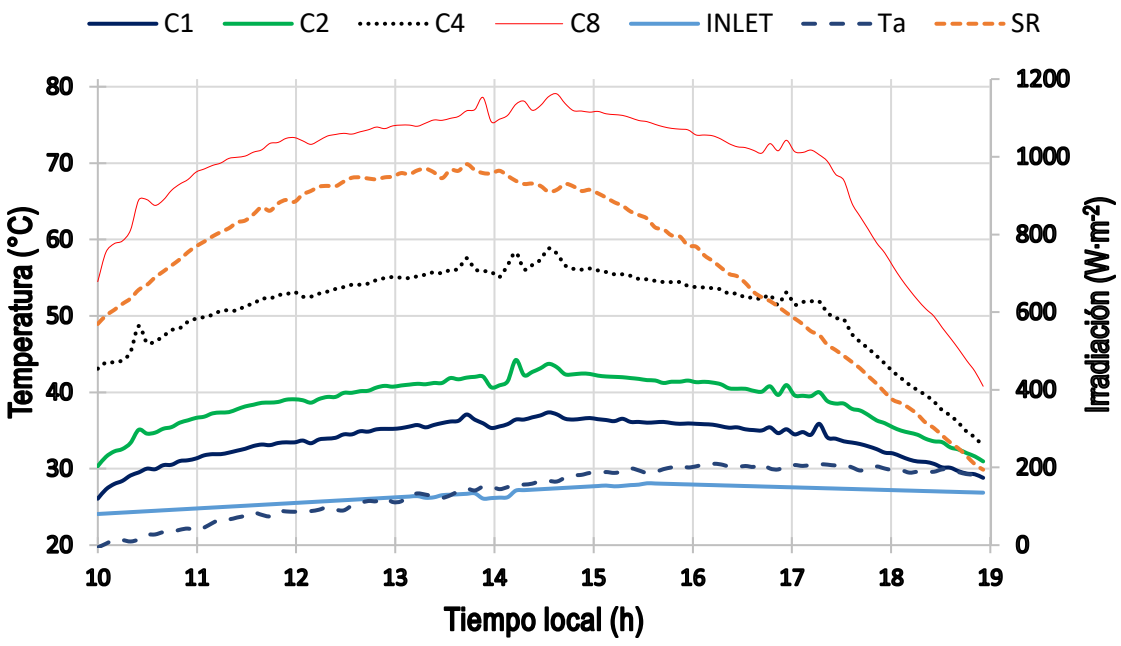


Figura 3.6. Temperatura del agua a la salida de los colectores 1 (C1), 2 (C2), 4 (C4) y 8 (C8). INLET es la temperatura en la entrada del módulo, Ta es la temperatura del ambiente y SR la radiación solar global incidente.

En las Figuras 3.7, 3.8, y 3.9 se presentan las eficiencias horarias (*EH*) de los colectores solares para el mismo día presentado anteriormente. En la Figura 3.7 se compara la *EH* entre el colector 1 y 2. Se observa que la eficiencia del primer colector es superior al segundo, esto debido a que el agua que ingresa al segundo colector es mayor en comparación del primero.

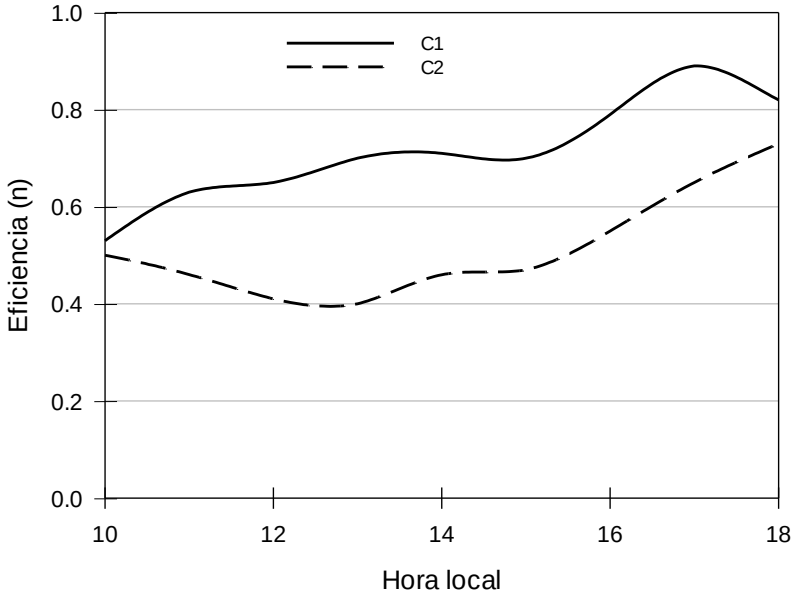


Figura 3.7. Eficiencia horaria de los colectores 1 y 2.

En la Figura 3.8 se presenta la eficiencia horaria en pares de colectores conectados en serie (C1-C2 y C3-C4). La eficiencia del primer par es ligeramente superior al segundo par, debido a que el salto térmico es mayor en la primera pareja, en comparación del segundo par.

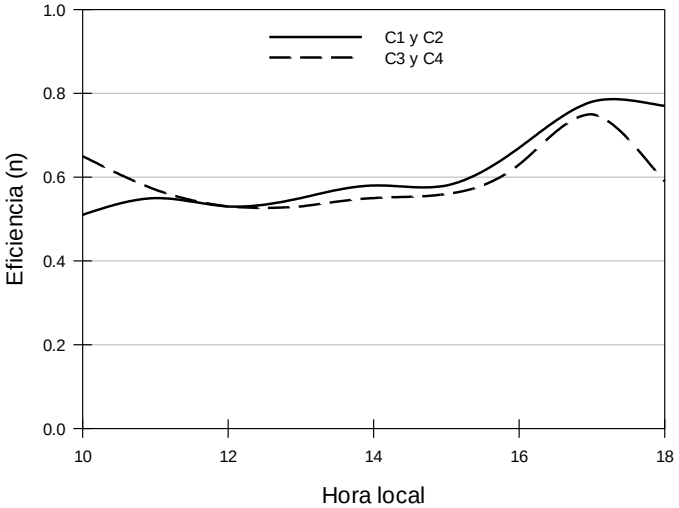


Figura 3.8. Eficiencia horaria de colectores en pares

En la Figura 3.9, los datos de eficiencias horarias del módulo solar se analizan en dos partes, los primeros colectores en serie (C1-C4) se comparan con los últimos colectores, también en serie, (C5-C8).

De los datos obtenidos, y presentados gráficamente, Figuras 3.8 y 3.9, se concluye que la eficiencia de los colectores solares disminuye conforme se incrementa la temperatura del agua a la entrada (a un flujo constante).

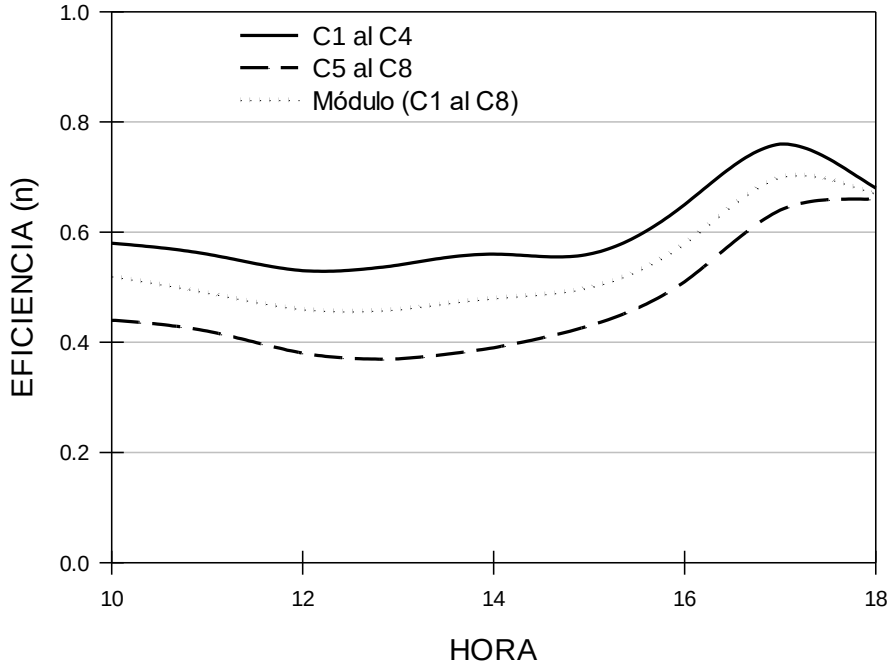


Figura 3.9. Eficiencia horaria los primeros cuatro colectores (C1 al C4) vs los últimos cuatro (C5 al C8) y eficiencia global del módulo solar (C1-C8)

A continuación, se presentan las eficiencias de los colectores solares durante diferentes días del año. Se comparan las eficiencias entre el segundo colector (C2), el conjunto de tres colectores (C2-C4) y el conjunto de siete colectores (C2-C8). La diferencia es notable entre el conjunto de tres y siete equipos, de manera contundente, en colectores conectados en serie, la eficiencia es mayor cuando solo son tres unidades y mucho menor cuando son siete unidades (Figuras 3.10 a 3.14). Por lo que es conveniente que el módulo solar se conecte tanto en paralelo como en serie, para optimizar y aumentar la eficiencia global de módulo solar.

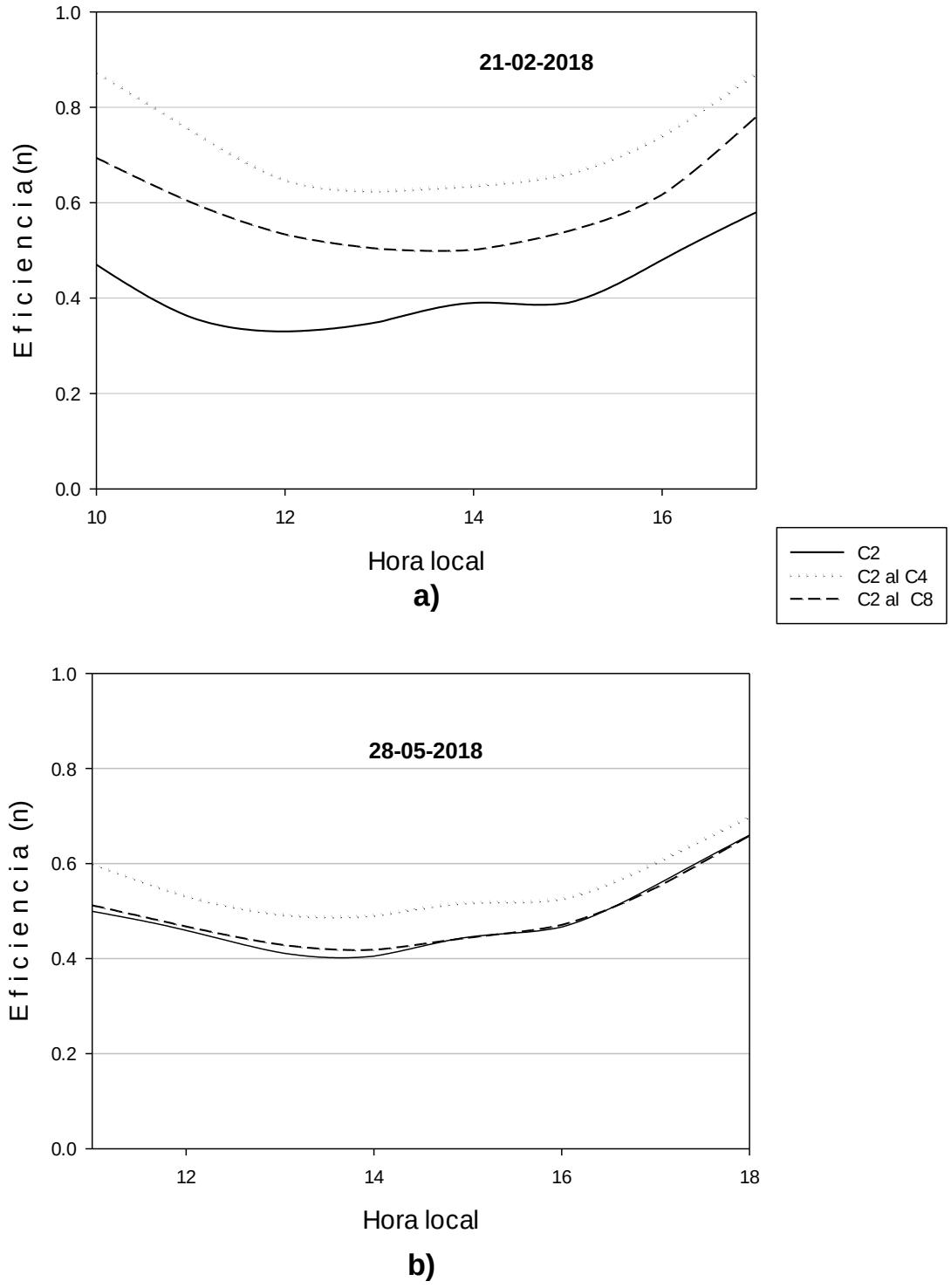
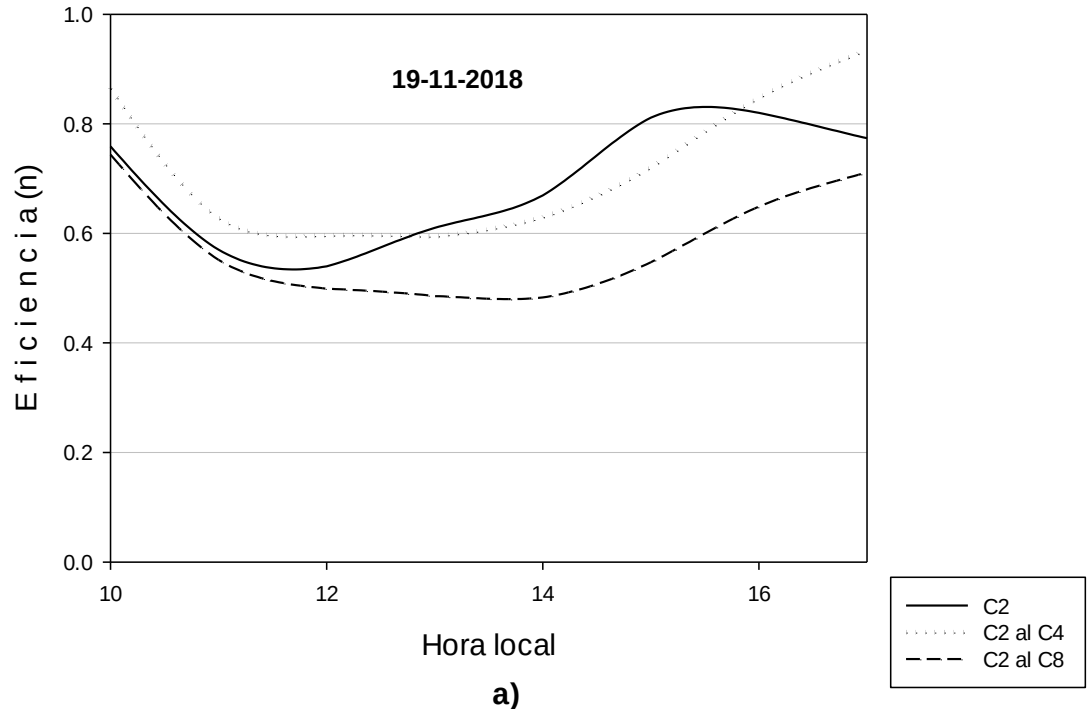
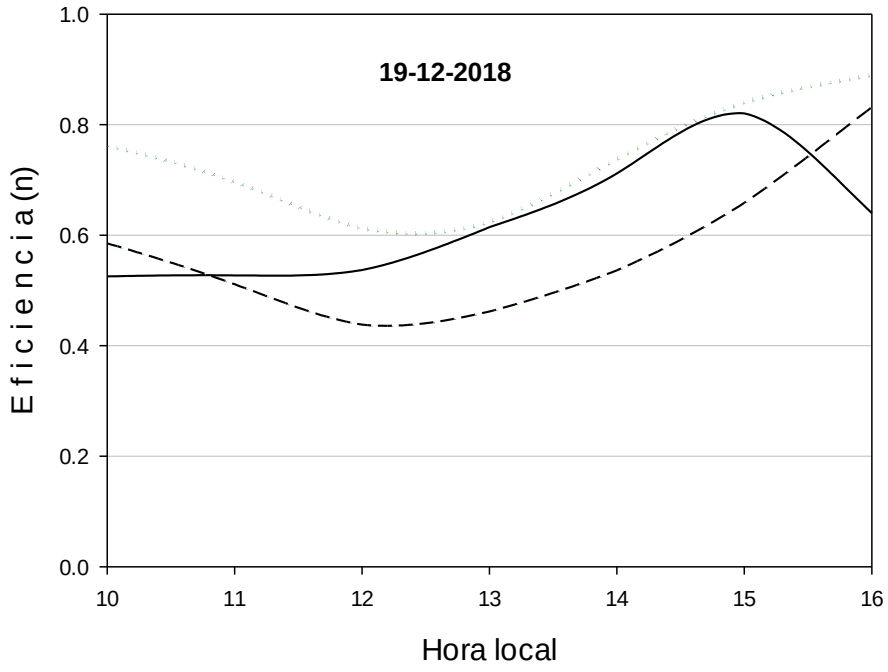


