

Evaluación de la energía solar como alternativa para un sistema de climatización en invernaderos

Evaluation of solar energy as an alternative for a climate control system in greenhouses

GÓMEZ-MERCADO, Abdiel*†, JUÁREZ-PLATA, Allin, RESÉNDIZ-ROSAS, Celerino y ÁVILA-DÁVILA, Érika

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Pachuca. División de Estudios de Posgrado e Investigación. Carr. México-Pachuca Km 87.5 Col. Venta Prieta C.P. 42080 Pachuca, Hgo.

ID 1^{er} Autor: Abdiel, Gómez-Mercado / ORC ID: 0000-0002-3409-6851, Researcher ID Thomson: P-7684-2018, PubMed ID: abd13l_gm

ID 1^{er} Coautor: Allin, Juárez-Plata / ORC ID: 0000-0002-1548-7355, Researcher ID Thomson: P-5343-2018; arXiv ID: 2366149

ID 2^{do} Coautor: Celerino, Reséndiz-Rosas / ORC ID: 0000-0003-3197-2876, Researcher ID Thomson: P-6224-2018, Mendeley ID: Celerino Reséndiz-Rosas

ID 3^{er} Coautor: Érika, Ávila-Dávila / ORC ID: 0000-0002-9365-6214

Recibido: Septiembre 01, 2018; Aceptado Noviembre 26, 2018

Resumen

La producción de cultivos bajo invernadero se ha convertido en una actividad en expansión a nivel mundial. El uso de combustibles fósiles para mantener las condiciones climáticas apropiadas dentro de los espacios protegidos resulta costoso y perjudicial al medio ambiente. La selección de un sistema de climatización para invernaderos que funcione con energía solar, ya sea térmica o fotovoltaica, es el objeto de estudio del presente documento. Como caso de estudio, un invernadero localizado en el Instituto Tecnológico de Pachuca fue utilizado para la investigación. A partir de un balance térmico y con el uso del software Wolfram Mathematica 11® se obtuvieron los valores de temperatura y humedad al interior del invernadero para cualquier estación del año. Mediante el simulador de Selección de Sistemas Fotovoltaicos de la Universidad Autónoma de Chapingo, se eligieron los equipos y se calcularon los costos de un sistema fotovoltaico para la climatización del invernadero. Así mismo, se determinaron los equipos y se estimaron los costos para la instalación de un colector solar. La evaluación consistió en un análisis costo beneficio de éstas dos alternativas, resultando seleccionado el uso de energía solar fotovoltaica para la operación del sistema de climatización del invernadero.

Invernaderos, Climatización, Balance térmico, Energía solar fotovoltaica

Abstract

The production of greenhouse crops has become an expanding activity worldwide. The use of fossil fuels to weather the appropriate climatic conditions within the protected spaces is costly and harmful to the environment. The selection of a heating-ventilation system for greenhouses that works with solar energy, either thermal or photovoltaic, is the object of study of this document. As a case of study, a greenhouse located at the Instituto Tecnológico de Pachuca was used for research. From a thermal balance and with the use of the Wolfram Mathematica 11® software, the temperature and humidity values inside the greenhouse were obtained for any season of the year. Using the Photovoltaic Systems Selection simulator of the Universidad Autónoma de Chapingo, the equipment was chosen and the costs of a photovoltaic system for heating-ventilation of the greenhouse were calculated. Likewise, the equipment was determined and the costs for the installation of a solar collector were estimated. The evaluation consisted of a cost-benefit analysis of these both alternatives, resulting selected the use of solar photovoltaic energy for the operation of the heating-ventilation system of the greenhouse.