Figura 3.10. Eficiencia horaria de uno, tres y siete calentadores en serie. a) febrero y b) mayo



a)



b)

Figura 3.11. Eficiencia horaria de los colectores en los meses de noviembre (a) y diciembre (b), 2018.

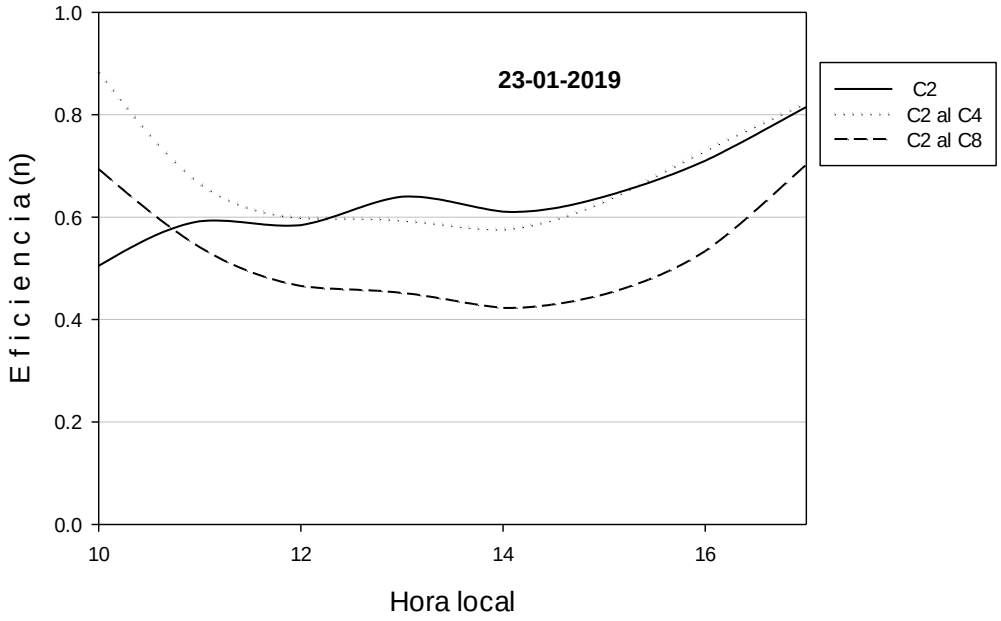


Figura 3.12. Eficiencia horaria de los colectores

La energía colectada durante nueve días de diciembre de 2018 es de 194 MJ en promedio (Figura 3.13.) mientras que las necesidades de calefacción en este mes son de 800 MJ (para 6 h) en promedio, por lo que solo se está captando la cuarta parte de la energía requerida durante este periodo.

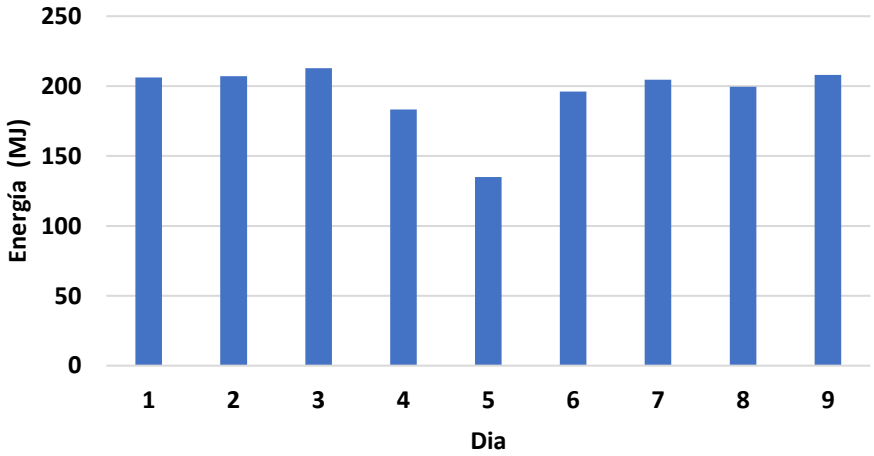


Figura 3.13. Energía captada en los primeros nueve días de diciembre, 2018

3.5 Conclusión

El uso de captadores solares de alta eficiencia permite una mayor explotación del recurso solar disponible en la zona.

La desventaja de este tipo de colectores solares es el alto costo, por lo que los colectores solares de placa plana aún son los más usados dado su bajo costo de inversión inicial.

Indirectamente, este tipo de captadores solares permite potencializar la producción durante periodos de baja temperatura en el año. Sin embargo, en condiciones críticas, cuando la temperatura ambiental está por debajo de los 5°C, es necesario incrementar la cantidad de colectores solares para suplir las necesidades de energía/calefacción al invernadero.

3.6 Literatura citada

Bérriz, L. y Álvarez, M. (2008). Manual para el cálculo y diseño de calentadores solares. Ed. cubasolar. La Habana, Cuba. 165 p.

Bot, G. (2003). The solar greenhouse; technology for low energy consumption. Acta Hort 611. DOI: 10.17660/ActaHortic.2004.633.2

Chel, A. y Kaushik, G. (2011). Renewable energy for sustainable agriculture. Agron Sustain Dev. 31: 91-118. DOI: 10.1051/agro/2010029

Cuce, E., Harjunowibowo, D. y Cuce, P.M. (2016). Renewable and sustainable energy saving strategies for greenhouse systems: A comprensive review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 64: 34–59. DOI: 10.1016/j.rser.2016.05.077

Duffie, J. y Beckman, W. (2006). Solar engineering of thermal processes. Ed. Wiley, New Jersey.

Fitz-Rodríguez, E., López-Cruz, I. L., Salazar-Moreno, R., Rojano-Aguilar, A., Rosales-Vicelis, J. E., & López-Díaz, J. H. (2017). Analysis of air temperature profile on a solar heated greenhouse with CFD. Greensys 2017- International Symposium on New Technologies for Environment Control, Energy-Saving and Crop Production in Greenhouse and Plant Factory. Beijing, China. 2017. DOI: 10.17660/ActaHortic.2018.1227.11

García, J.; De la Plaza, S.; Navas, L.; Benavente, M. y Luna, L. (1998). Evaluation of the feasibility of alternative energy sources for greenhouse heating. J. agric. Engng Res. 69: 107-114. DOI: 10.1006/jaer.1997.0228

Ge, T.; Wang, R.; Xu, Z.; Pan, Q.; Du, S.; Chen, X.; Ma, T.; Wu, X.; Sun, X. y Chen, J. (2018). Solar heating and cooling: Present and future development. Renewable Energy 126: 1126-1140. DOI: 10.1016/j.renene.2017.06.081

Hanan, J. (1997). Greenhouses: Advanced Technology for Protected Horticulture. CRC Press.

Joo, H. y Kwak, H. (2017). Experimental analysis of thermal performance according to heat pipe working fluids for evacuated tube solar collector. Heat Mass Transfer 53: 3267–3275. DOI: 10.1007/s00231-017-2029-0

Kalogirou, S. (2009). Solar energy engineering: processes and systems. 1ra. Edición. Elsevier.

Mattas, K.; Grafiadellis, M.; Papanagiotou, E. y Martica, M. (1990). Evaluating the effectiveness of the passive solar system for heating greenhouses. Acta Hort. 263: 97-101

Salazar-Moreno, R., Cruz-Meza, P. y Rojano-Aguilar, A. (2012). Eficiencia en el uso de la energía en invernaderos mexicanos. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 4: 736-742.

Sánchez, M.A. (2012). Energía solar térmica. Ed. Limusa. México. 232 p.

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2011).

Shrestha, D. S. (1998). Energy use efficiency indicator for agriculture.

von-Zabeltitz, C. (1986). Greenhouse heating with solar energy. Energy in Agriculture 5: 111-120. DOI: 10.1016/0167-5826(86)90012-4

CAPÍTULO 4 . DISEÑO Y EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN HIDRÓNICO POR SUELO RADIANTE

José H. Lopez-Diaz[1]; Efrén Fitz-Rodríguez[1*]; Irineo L. Lopez-Cruz[1]; Raquel Salazar-Moreno[1].

[1]Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco, km 38.5, Chapingo, Estado de México, C.P. 56230, México.

Correo-e: efitz@gmail.com tel.: 01 595 952 1500 ext. 6253 (*Autor de correspondencia)

4.1 Resumen

La calefacción de invernaderos es una de las principales preocupaciones de los productores cuando se produce en los meses más fríos del año, debido al alto costo de los energéticos. Existen varios tipos de calefacción, siendo los de suelo radiante uno de los más eficientes. Este sistema consiste de tuberías enterradas en el suelo donde circula agua caliente. Generalmente estos sistemas tienen una inversión elevada, pero por su eficiencia y bajo costo de operación y mantenimiento, la inversión se recupera a mediano y largo plazo. En esta investigación se implementó un sistema de calefacción hidrónico por suelo radiante. Dicho sistema fue instalado en un invernadero ubicado en la Universidad Autónoma Chapingo, México. De acuerdo con datos experimentales con el sistema de calefacción se logró incrementar la temperatura del invernadero en 4 °C, en comparación con la temperatura del aire exterior.

Palabras clave: sistema hidrónico, calefacción solar, agricultura sustentable, energías renovables, agricultura en ambientes controlados.

4.2 Introducción

Para que un cultivo tenga una producción de calidad y alto rendimiento se requiere proveer las condiciones ambientales, hídricas y nutrimentales adecuadas, además de un manejo apropiado. La temperatura del aire es la variable climática más importante (Bailey, 2006), por lo que se debe de tener sistemas de calefacción/enfriamiento adecuados, correspondientes con las condiciones climáticas externas. Una de las ventajas que ofrece la calefacción es la capacidad de acelerar el desarrollo y crecimiento de los cultivos, además de poder adelantar la producción. Sin embargo, estos sistemas representan

una restricción económica para el productor debido a los elevados precios de la energía (C. von Zabeltitz, 1986).

Los métodos de calefacción más ampliamente utilizados en invernaderos incluyen: 1) calefacción por aire y 2) sistemas de circulación de agua caliente que se distribuye por una red de tuberías, que pueden tener de diferentes materiales y configuración. El sistema de calefacción por piso radiante es uno de los preferidos por muchos productores, ya que permite una distribución uniforme de la temperatura dentro del recinto. Además, no obstruye las labores del cultivo ni provoca sombra sobre las plantas (Emeish, 1999). A pesar de que es uno de los sistemas más eficientes, no logra cubrir al 100 % la demanda de calefacción en temporadas frías, proporcionando más bien un clima relativamente frio (Wang et al., 2017).