Greenhouse, Air conditioning, Thermal balance, Photovoltaic solar energy

Citación: GÓMEZ-MERCADO, Abdiel, JUÁREZ-PLATA, Allin, RESÉNDIZ-ROSAS, Celerino y ÁVILA-DÁVILA, Érika. Evaluación de la energía solar como alternativa para un sistema de climatización en invernaderos. Revista de Ingeniería Tecnológica. 2018. 2-8: 1-10

*Correspondencia al Autor (agmerca63@gmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Nomenclatura

Símbolo	Descripción	Unidades
A	Superficie total de captación	m^2
C	Consumo diario de agua	L
p	Calor específico del aire húmedo	$J/kg \cdot K$
E	Velocidad de evapotranspiración dentro del invernadero	$kg/m^2 \cdot s$
H	Altura promedio del invernadero	m
h	Coefficiente global de transferencia de calor	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
I	Radiación real recibida	$kcal/m^2$
I_n	Radiación solar diaria	$kcal/m^2$
I_o	Radiación de referencia	$kcal/m^2$
K	Factor de corrección de I_n por inclinación	
N	Número de horas de sol en la zona	
Q_{cc}	Pérdida de calor a través de la cubierta	W/m^2
Q_{nec}	Flujo de calor ser suministrado por el sistema de calefacción	W/m^2
Q_{net}	Radiación global absorbida dentro del invernadero	W/m^2
Q_{ren}	Pérdida de calor por infiltración y ventilación	W/m^2
Q_{rad}	Radiación global fuera del invernadero	W/m^2
q_v	Velocidad de ventilación	$m^3/m^2 \cdot s$
R_c	Rendimiento del colector solar	
r_s	Reflectancia de la radiación solar en la superficie del suelo	-
T_a	Temperatura ambiente exterior media	$^\circ C$
T_A	Temperatura de entrada del agua de la red hidráulica	$^\circ C$
T_e	Temperatura del aire fuera del invernadero	$^\circ C$
T_{ext}	Temperatura del aire dentro del invernadero	$^\circ C$
T_{int}	Temperatura media del agua en el colector solar	$^\circ C$
T_m	Relación de la superficie de la cubierta a la superficie del suelo	-
w	Humedad absoluta fuera del invernadero	$g_{agua} / kg_{aire seco}$
W_{ext}	Humedad absoluta dentro del invernadero	$g_{agua} / kg_{aire seco}$
W_{int}	Transmitancia de radiación solar del material de la cubierta del invernadero	-
τ_c	Masa específica del aire	$kg_{aire seco} / m^3$
ρ		

Introducción

Los alimentos orgánicos son el resultado de un proceso agrícola más amigable con el medio ambiente (PROFECO). La demanda de estos productos registra hoy en día un notable crecimiento. Actualmente, la agricultura orgánica en México cubre casi 400,000 has. y está en franca expansión; la tasa media de crecimiento de esta actividad es del 20% anual en promedio en los últimos 10 años. Entre el 85 y 90% de la producción orgánica nacional es de exportación.

Los ingresos en divisas por las exportaciones de productos orgánicos son de alrededor de 400 millones de dólares promedio anual (CNPO), sin embargo, este tipo de productos son más costosos que los convencionales debido a que su producción es más lenta y en menor cantidad, resultado de la ausencia de fertilizantes, hormonas de crecimiento y, en general, al riguroso proceso de certificación al cual son sometidos (PROFECO). Derivado de dichos factores, se ha puesto especial atención a la tecnología de desarrollo de invernaderos, que incluye la automatización y control climático del cultivo.

El uso de combustibles fósiles para calentamiento, ventilación e iluminación de invernaderos es costoso (Cuce, 2013) y representa daños significativos al medio ambiente, tales como calentamiento global y cambio climático (Cuce, 2013).

Las energías alternativas empleadas en espacios protegidos, específicamente la energía solar fotovoltaica o térmica, pueden ser aprovechadas para mantener las condiciones apropiadas de humedad relativa y temperatura según las necesidades del cultivo (Sethi, 2008). Con un estudio costo-beneficio de la energía solar térmica y solar fotovoltaica es posible determinar cuál es la más adecuada para invernaderos.

Reda Hassanien et al (Hassanien, 2015) realizaron una revisión y discusión sobre la aplicación de las nuevas tecnologías en energía solar para el control climático en invernaderos (enfriamiento, calentamiento e iluminación, principalmente). El estudio teórico determinó que los calentadores solares de aire muestran el mejor desempeño general sobre los demás sistemas estudiados.