- **Suelo radiante**

El sistema de suelo radiante (Figura 4.1) usa el suelo del invernadero como un radiador gigante que intercambia calor con el aire, por medio de tuberías enterradas a una profundidad de 5 a 15 cm., se hace circular agua caliente. El calor del agua se transfiere a través del tubo hacia el suelo y eventualmente, al aire dentro del invernadero (Emeish, 1999). Los tubos pueden ser de cobre o acero, sin embargo, los costos elevados y a la posible corrosión de estas, conllevan a la utilización de materiales no metálicos. (Cuadro 4.1).

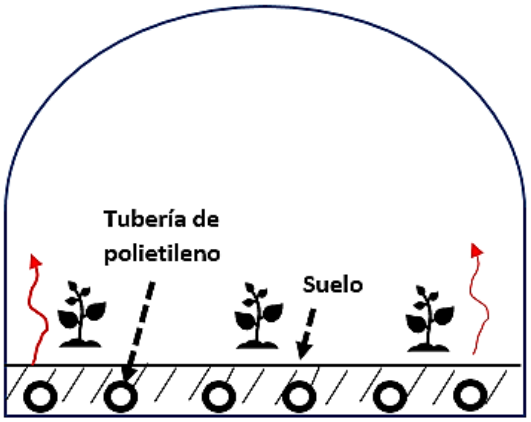


Figura 4.1. Suelo radiante

Cuadro 4.1. Materiales comunes usados para conducir agua caliente con fines de calefacción.

Material	**Usos**	**Ventajas**	**Conductividad térmica ($Wm^{-1}K^{-1}$)**
1. Polibutileno	Conducciones de fontanería y calefacción.	Bajo costo de instalación, resiste alta presión	0.22
2. Polipropileno (ppr)	Abastecimiento y suministro de agua doméstica, agrícola e industrial (fría y caliente), climatización	Bajo costo de instalación y mantenimiento, alta presión y temperatura	0.23
3. Polietileno de baja densidad (LLDPE)	Conducción de agua doméstica y riego	Bajo costo del material e instalación	0.38
4. Polietileno reticulado (PEX)	Calefacción, cañerías de aguas domésticas, aislamiento de cables eléctricos de alta tensión.	Fácil instalación, temperaturas de 90°C.	0.35-0.38

La conductividad térmica del cobre es de 407 $Wm^{-1}K^{-1}$

4.3. Materiales y métodos

El sistema de calefacción por piso radiante se instaló en un invernadero de 300 m^2 ubicado en la Universidad Autónoma Chapingo en el área del Centro Demostrativo de Energías Alternativas y de Biosistemas (coordenadas 19°29’28.54” N y 98°53’ 36.31” O). Para la distribución de energía se usó: 1) una red de tuberías de polietileno de baja densidad de 1” de diámetro, 2) una bomba de 270 W para la impulsión del agua caliente. El sistema se instrumentó para el monitoreo y control del sistema.

4.3.1 Diseño del sistema de calefacción por piso radiante

Para diseñar el sistema de calefacción por piso radiante se siguió la metodología usada por Emeish (1999), el cual plantea tres pasos que consisten en:

a) Determinar los requerimientos de calefacción del invernadero
b) Determinar la temperatura máxima del suelo.

c) Calcular el diámetro, longitud, profundidad y espaciamiento de los tubos de circulación de agua caliente.

a) Requerimientos energéticos del invernadero

Existen varios métodos para calcular el consumo de energía diaria, mensual o anual para edificios, tal como la metodología propuesta por: Aldrich y Bartok (1994), Hellickson y Walker (1993) y Hannan (1997). Sin embargo, se siguió el método de grado-hora propuesto por Satman y Yalcinkaya (1999) y que es uno de los más simples.

Los grados-hora se calculan sumado las diferencias por hora entre las temperaturas del bulbo seco y las temperaturas objetivo, "set-point" (Coskun, 2009). Esta suma se extiende al periodo que se pretende analizar y los valores de la diferencia de temperatura se toman para intervalos de tiempo fijos, generalmente cada hora (Castro-López et al., 2010). El método supone que la temperatura ambiente es constante durante los intervalos de tiempo de una hora, y por lo tanto la cantidad de calor por transmisión que fluye a través de la estructura del edificio durante este periodo es:

$$Q = U \cdot A_c \cdot \left(T_{sp} - T_{out}\right) \tag{4.1}$$

Donde: U – es el coeficiente global de transferencia de calor de la cubierta del invernadero, $W \cdot m^{-2} \cdot °C^{-1}$; A_c – es el área total superficial de la cubierta del invernadero, m^2.; T_{sp} – es la temperatura objetivo (o set-point), °C y T_{out} – es la temperatura del bulbo seco del aire exterior, °C.

El valor de U depende de la velocidad del viento (Cuadro 4.2).

Cuadro 4.2. Valores de U en función de la velocidad del viento

Material	Velocidad (mph)					
	0	5	10	20	25	30
Vidrio	0.765	0.951	1.040	1.140	1.160	1.180
Fibra de vidrio	0.695	0.865	0.949	1.034	1.058	1.078
Polietileno simple	0.810	1.000	1.090	1.190	1.210	1.230
Polietileno doble capa	0.535	0.631	0.675	0.716	0.728	0.736

Adaptado de Rafferty, 1998

Formalmente, los grados hora (HDH) puede calcularse como:

$$HDH = \sum_{i=1}^{n}(T_{sp} - T_{out}) \quad (4.2)$$

Esta ecuación es válida solo para el caso de calentamiento, donde para cada $T_{out} < T_{sp}$. La temperatura objetivo, T_{sp}, se seleccionó de acuerdo al cultivo. Para la aplicación del método grados-hora se requiere conocer la variación horaria de temperatura del ambiente exterior, para esto, se puede usar registros históricos de temperatura o usar modelos matemáticos estadísticos, que pueden generar dicha información a partir de los datos climáticos y geográficos disponibles de la región.

Una vez determinado el HDH se obtiene la energía necesaria por metro cuadrado de superficie expuesta para mantener el invernadero de la temperatura fijada, o bien, la óptima para el cultivo, de acuerdo con la Ecuación 4.3

$$Q_T = U \cdot A \cdot HDH \quad (4.3)$$

Donde: Q_T – es la cantidad de energía necesaria para mantener al invernadero a la temperatura objetivo, J·m^{-2}.

- **Pérdidas por infiltración**

Generalmente la infiltración se analiza mediante el método del intercambio de aire. Este método está basado por el número de veces por hora (N) que el aire del invernadero es reemplazado por aire del exterior. El N está en función de la velocidad del viento, la estructura del invernadero y las temperaturas del interior y exterior (Emeish, 1999). Algunos valores de N se pueden consultar en Raffery (1998).

Después de seleccionar un valor apropiado de N y conocido el volumen del invernadero se pueden calcular las perdidas por infiltración usando la Ecuación 4.4:

$$Q_i = V \cdot N \cdot C_p \cdot \rho \cdot (T_{s-p} - T_{out})/1000 \quad (4.4)$$

donde:

Q_i – es la perdida por infiltración, W; V – es el volumen del invernadero, m^2; Cp – es el calor especifico del aire, $J \cdot kg^{-1} \cdot °C^{-1}$; ρ –es la densidad del aire, $kg \cdot m^{-3}$

Sumando las perdidas por transmisión e infiltración, se obtienen las pérdidas totales, Ecuación 4.5:

$$Q = Q_t + Q_i \tag{4.5}$$

A continuación, se presentan los datos requeridos (Cuadro 4.3 y 4.4) para determinar la necesidad de calefacción. Se usan datos del registro histórico de 2003-2011 de Chapingo, México (Fitz-Rodríguez, 2017) en donde la temperatura mínima promedio registrada es inferior a los 5°C en diciembre y enero y entre 5°C a 13°C en el resto de los meses. Por lo tanto, la temperatura de diseño se usa el de 5°C. Con dicha temperatura, se necesita que el sistema de calefacción aporte por lo menos **30 kW**, **123.6 $W \cdot m^{-2}$** ó **102,526.5 $BTU \cdot h^{-1}$.**

Cuadro 4.3. Datos necesarios para el cálculo de necesidades de calefacción

1-	**Clima exterior**	
a-	Temperatura (°C)	5
b-	Velocidad del viento (m/s)	2
c-	Densidad del aire (kg/m3)	1.1
d-	Cp del aire (J/kg·°C) (5°C)	1006

2. Pérdidas por infiltración		
		Calor perdido (W)
ACH	1	11066

Cuadro 4.4. Pérdidas de calor por transmisión

3-	**Invernadero**	
a-	Temperatura deseada (°C)	10
b-	Volumen (m^3)	2000
c-	Pared norte	Policarbonato
d-	Paredes	Polietileno
e-	Techo	Polietileno
f-	Tasa de intercambio de aire	1
c1-	Pared norte (m^2)	66.8
d1-	Pared sur (m^2)	66.8
e1-	Pared este (m^2)	150
f1	Pared oeste (m^2)	150
g1	Techo (m^2)	345

4. Perdidas por transmisión			
Sección	Área (m^2)	U (W/m^2K)	Calor perdido (W)
Techo	345	5	8625
P. sur	66.8	5	1670
P. este	150	5	3750
P.oeste	150	5	3750
P. norte	66.8	3.5	1169
		Total	18964
Pérdida total (W)	**30030**		

b) Determinación de la temperatura máxima del suelo

El flujo de calor desde el suelo está en función de la temperatura del suelo y aire del interior del invernadero principalmente. El flujo de calor desde el suelo se lleva a cabo por dos mecanismos: convección y radiación.

La relación entre pérdida de calor del invernadero, $\boldsymbol{Q}$, y el área superficial del piso del invernadero, se puede establecer mediante la siguiente relación (Emeish, 1999):

$$\frac{Q}{A_p} = 0.472\left[\left(\frac{1.8T_p+492}{100}\right)^4 - \left(\frac{1.8TPS+492}{100}\right)^4\right] + 2.186(T_p - T_i)^{1.32} \quad (4.6)$$

donde:

A_p - es el área superficial del piso, m^2; T_p - es la temperatura del piso o suelo, °C; TPS - es la temperatura promedio de las superficies de los objetos que hay dentro del invernadero, °C; y T_{in} -es la temperatura del aire interior.

De la ecuación anterior se puede despejar, Tp, para conocer la temperatura del piso, o bien, se puede determinar usando simulación con Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Tal como lo reporta Zenteno (2013) al simular el campo 2D de temperatura del suelo alrededor de tubos en sistemas de colección de energía geotérmica de baja entalpia.

Usando la ecuación 4.6 y el requerimiento energético para la hora más crítica (**123.6 W·m^{-2}**) se puede calcular la temperatura del suelo necesaria para cubrir la demanda energética, de acuerdo con los cálculos, debe ser de alrededor de **17 °C**.

Para determinar experimentalmente la variación de la temperatura del suelo se usaron tres sensores PT100. Estos se colocaron a diferentes profundidades (Figura 4.2).

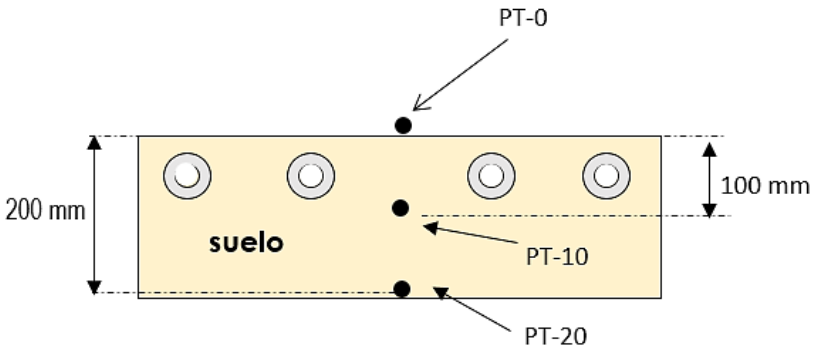


Figura 4.2. Ubicación de los sensores de temperatura en el suelo.

c) Cálculo del diámetro, longitud, profundidad y espaciamiento de los tubos de circulación de agua caliente.

La profundidad a la que se entierran los tubos generalmente solo está en función del tipo de actividades que se llevará a cabo en el invernadero para proteger los tubos de daños físicos. En este proyecto, la tubería se enterró a 5 cm de profundidad y se usaron tubos de polietileno de 25.4 mm de diámetro interior (Figura 4.3).

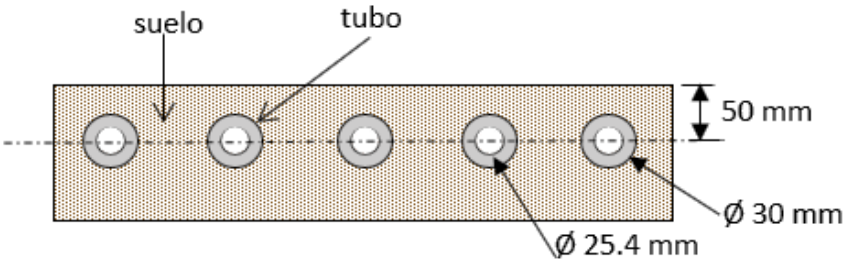


Figura 4.3. Perfil vertical de la ubicación de la tubería en el suelo del invernadero

El cálculo de la longitud total de tubería requerida para cubrir las necesidades de calefacción, se realizó por la Ecuación 4.7.

$$\boldsymbol{L = \frac{Q \cdot ln\left[\left(8 \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^2 - 1\right) + 4\left(\frac{H}{D}\right) \cdot \sqrt{4\left(\frac{H}{D}\right)^2 - 1}\right]}{4 \cdot \pi \cdot k_s \cdot t_m}} \quad (4.7)$$

donde:

L – es la longitud de la tubería, m; H – es la profundidad de los tubos respecto la superficie del suelo, mm; D – es el diámetro exterior del tubo, mm; k_s – es la conductividad térmica del suelo, $W \cdot m^{-1} °C^{-1}$; y t_m – es el logaritmo de la diferencia de temperaturas del agua entre la entrada y salida de la red de tubería, °C.

y

$$\boldsymbol{t_m = \frac{T_{iw} - T_{ow}}{ln\left(\frac{T_{iw} - T_s}{T_s - T_{iw}}\right)}} \quad (4.8)$$

donde:

T_{iw} – es la temperatura del agua cuando entra a la red de tuberías, °C; T_{ow} – es la temperatura del agua cuando sale de la red de tuberías, °C y T_s – es la temperatura de suelo, °C. En los sistemas de calefacción siempre se cumple que $T_{ow} < T_{iw}$.

Finalmente se determinó número de tubos necesarios para cubrir la longitud obtenida, L, asumiendo que el arreglo es paralelo respecto a la longitud del invernadero como el mostrado en la Figura 4.3, se usa la ecuación 4.9.

$$\boldsymbol{n = \frac{L}{L_g}} \quad (4.9)$$

donde:

n – es el número de tubos, adim.; L – es la longitud total de la tubería, m; y L_g – es la longitud del invernadero.

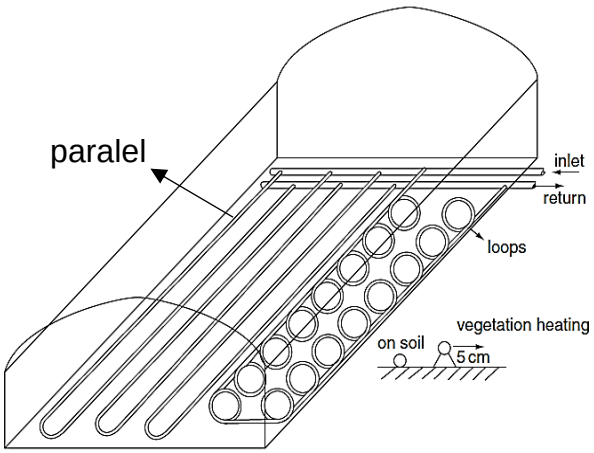


Figura 4.4. Configuración de la tubería en el suelo, paralelo o en forma de bucle

De acuerdo a las ecuaciones 4.7 y 4.8, la longitud de tubería que debe de contener el piso radiante para cubrir las necesidades de calefacción cuando la temperatura exterior es de 5°C debe ser de por lo menos **730 metros**.

La longitud de la tubería depende de varios factores que difícilmente se pueden controlar por lo que únicamente se puede manipular la temperatura del agua en la entrada del sistema, la profundidad, el diámetro de los tubos y el arreglo de estos**.**

El arreglo de la tubería que se instaló en el invernadero se muestra en la Figura 4.4, está formada por 1,100 metros de longitud (L), una longitud superior a lo calculado. Se usó tubería de polietileno de baja densidad, dividida en tres secciones principales (Sección 1-3) a lo largo del invernadero, cada sección mide 9 metros de ancho y largo, la separación de los tubos es de 25 cm en promedio y está distribuida forma de serpentín.

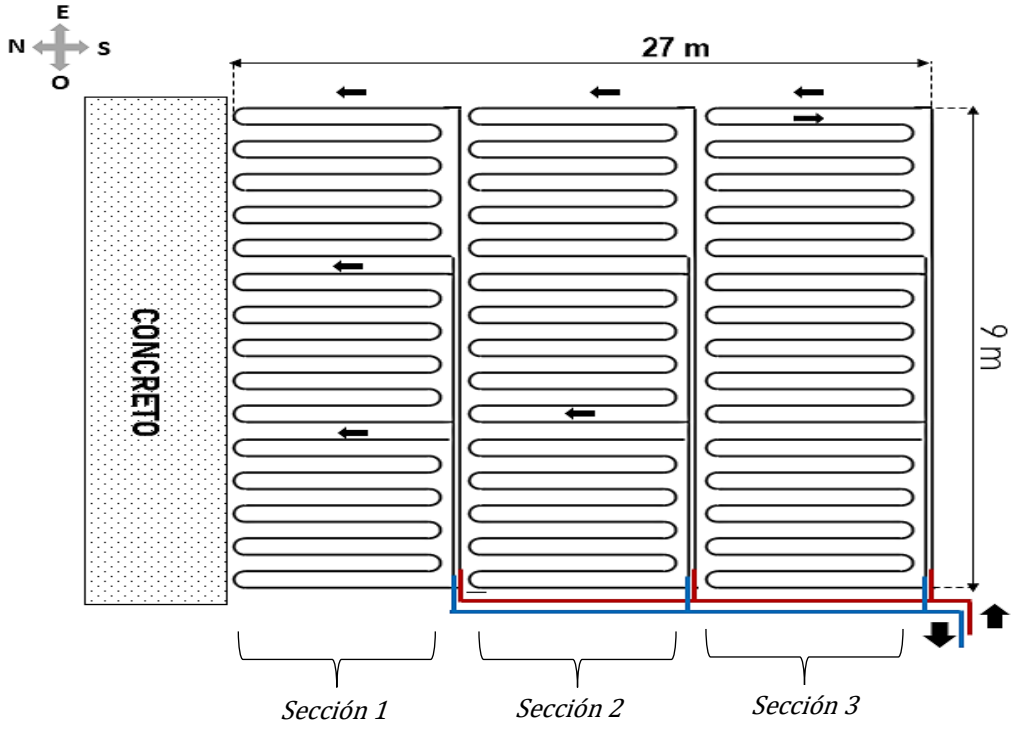


Figura 4.5. Red de tubería instalada en el invernadero

4.4 Resultados y discusión

De acuerdo con datos registrados, se presentan los días con temperaturas más bajas de cada mes del 2018. Se indica la temperatura objetivo para el cultivo (set-point, 15-18°C para jitomate) en cada grafica

Se observa que la temperatura ambiente dentro del invernadero, durante las cuatro estaciones del año, está muy por debajo de la zona de confort. (Figuras 4.6 y 4.7).

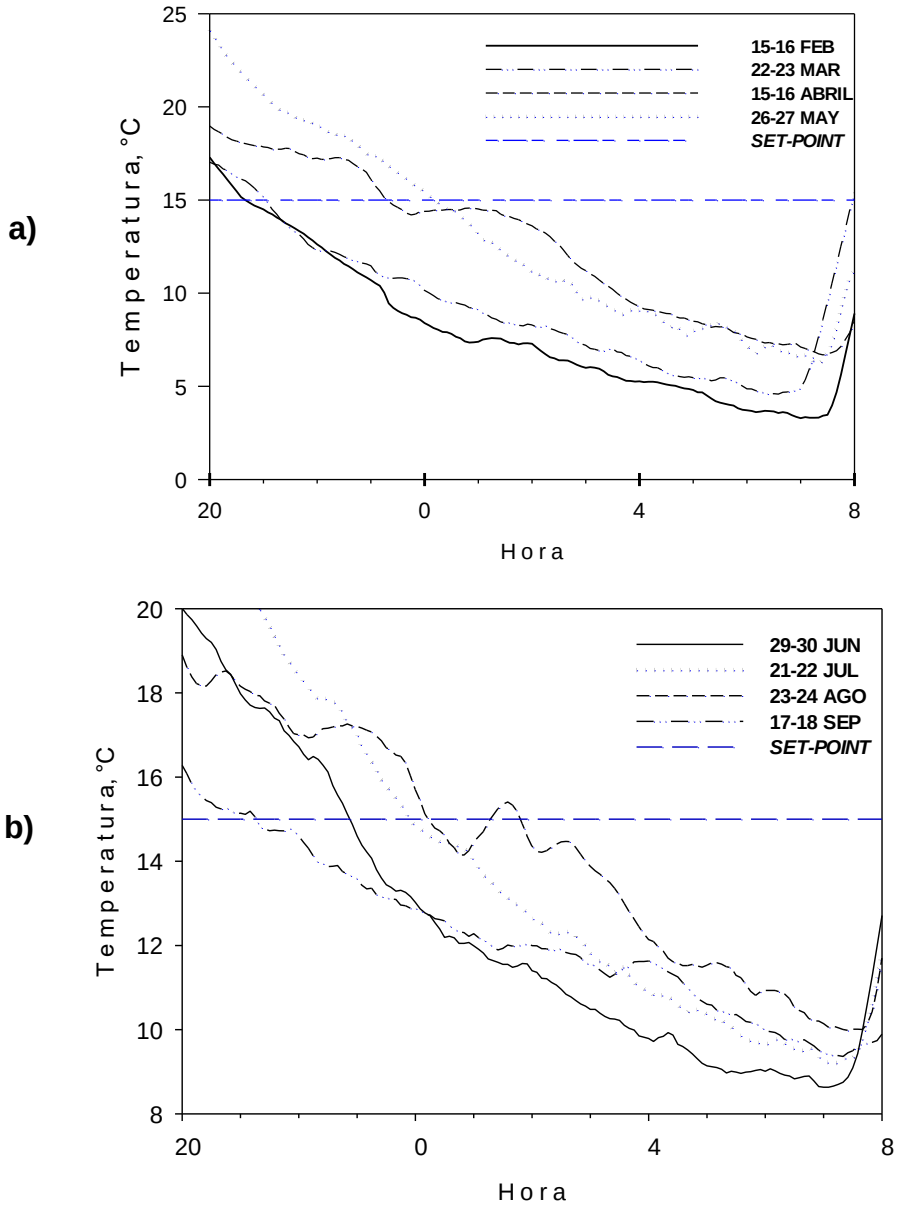


Figura 4.6. Temperatura de la noche más fría de: a) febrero, marzo, abril y mayo; b) junio, julio, agosto y septiembre, 2018

Las temperaturas críticas y que provocan daños en el cultivo se presentan en los meses de noviembre, diciembre y enero (Figura 4.7). Hay periodos en que se alcanzan temperaturas inferiores a 0°C. Las necesidades de calefacción son mucho mayores en estos meses, por lo que un sistema de calefacción solar por suelo radiante podría no ser suficiente, de tal manera que se requiere un sistema auxiliar tal como un calefactor de aire a gas.

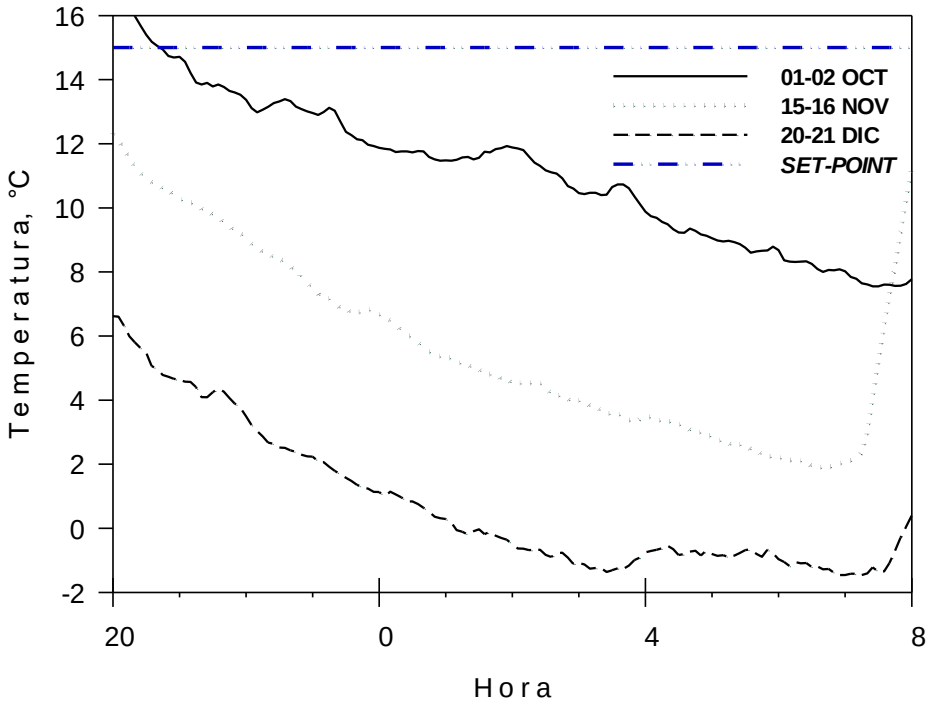


Figura 4.7. Temperatura del aire interior durante las noches más frías de: octubre, noviembre y diciembre, 2018.

La pérdida de energía (trasferida al suelo y ambiente del invernadero) del agua que pasa por las tuberías en el suelo radiante, se determina por la diferencia de temperatura (Figura 4.8) del agua en la entrada (1a y 2a) y salida (1b y 2b) de cada una de las secciones (S1, S2, S3)

La temperatura de entrada en cada una de las secciones (Figura 4.8), es muy similar, y dado que el flujo volumétrico es igual, por lo tanto, las tres secciones del invernadero distribuyen la misma cantidad de energía por unidad de superficie, asegurando la distribución uniforme de energía a lo largo del suelo radiante.

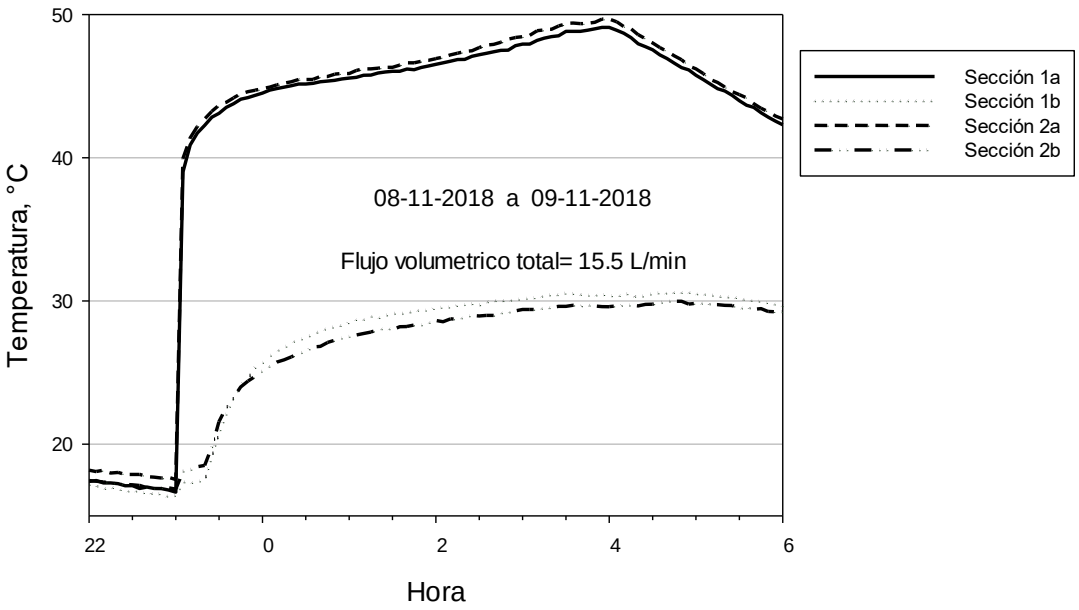


Figura 4.8. Temperatura del agua en la tubería.

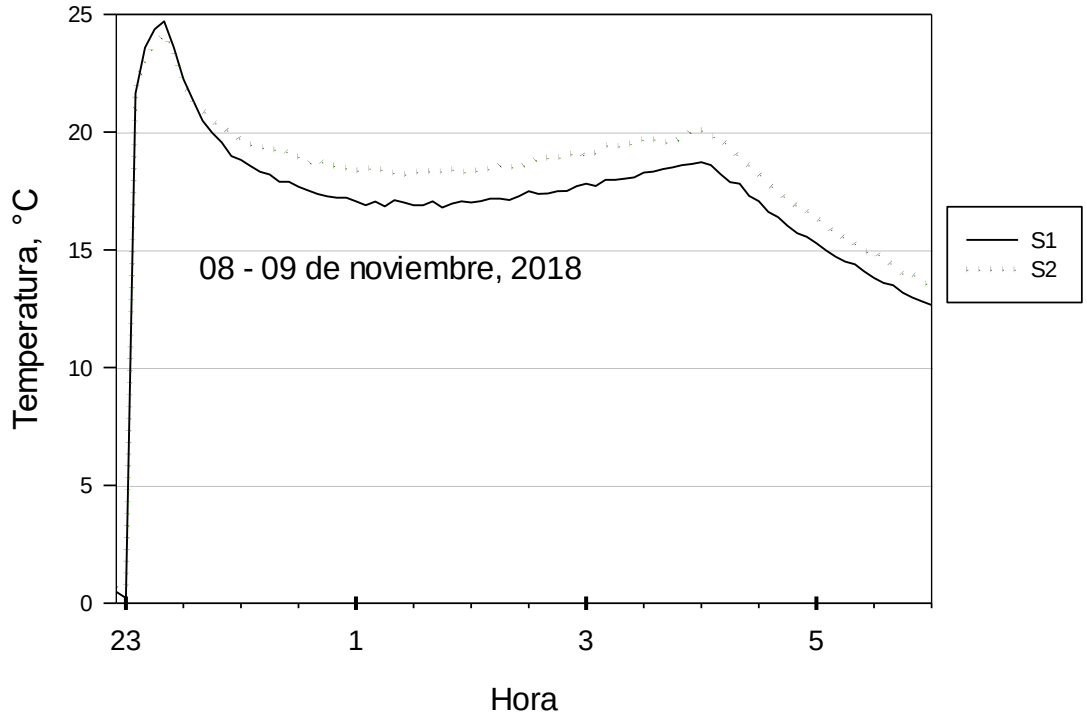


Figura 4.9. Caída de temperatura en las secciones 1 (S1) y 2 (S2)

La temperatura de la superficie del suelo varía ligeramente durante el funcionamiento del sistema de calefacción, la principal razón es porque el calor se libera rápidamente hacia el aire. El cambio de temperatura en el suelo se observa mejor a 10 cm de profundidad, en la Figura 4.10 se observa el aumento de temperatura. Finalmente, a 20 cm de profundidad se mantiene prácticamente constante.

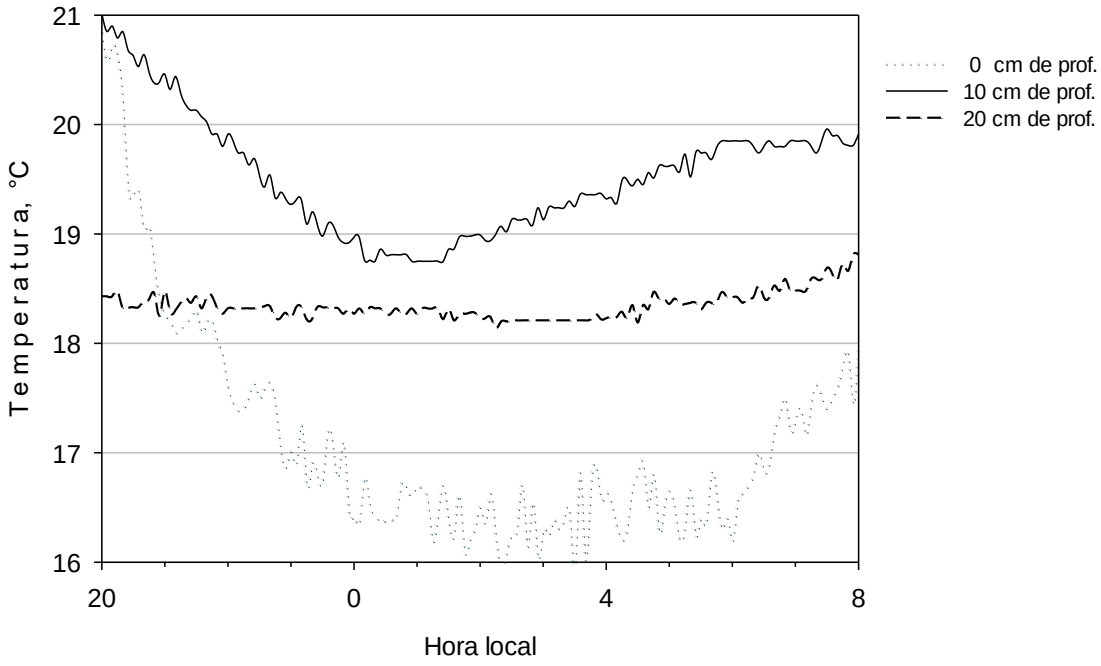


Figura 4.10. Variación de la temperatura del suelo durante la noche con el sistema de calefacción en operación.

En la Figura 4.11 se presenta el efecto del sistema de calefacción en la temperatura del aire del interior del invernadero. La caída de temperatura del aire es más lenta en el interior debido al efecto del piso radiante.

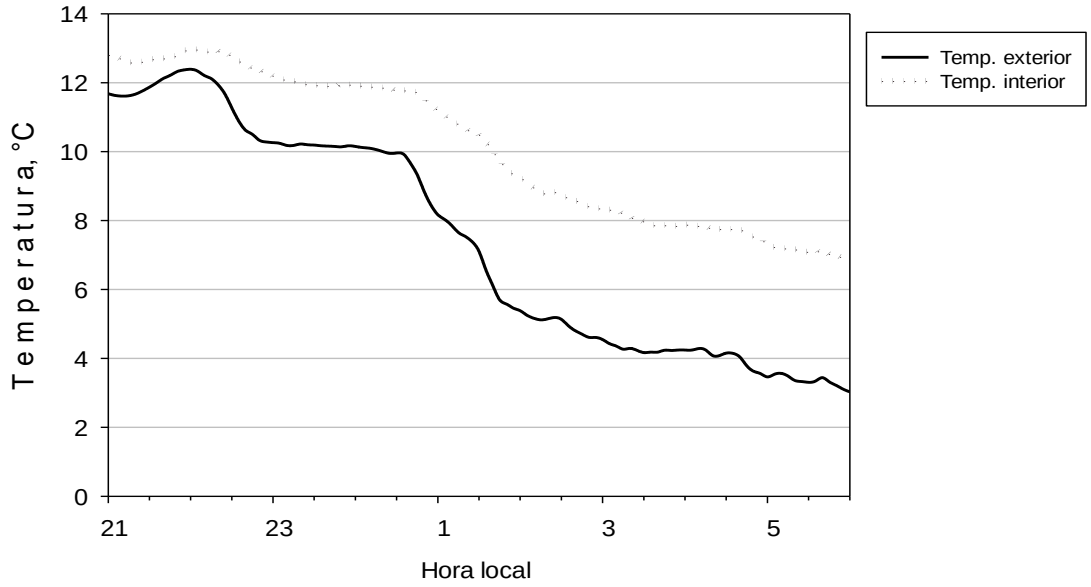


Figura 4.11. Comportamiento de la temperatura interior con el sistema de calefacción en operación.

4.5. Conclusión

(1) La calefacción es uno de los problemas de control ambiental más complejos y dinámicos. Con la finalidad de tener un sistema de calefacción con bajo consumo de energía durante el diseño se deben de tomar en cuenta muchos parámetros tal como: temperatura máxima de la superficie del suelo, la separación y diámetro de los tubos que conducen el agua caliente, uniformidad del flujo de calor, la potencia de la bomba para impulsar el agua caliente, la conductividad térmica y humedad del suelo, entre otros más.

(2) Durante del funcionamiento del sistema de calefacción la temperatura del suelo a 20 cm de profundidad se mantiene constante. El cambio de la temperatura a 10 cm de profundidad es de apenas 1 °C mientras que la temperatura de la superficie se eleva cerca de 2 °C. Esto ocurre cuando el agua circula a 50 °C.

(3) El sistema de calefacción no elevó la temperatura del aire interior, sino que mantuvo la temperatura mientras que la temperatura exterior decrecía.

(4) El sistema de calefacción tarda aproximadamente 1 h para producir un efecto sobre la temperatura del aire, esto implica que se debe de activar mucho antes de que la temperatura alcance la temperatura objetivo.

4.5.1 Futuros trabajos

Se colocarán sensores de temperatura en diferentes puntos y profundidades del suelo para recolectar datos y comparar los resultados con los arrojados de una simulación por el método de las diferencias finitas, y predecir el flujo de calor (sobre y debajo de la red de tuberías), el gradiente de temperatura del suelo y la temperatura superficial del suelo, con la finalidad de mejorar dicho sistema de calefacción y optimizar el uso de la energía disponible.

4.6. Literatura citada

Aldrich, R. y Bartok, J. 1994. Greenhouse Engineering. 3rd revisión. Ithaca, NY: NRAES.

Bailey, B. (2006). Natural and mechanical greenhouse climate control. Acta Hortic. 710: 43-54. DOI:10.17660/ActaHortic.2006.710.2

Castro-López, P.; Burciacinga-Santos, J.; Martín-Domínguez, I. y Alarcón-Herrera, M. (2010). Estimación del requerimiento de energía para calefacción en invernaderos agrícolas, en cuatro ciudades del estado de chihuahua, durante el periodo invernal. XXXIV Semana Nacional de Energía Solar, Guanajuato, México.

C. von-Zabeltitz, C. (1986). Greenhouse heating with solar energy. Energy in Agriculture 5: 111-120.

Coskun, C. (2010). A novel approach to degree-hour calculation: indoor and outdoor reference temperature based degree-hour calculation. Energy 35: 2455-2460. DOI:10.1016/j.energy.2010.02.038

Emeish, M. (1999). Geothermal heating system for jordanian greenhouses. Geothermal training programme. Report No.2.

Hanan, J. (1997). Greenhouses: Advanced Technology for Protected Horticulture. CRC Press.

Hellickson, M. y Walker, J. (1983). Ventilation of agricultural structures. A.S.A.E. monograph no. 6. Editor. James A. Basselman.

Kevin-Rafferty, P.E. 1996. Fossil fuel-fired peak heating for geothermal greenhouses.

Satman, A. and Yalcinkaya, N. (1999). Heating and cooling degree-hours for Tukey. Energy 24: 833–840. DOI: 10.1016/S0360-5442(99)00035-3

Wang, D., Wu, C., Liu, Y., Chen, P. and Liu, J. (2017). Experimental study on the termal performance of an enhanced-convection overhead radiant floor heating system. Energy and Buildings 135: 233–243. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.11.017

CAPÍTULO 5 . ANÁLISIS CFD DEL AMBIENTE NOCTURNO DE UN INVERNADERO CON SISTEMA DE CALEFACCIÓN DE PISO RADIANTE

CHAPTER 5: CFD ANALYSIS OF THE NOCTURNAL ENVIRONMENT IN A GREENHOUSE WITH RADIANT FLOOR

José H. Lopez-Diaz[1]; Efrén Fitz-Rodríguez[1*]; Irineo L. Lopez-Cruz[1]; Raquel Salazar-Moreno[1].

[1]Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco, km 38.5, Chapingo, Estado de México, C.P. 56230, México.

Correo-e: efitz@gmail.com tel.: 01 595 952 1500 ext. 6253 (*Autor de correspondencia)

5.1 Resumen

Producir hortalizas en invernaderos ubicados en zonas templadas, como el Valle de México, presenta el reto durante periodos invernales, cuando las temperaturas ambientales son inferiores a los 5 °C durante las noches y pudiendo ser menores cero. A pesar de que actualmente existen diseños de invernaderos, así como sistemas para un control climático adecuado, los diseños de invernaderos instalados en el territorio mexicano, o son “copiados” o de procedencia extranjera y se hace sin llevar a cabo un rediseño para adaptarlo a las condiciones climáticas del país. Por lo que el objetivo del presente estudio fue analizar el efecto de un sistema de calefacción solar (sistema hidrónico) bajo condiciones ambientales de la región central de México. Para esto se construyó un modelo numérico de Dinámica de Fluidos Computacional para la temperatura del aire del invernadero. De la simulaciones en estado estacionario, realizadas con el software comercial ANSYS Fluent, se obtuvo que la calefacción por piso radiante logra elevar hasta en 5 °C durante el periodo más crítico de más baja temperatura, cuando la temperatura exterior es de 3 °C.

PALABRAS CLAVE: Energía solar, sistema de calefacción solar, tuberías radiantes, sistemas hidrónicos.

5.2 Introducción

La agricultura protegida en México aumentó un 200 % del año 2000 al 2015 de acuerdo a datos presentados por SAGARPA (2016). Esto indica que hay una tendencia creciente hacia la producción de cultivos bajo invernaderos. Sin embargo, la mayoría son pasivos (clasificación según la AMHPAC), es decir, invernaderos que no son automatizados, con cubiertas de polietileno o malla y sin sistemas de enfriamiento o calefacción (Costa y Giacomelli, 2005). Por lo tanto, estos invernaderos están a expensas de los cambios bruscos de clima. Principalmente los ubicados en la parte central de México, donde el clima es templado y las noches invernales son inferiores a los 5 °C. Para evitar daños significativos en el cultivo, es necesario tener un sistema de calefacción que aporte energía térmica durante las horas de mayor vulnerabilidad.

Los sistemas de producción de cultivos en invernaderos ofrecen la ventaja de una alta eficiencia en el uso de los recursos y, potencialmente, también una alta productividad, en comparación con la producción en campo abierto. Sin embargo, estos sistemas requieren altos suministros de energía para su funcionamiento, especialmente los que se consideran de alta tecnología, que pueden incluir sistemas de calefacción y enfriamiento activos y con computadoras que controlan todos los subsistemas (control de clima, nutrientes e irrigación, enriquecimiento de CO_2, luz suplementaria, etc.). Recientemente, debido a la preocupación por el cambio climático y el calentamiento global, existe una creciente inquietud por cómo hacer que los sistemas de producción de cultivos no solo sean más productivos y eficientes, sino también con un menor impacto en el medio ambiente, al hacerlos menos dependientes de los combustibles fósiles. Las energías alternativas, como la solar, la eólica y la geotérmica, se han implementado en sistemas de producción de invernaderos en países desarrollados, sin embargo, no ha habido un solo caso de acoplamiento de sistemas de energía alternativa en invernaderos en México.

Los sistemas de calefacción de suelo se han implementado en sistemas de producción en invernaderos con gran éxito en condiciones invernales severas, y su desempeño se ha modelado mediante modelos numéricos de Dinámica

de Fluidos Computacional (CFD por sus siglas en inglés, Computational Fluid Dynamics) para el caso de pisos de concreto (Reiss et al., 2007), para tubos subterráneos calentados (Rouboa, 2007) y para los tubos de calor artificial (Couto et al., 2012).En dichos trabajos se simularon los rendimientos o eficiencias de los sistemas mediante CFD. Del mismo modo Du et al. (2012) simularon el entorno de invernadero que incluía un sistema de calefacción por tubería radiante. Flores-Velázquez et al. (2015) analizaron el intercambio de energía por convección en un invernadero cerrado equipado con sistemas de calefacción de tuberías. Los resultados más avanzados propusieron un método de control para el clima de invernadero, basado en el modelo de predicción de energía mediante CFD.

La simulación de las condiciones ambientales es una herramienta de gran ayuda en la horticultura moderna (Couto et al., 2012) y se han realizado muy pocos estudios sobre el clima en los invernaderos a gran escala usando sistemas de calefacción mediante tuberías radiantes enterradas, por lo que el objetivo de esta investigación es obtener, mediante simulación CFD, los gradientes verticales de temperatura durante las noches y bajo condiciones climáticas invernales en la región de Texcoco, México.

5.3 Materiales y métodos

Para el análisis numérico en CFD, se instrumentó y se obtuvieron datos de un invernadero vacío (Figura 5.1) de 300 m^2 (10 x 30 m de ancho y largo, respectivamente), ubicado en la Universidad Autónoma Chapingo, México (19.4925 ° N, 98.8873 ° O, a 2 250 m.s.n.m), con una cubierta simple de polietileno, y pared norte de policarbonato. Aunque, como primer enfoque, los resultados no se compararon con las mediciones dentro del invernadero, estos se implementaron utilizando datos climáticos locales para simular las condiciones de operación promedio del invernadero en períodos donde se requiere de calefacción. Para simplificar el análisis no se consideraron las ventilas cenitales y laterales.



Figura 5.1. Invernadero mono-bahía, donde se tomaron los datos experimentales y se realizaron las simulaciones.

4.3.1 Generación del modelo CFD

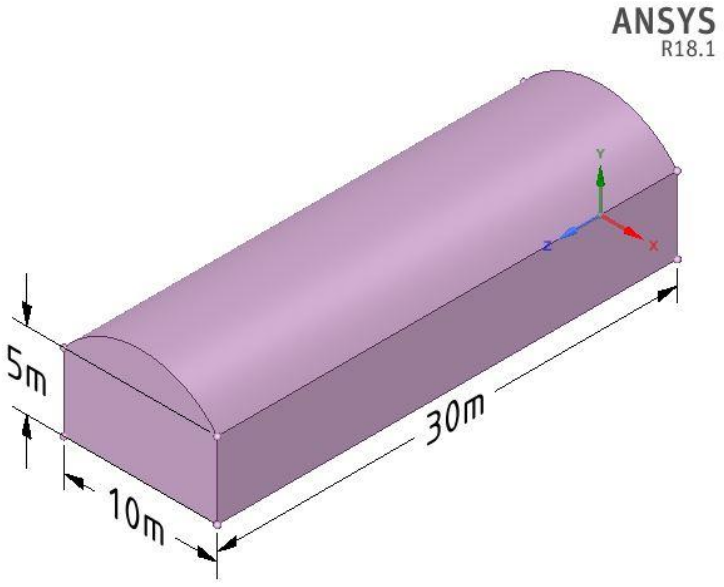
Resolver problemas con Dinámica de Fluidos Computacional usualmente comprende tres etapas: 1) Pre-proceso, 2) solución numérica y 3) post-proceso (Versteg and Malalasekera, 2007).

Pre-proceso

- **Creación de la geometría tridimensional**

Para la simulación se creó una geometría tridimensional (Figura 5.2) mediante la herramienta DMSpace Claim de ANSYS 18.1. Dicha geometría está bastante simplificada, carece de áreas pequeñas, entradas y salidas, ventilas etc.

A.



B.

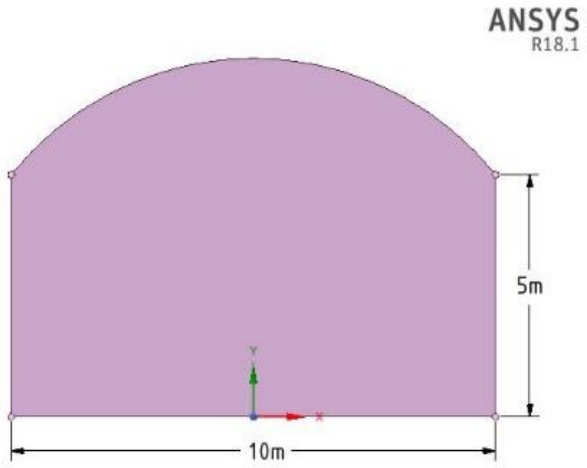


Figura 5.2. Modelo 3D del invernadero. A) Vista isométrica. B) Sección transversal.

Se consideró un dominio circundante alrededor del invernadero para simular el aire del ambiente exterior (Figura 5.3).

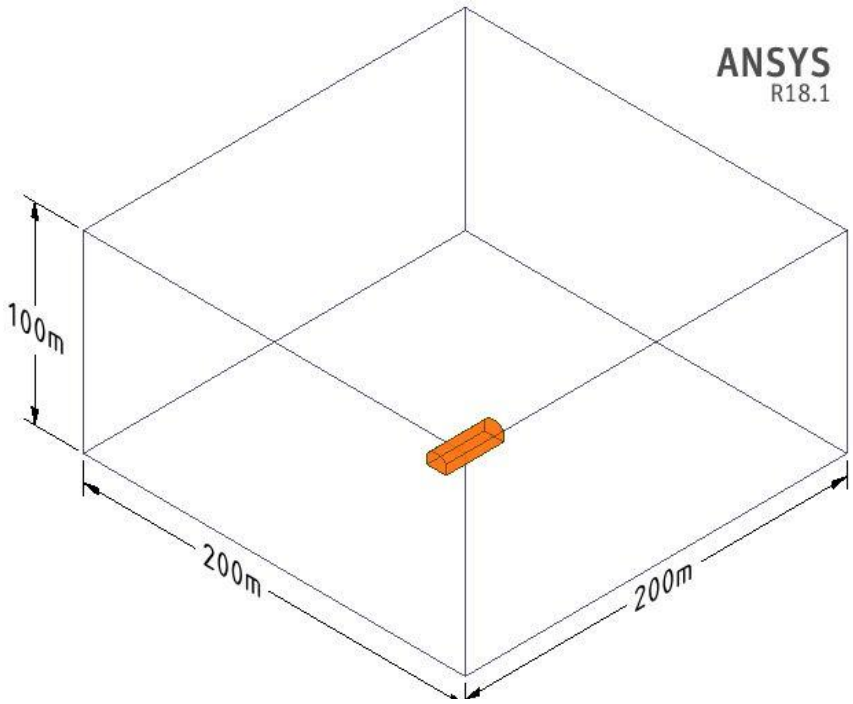


Figura 5.3. Dominio circundante del modelo 3D

- **Discretización espacial**

El objetivo de un código de CFD es la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes para un fluido con unas características determinadas y para una geometría concreta. El código de CFD resuelve dichas ecuaciones en una serie de puntos de la geometría en cuestión mediante métodos numéricos que transforman las ecuaciones diferenciales en ecuaciones algebraicas, proceso que se denomina discretización. Por lo tanto, el primer paso que se da en la resolución de las ecuaciones es la selección de los puntos en los que se llevará a cabo la discretización, operación que se denomina “generación del mallado”. Para generar la malla, el dominio se divide en pequeños subdominios llamados elementos (Figura 5.4), con la finalidad de encontrar la temperatura a lo largo del volumen del dominio.

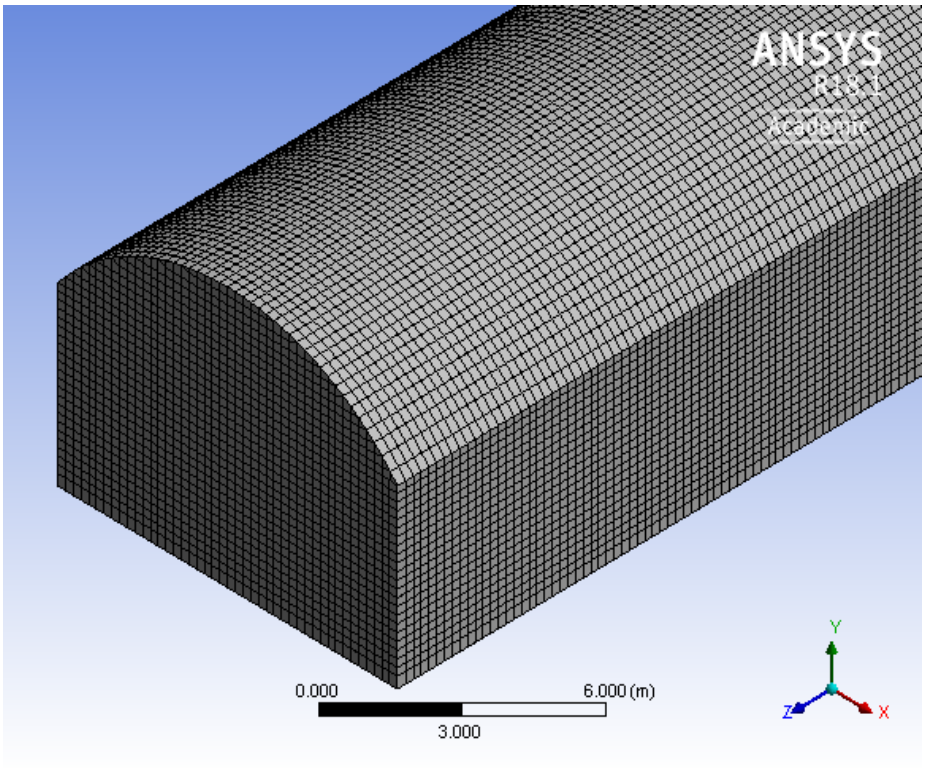


Figura 5.4. Mallado del modelo en ANSYS

Los parámetros usados para el mallado aparecen en Cuadro 5.1.

Cuadro 5.1. Parámetros seleccionados para el mallado del modelo 3D

Sizing	
Size Function	Curvature
Relevance Center	Coarse
Curvature Normal Angle	Default (18.0 °)
Min Size	Default (0.233640 m)
Max Tet Size	Default (29.9060 m)
Growth Rate	Default (1.20)
Minimum Edge Length	5.0 m
Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Smoothing	High
Mesh Metric	Orthogonal Quality
Min	0.34158
Max	1.
Average	0.99404
Standard Deviation	2.7682e-002

Inflation	
Use Automatic Inflation	None
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0.272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1.2
View Advanced Options	No
Assembly Meshing	
Method	CutCell
Feature Capture	Program Controlled
Tessellation Refinement	Program Controlled
Intersection Feature Creation	Program Controlled
Advanced	
Number of CPUs for Parallel Part Meshing	Program Controlled
Statistics	
Nodes	1138787
Elements	1076724

Para la subdivision del dominio computacional y del invernadero se usó el metodo CutCell, dado que presentó mejor calidad en los elementos, los elementos dominantes son los hexaedricos (Figura 5.5)

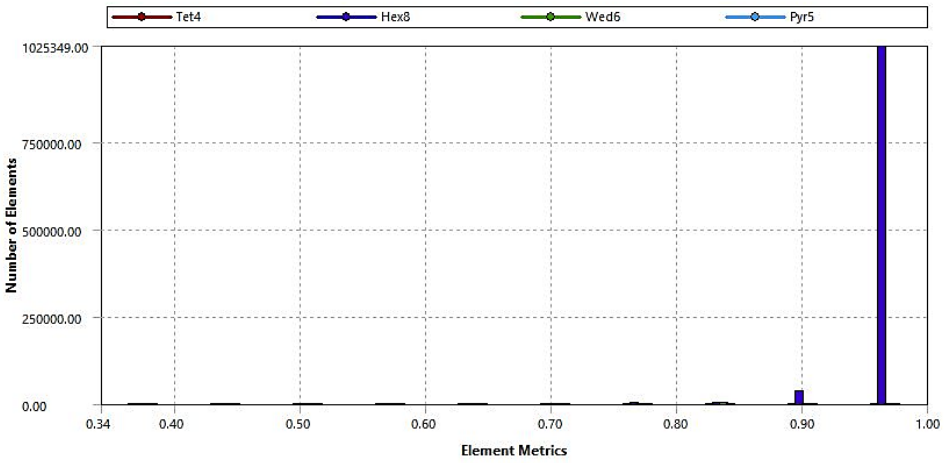


Figura 5.5. Resultado del mallado.

La calidad del mallado es aceptable dado que, la *ortogonalidad* fue de 0.34 como mínimo y 0.99404 de promedio. Mientras que el valor de *Skewness* fue de $1.3057\text{x}10^{-10}$ el mínimo y $4.355\text{x}10^{-3}$ el promedio.

- **Modelo matemático**

Una de las dificultades que se presenta siempre al trabajar con CFD es la selección de un modelo matemático apropiado, en este caso, una ecuación que describa con precisión el flujo o intercambio de calor o energía que hay entre el invernadero y el ambiente exterior. Para ello, hay que considerar que el intercambio se lleva a cabo mediante: 1- radiación térmica del suelo, la atmósfera, el medio ambiente, emitida a través de la estructura del invernadero y la cubierta; 2- convección natural del aire interior.; 3- convección forzada causada por el flujo de viento y 4- conducción a través del suelo y la cubierta.

Para la simulación se consideró un flujo laminar del aire, ya que si se consideran las ventilas el aire interior del invernadero sería turbulento, por lo que se debe llevar a cabo un modelo matemático adecuado que evite el uso de coeficientes de transferencia de calor empíricos. Se utilizan ecuaciones de Navier-Stokes con el modelo k-ε, también debido a que proporciona un tiempo y valores residuales adecuados de CPU (Computing Process Unit) (Costa *et al*, 1999).

Este modelo se implementó en el módulo ANSYS FLUENT v18.1 (ANSYS Inc, Canonsgurg, PA, E.U).

Para simplificar el modelo, se asume un fluido y flujo que no varía en el espacio y tiempo, la densidad del aire es constante e incomprensible; dado que el dominio de interés no será isotérmico, la viscosidad no será constante. Según estas variables, la ecuación de continuidad, las ecuaciones de conservación masa y momento, las ecuaciones de conservación de energía turbulenta y disipada (k-*e*), para un fluido incompresible en coordenadas cartesianas, se escriben en forma simplificada como (Ferziger y Peric, 1999):

$$Div\ U = 0 \tag{8}$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \cdot \nabla U + \nabla \rho \pm \left(v + c_u \frac{k^2}{\varepsilon}\right)(\nabla U + \nabla U') = 0 \tag{9}$$

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho V_x k}{\partial x} + \frac{\partial \rho V_y k}{\partial y} = \frac{\partial\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial x}\right)}{\partial x} + \frac{\partial\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k}\frac{\partial k}{\partial y}\right)}{\partial y} + \mu_t \varphi - \rho\varepsilon + \frac{C_4 \beta \mu_t}{\sigma_t}\left(g_x \frac{\partial T}{\partial x} + g_y \frac{\partial T}{\partial y}\right) \tag{10}$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho V_x \varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial \rho V_y \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right)}{\partial x} + \frac{\partial\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right)}{\partial y} + \mu_t \frac{\varepsilon}{k}\varphi - C^2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k} + \frac{C_1 \beta C_\mu (1-C_3)\rho k}{\sigma_t}\left(g_x \frac{\partial T}{\partial x} + g_y \frac{\partial T}{\partial y}\right) \quad (11)$$

- **Materiales y condiciones iniciales**

En este cuarto paso, del pre-procesamiento, se definieron cuatro materiales: aire (como gas ideal), suelo, polietileno y policarbonato. Las propiedades físicas de cada material se presentan en el Cuadro 5.2.

Cuadro 5.2. Propiedades de los materiales del invernadero usado para la simulación.

Materiales / **Propiedades**	**Aire (@ 5°C)**	**Suelo**	**Polietileno**	**Policarbonato (placa)**
Densidad ($kg \cdot m^{-3}$)	1.27	1500	920	1200
Calor especifico ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	1006	1900	1900	1172
Conductividad térmica **(**$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	0.024	1.2	0.44	0.22

Las entradas primarias que se debe proporcionar para los cálculos de fase discreta en FLUENT son las condiciones iniciales, éstas, definen las posiciones de partida, las velocidades del aire, temperatura del aire interior, la temperatura del aire exterior, así como la tasa de generación de calor del suelo radiante, o bien, la temperatura superficial del suelo.

Se establecieron las siguientes condiciones de operación para el dominio del fluido, es decir, las condiciones del clima exterior:

Presión: 102 000 Pascales.

Aceleración de la gravedad: 9.81 ms^{-2}

Temperatura del aire exterior:

Caso 1: -3°C (temperatura registrada en invierno)

Caso 2: 3°C (temperatura registrada en otoño)

Caso 3: 10°C (temperatura registrada en verano)

- **Métodos de solución**

La segunda etapa del trabajo consiste en llevar a cabo la simulación como tal o el procesamiento. Como se sabe, trabajar con CFD es usar computadoras, ya que nos permite reducir tiempo en los cálculos y aumentar las cantidades de cálculos (iteraciones) en tiempos muy cortos. Para este trabajo, se usó una estación de trabajo con procesador Xeon de 32 núcleos y 128 GB de memoria RAM.

Para resolver las ecuaciones que describen el flujo del fluido de estudio hay que realizar un proceso de cálculo iterativo. Durante el proceso de iteración para obtener la solución del problema, es necesario controlar que el algoritmo de cálculo converja hacia la solución final ya que el código puede no converger, y por tanto, no estabilizarse en ningún valor aunque continúe iterando de forma infinita.

Se usó una simulación estacionaria ya que se desea conocer el comportamiento de la temperatura cuando el sistema se equilibra. Y se usaron 1000 iteraciones, que en algunos casos convergía mucho antes.

Los residuos son una de las herramientas más importantes a la hora de controlar la convergencia durante el proceso iterativo. Éstos, de modo general, representan la diferencia entre los valores de las variables a resolver entre dos iteraciones. Si un código converge, estas diferencias tienden a reducirse hasta alcanzar un valor muy pequeño en el que se estabilizan. En un caso ideal, debería hacerse cero, pero los ordenadores tienen precisión finita, por lo que se puede conseguir que los residuos se estabilicen en torno a seis órdenes de magnitud respecto a los valores iniciales 10^{-6} (precisión simple) o incluso valores próximos a los doce órdenes de magnitud 10^{-12} (precisión doble), pero nunca se conseguirán que se hagan cero. En función del solucionador (solver) que se emplee, los residuos se definen de diferente forma (Zamora, 2016).

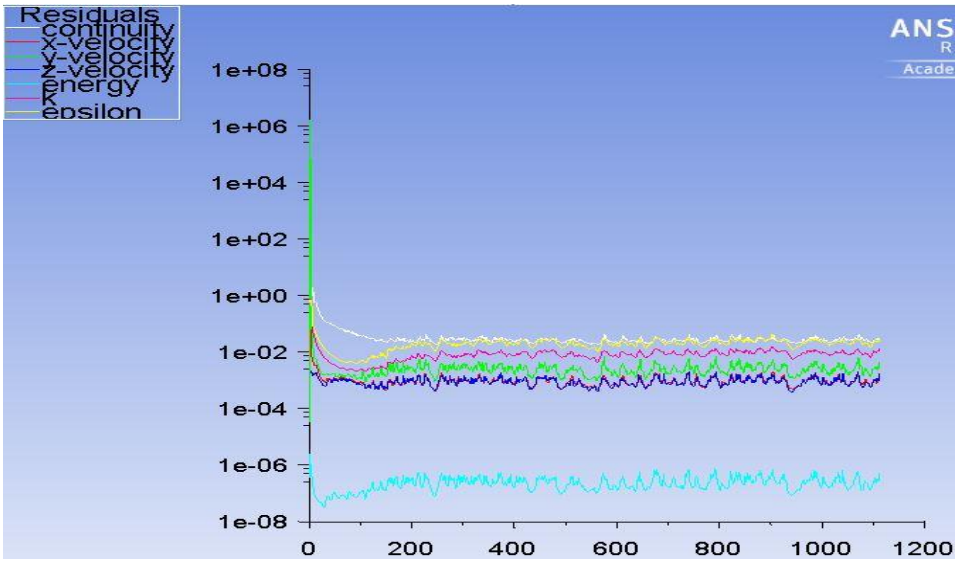


Figura 5.6. Comportamiento de los residuos para 1000 iteraciones

4.4 Resultados y discusión

La tercera etapa de una simulación (post-procesamiento) es cuando los cálculos están completos, esto implica llevar los resultados como: velocidad, presión, densidad, temperatura y entre otros más, a un resultado en forma visual (graficas o animaciones).

A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones. En el primer caso, no se considera ninguna fuente de calor, Figura 5.7, el interior del invernadero es mucho más frio que el exterior, este fenómeno conocido como *inversión térmica* es de hecho uno de los problemas más comunes que se enfrenta el productor principalmente en las noches despejadas, sin nubes. Éste fenómeno aparece una vez que la temperatura del aire exterior empieza a decrecer, generalmente cuando se oculta el sol, y aumenta cuando el invernadero se mantiene completamente cerrado. En verano es recomendable usar el sistema de calefacción para compensar esta diferencia de temperatura, o bien, establecer un control para la apertura de las ventilas para que se lleve a cabo un intercambio controlado entre el aire interior y exterior.

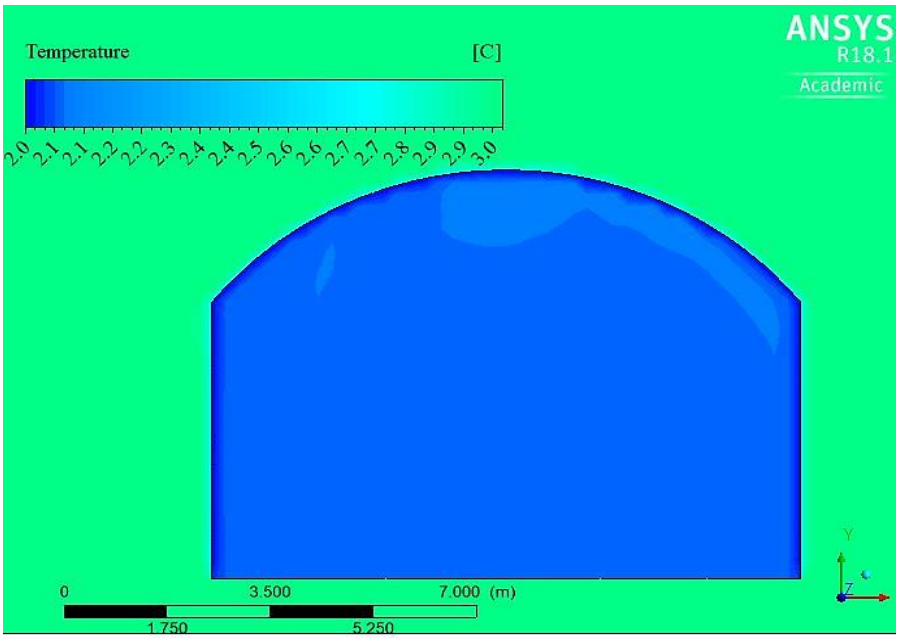


Figura 5.7. Inversión térmica en invernaderos de polietileno.

En las figuras siguientes, se presentan simulaciones cuando el sistema de calefacción está en funcionamiento. El suelo radiante se simuló como una pared que genera calor, o bien, una pared con temperatura constante. Dicha temperatura se obtiene de los datos experimentales. Se observa que la temperatura dentro del invernadero se ve afectada por el sistema de calefacción. Las figuras 5.8 – 5.10 se muestran los perfiles verticales de temperatura simulados.

Se simularon tres escenarios del clima exterior tal como aparecen a continuación, la temperatura del suelo se mantuvo a 17 °C para los tres escenarios:

a) Se fijó a – 3 °C la temperatura del aire exterior dado que en invierno es muy probable llegar a temperaturas bajo cero. La velocidad del viento fue de 0.5 ms^{-1}. En la Figura 5.7 se observa que el suelo radiante logra mantener en promedio 3 °C superior la temperatura del aire del invernadero, en contraste con la del exterior. Un aspecto interesante es que la temperatura del invernadero es casi uniforme en toda la sección transversal.

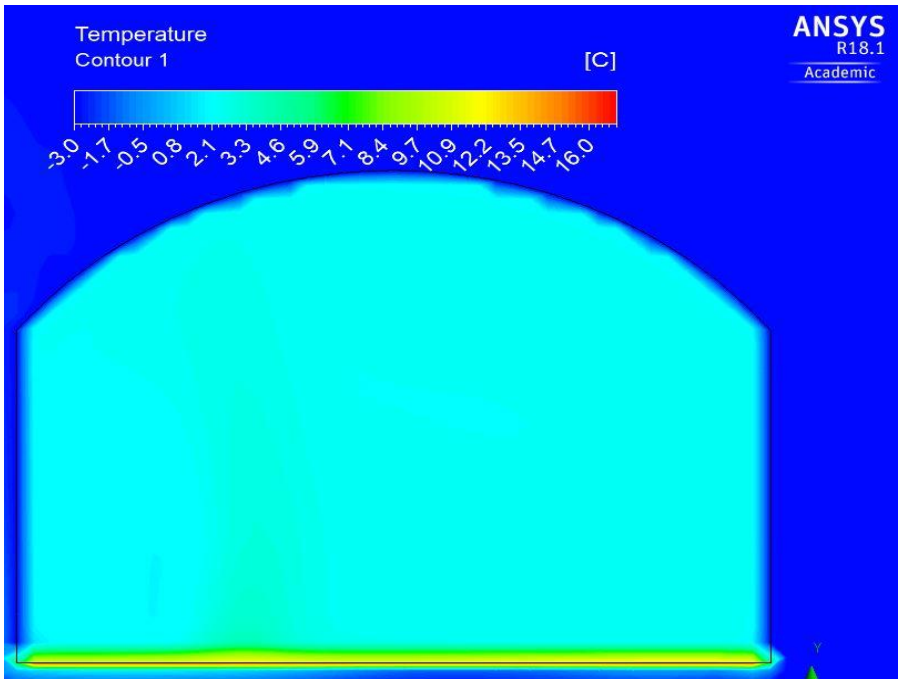


Figura 5.8. Efecto del suelo radiante cuando la temperatura del aire exterior es de – 3 °C. Sección transversal del invernadero.

b) En el siguiente escenario, se simula el comportamiento de la temperatura del invernadero cuando la temperatura exterior es de 3 °C. La diferencia entre la temperatura interior y exterior es de apenas 3°C

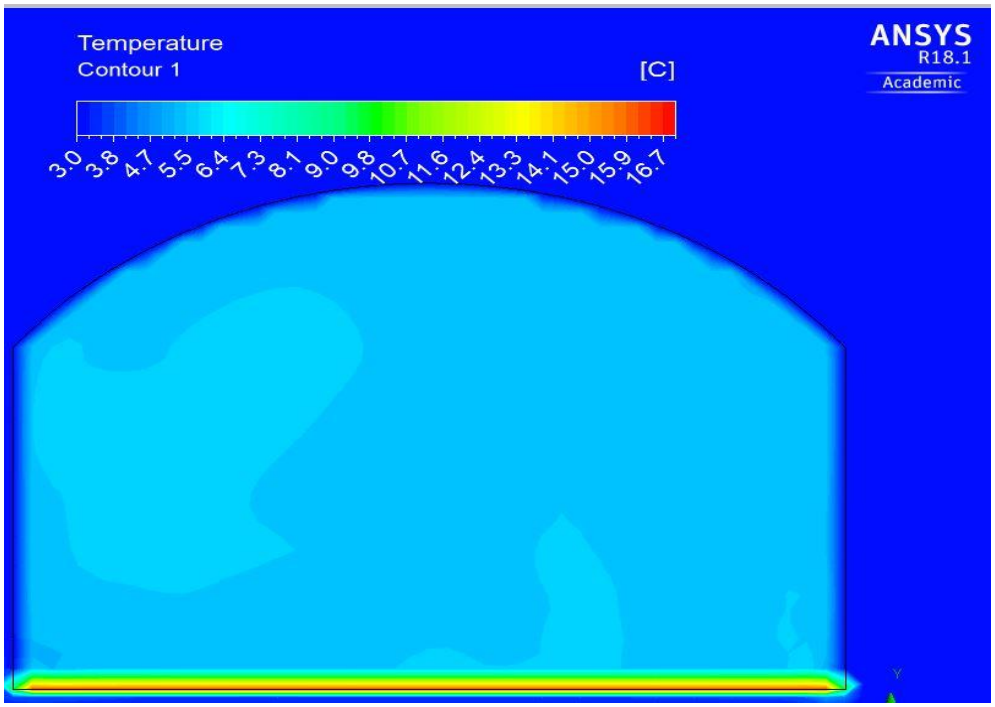


Figura 5.9. Efecto del suelo radiante cuando la temperatura del aire exteriores es de 3°C. Sección transversal.

c) Para el último escenario se fijó la temperatura del aire exterior a 10 °C. Se observa en la gráfica que la temperatura alcanzada en la zona del cultivo es de 15 °C aproximadamente, esto es muy beneficioso para el cultivo, aunque lo ideal y adecuado es alcanzar la temperatura objetivo, 18 °C en el periodo nocturno para el cultivo de tomate rojo, esto se logra cuando se elevar la temperatura del suelo.

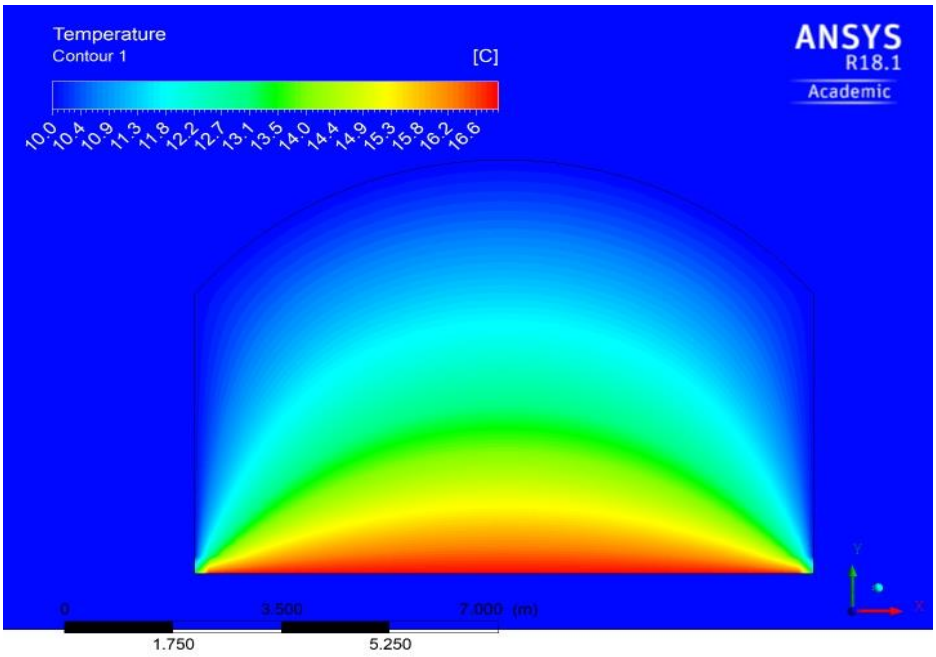


Figura 5.10. Efecto del suelo radiante cuando la temperatura del aire exterior es de 10 °C.

.

4.4.1 Evaluación del modelo CFD

El último paso en el proceso de resolución de un problema con herramientas CFD es determinar si la solución obtenida representativa del fenómeno en estudio, y si los resultados obtenidos con la simulación numérica reproducen adecuadamente los procesos reales.

Generalmente, en la mayoría de los trabajos publicados sobre CFD, el método más utilizado para validar los resultados consiste en comparar los resultados de la simulación con los resultados experimentales, por lo que el siguiente paso para este trabajo es realizar la medición de las temperaturas en varias posiciones a lo largo del invernadero.

4.5 Conclusión

En la literatura, muchos investigadores están trabajando en el análisis del efecto de la ventilación, pero es escaso la cantidad de trabajos que se han hecho sobre el efecto de un sistema calefacción por piso radiante, con tuberías enterradas. Por lo que en este trabajo se simuló el efecto de un suelo radiante y los resultados muestran un ligero aumento de la temperatura interior tal como lo demuestran los datos experimentales.

Hay muchos factores que aún se deben de tomar en cuenta para obtener resultados más realistas, por mencionar algunos: tasa de infiltración, velocidad y dirección del viento, la evolución de la temperatura durante las noches, el coeficiente de transferencia de calor exacto del suelo, entre otras más. Además, para el uso de CFD se requiere un amplio conocimiento de variables climáticas, dinámica de fluidos y el uso adecuado de modelos de turbulencia, radiación etc.

4.6 Literatura citada

Couto, N., Rouboa, A., Monteiro, E. y Viera, J. (2012). Computational Fluid Dynamics Analysis of Greenhouses with Artificial Heat Tube. World Journal of Mechanics 2: 181–187**.** DOI: 10.4236/wjm.2012.24022

Du, J., Bansal, P. y Huang, Bo. (2011). Simulation model of a greenhouse with a heat-pipe heating system. Applied Energy 93: 268–276. Elsevier Ltd. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.12.069

Florez-Velázquez, J., Rojano-Aguilar, A., Rojas-Rishor, A. y Ojeda-Bustamante, W. 2015. Energy Exchange by convection in a closed greenhouse a pipe heating system: a CFD analysis. An ASABE Meeting Presentation. Paper Number: 152190826.

Ferziger, J.H y Perić, M. (1999). Computational Methods for Fluid Dynamics. 3ra, rev. Edition Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York. DOI: 10.1007/978-3-642-56026-2

Costa, J.; Oliveira, L. y Blay, D. (1999). Test of several versions for the k-e type turbulence modelling of in-ternal mixed convection flows. International Journal of Heat and Mass Transfer 42 (23): 4391- 4409. DOI:10.1016/S0017-9310(99)00075-7

Reiss, E.; Mears, D.; Manning, T.; Wulster, G. y Both, A. (2007). Numerical modelling of greenhouse fllor heating. Transaction on the ASABE 50(1): 275−284. DOI: 10.13031/2013.22408

Rouboa A. y Monteiro, E. (2007). Computational fluid dynamics analysis of greenhouse microclimates by heated underground tubes. J. Mech. Sci. Tech. 21(12): 2196 - 2204. DOI: 10.1007/BF03177480

Zamora-Pina, M. (2016). Simulación numérica de la inyección de gas en columnas de flujo oscilatorio. Tesis de licenciatura. Universidad Politécnica de Cartagena. 188 pp.

CAPÍTULO 6 . CONCLUSIONES GENERALES Y DISCUSIÓN

La tendencia actual en la producción de alimentos es la llamada “agricultura sustentable”, que se basa en un equilibrio entre la maximización de la producción y la disminución del tiempo y recursos utilizados, así como también disminuir el impacto ambiental negativo.

En muchas investigaciones se reportan, que los sistemas de energías renovables desempeñan un papel importante en el sector agrícola y son pieza clave para llevar a cabo una agricultura sustentable. Por lo que, en este trabajo se propuso realizar una aportación para demostrar los grandes beneficios de la energía renovable, en particular, la energía solar, dado que es uno de los recursos de mayor disponibilidad en el territorio mexicano.

Para aprovechar la radiación solar, se usaron colectores solares con tecnología “*heat-pipe*”, ya que son más eficientes que los colectores planos o los de tubos de vacío sin *heat-pipe*, principalmente en climas fríos. Por ser más eficientes ocupan menos área y/o espacio para cubrir las demandas energéticas. La instalación de estos fue relativamente fácil y permitieron aprovechan de mejor manera la radiación solar en “cualquier” ángulo por sus tubos cilíndricos. Sin embargo, estos calentadores solares tienen como desventaja el alto costo inicial, y también son más frágiles, en su manejo, en comparación con los colectores solares de placa plana.

La eficiencia global del módulo solar, compuesto de ocho colectores, que se obtuvo en la evaluación fue del 60 % en promedio. Se experimentó con diferentes flujos de recirculación de agua, concluyendo que un flujo de 5 litros por minuto (en una tubería de 19.05 mm de diámetro) es ideal para obtener agua caliente a 60°C en promedio. Con una radiación promedio de 700 $W \cdot m^{-2}$ durante siete horas se puede obtener 2 100 litros de agua a una temperatura de 60 °C. Desde luego, las necesidades energéticas del invernadero de 300 m^2 son superiores a lo que se capta durante el día con los 20.8 m^2 de colectores solares, por lo resulta necesario aumentar la cantidad de calentadores solares. De acuerdo con los cálculos realizados y aplicados en este trabajo, se requieren de aproximadamente 80 m^2 de colectores solares para satisfacer las necesidades nocturnas de calefacción en el invernadero

propuesto, asumiendo un set–point de 10 °C y el sistema de tuberías de polietileno radiantes en el suelo. Sin embargo, la eficiencia del sistema hidrónico usado como sistema de calefacción, no fue satisfactorio, debido a que hay pérdidas de energía hacia las capas inferiores del suelo. Es evidente que se debe de rediseñar la distribución de las tuberías por donde circula el agua caliente, o bien, aislar la capa inferior del suelo (por debajo de la red de tubería). Otras opciones a considerarse, para mejorar la eficiencia de la distribución de energía en el invernadero, implica: 1) colocar la red de tuberías sobre el suelo de tal manera que no afecte las actividades del cultivo y el desarrollo de las plantas y 2) instalar una red de distribución de tubos de acero sobre el suelo, con mejores propiedades de transferencia de calor. Este rediseño se puede llevar a cabo mediante simulación numérica con CFD.

Para trabajos posteriores se recomienda llevar a cabo simulaciones para realizar un adecuado dimensionamiento en cuanto a la cantidad requerida de colectores solares, el tamaño correcto del termo-tanque y si fuera necesario un sistema auxiliar. Esto se puede llevar a cabo usando el software de simulación TRNSYS (Thermal Energy System Specialists, LLC, Madison, WI, U.S.A) y los datos recolectados experimentalmente en este trabajo se pueden implementar en la evaluación de los modelos. Se recomienda hacer un análisis económico, para determinar la rentabilidad del sistema, dado que es la parte más importante para poder implementar este tipo de calefacción.

Finalmente, en este trabajo se analizó el ambiente nocturno del invernadero con el sistema de calefacción por piso radiante propuesto, con simulación numérica basada en CFD, lo cual permitió predecir las condiciones de acuerdo a la energía captada, almacenada y distribuida, por el sistema de calefacción en general. El objetivo fue desarrollar un modelo numérico para analizar el comportamiento de la temperatura al interior del invernadero con y sin calefacción. Los resultados obtenidos a través de la simulación estacionaria se asemejan a las mediciones obtenidas experimentalmente, pero no se presenta la evaluación formal del modelo numérico. Los resultados no son exactos porque no se consideraron todas las variables que influyen, como son: cantidad exacta de infiltración, coeficiente de transferencia de calor en los diferentes puntos del suelo, la inversión térmica entre otras.