Erdem Cuce et al (Cuce, 2016) presentaron un estudio sobre ahorro de energía y tecnologías para el control climático en invernaderos, tales como módulos fotovoltaicos, colectores térmicos solares, sistemas y colectores híbridos, bombas de calor, materiales que permiten un mejor aislamiento térmico y sistemas de iluminación. Los resultados de la investigación revelaron que es posible lograr más del 80% en el ahorro de energía en los invernaderos convencionales seleccionando adecuadamente el sistema de energía renovable y sustentable, con un periodo de reembolso de 4 a 5 años dependiendo del cultivo.

Alexandros Sotirios et al (Sotirios, 2016) implementaron un sistema autónomo de energía renovable que consiste en la conversión de energía solar fotovoltaica en hidrógeno mediante electrólisis del agua. El hidrógeno generado es almacenado durante el día en un tanque presurizado y en la noche es convertido en electricidad para alimentar una bomba de calor que propicia el calentamiento de un invernadero. Como resultado, se determinó una eficiencia general del sistema del 11%.

J. Xu et al (Xu, 2014) desarrollaron un sistema subterráneo de almacenamiento de energía térmica utilizando un colector solar que alimenta una red de intercambiadores de calor de tubos en U para abastecer los requerimientos energéticos en un invernadero, con la finalidad de obtener una distribución uniforme de la energía térmica en toda el área de cultivo. Los resultados obtenidos demostraron que, gracias a la transferencia de calor por convección y conducción en los tubos, se mantuvo una temperatura de 13 °C por encima de la temperatura ambiental dentro del invernadero.

Wael M. et al (Wael, 2015) dedicaron su investigación al cálculo de la cantidad de energía solar que puede ser capturada desde la superficie de un invernadero y utilizada para reemplazar el consumo de combustibles fósiles y otros sistemas de calentamientos convencionales en los invernaderos. Se llevó a cabo un estudio analítico para diferentes proporciones curvas de superficie y se determinó el óptimo máximo con mayor captación de energía solar. Finalmente, para el caso óptimo se realizó un estudio de cantidad de energía capturada y los costos del ahorro energético.

Trypanagnostopoulos et al (Trypanagnostopoulos, 2017) realizaron un estudio sobre la colocación de paneles solares fotovoltaicos en el techo de un invernadero para satisfacer la demanda energética del espacio protegido. Al mismo tiempo, determinaron que no se generan efectos significativos en el crecimiento de los cultivos debido a la sombra que producen los módulos fotovoltaicos.

V.P. Sethi et al (Sethi, 2013) realizaron una recopilación de los modelos de microclimas para invernaderos que han sido diseñados, con la finalidad de generar un modelo térmico más preciso. Los aspectos examinados en cada modelo fueron: tipo de modelo, herramienta o programa utilizado para la simulación, suposiciones para escribir las ecuaciones de balance de energía, resultados obtenidos y validación.

Las tecnologías de desarrollo de invernaderos no han sido claras en la determinación del proceso de control climático que mejor satisfaga los requerimientos energéticos a costos accesibles. Por tanto, el objetivo del presente trabajo es realizar el balance térmico del invernadero y determinar los requerimientos energéticos para mantener las condiciones climáticas apropiadas para el correcto desarrollo del cultivo aplicando energía solar térmica o fotovoltaica.

Metodología

La realización del presente trabajo forma parte de un proyecto multidisciplinario de emprendimiento desarrollado en el Instituto Tecnológico de Pachuca. Un invernadero tipo túnel, ubicado dentro del plantel, es el objeto de estudio del presente documento.

Se realizó un análisis y evaluación sobre la aplicación de energía solar térmica y fotovoltaica en invernaderos con base en las necesidades energéticas de los mismos.

1. Condiciones climatológicas

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la ciudad de Pachuca, Hidalgo, lugar en donde se desarrolló el proyecto, presenta clima templado semihúmedo, con temperatura promedio anual de 16 °C, temperatura mínima promedio de 4 °C y temperatura máxima promedio de 27 °C.

En la Tabla 1 se muestran las temperaturas ambientales máximas, T_{max} , mínimas, T_{min} , promedio, T_{med} , radiación solar, RG, y humedad relativa, HR, registradas en la ciudad de Pachuca, correspondientes al año 2017. La información es proveniente de la base de datos de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) y del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

MES	T_{max} (°C)	T_{min} (°C)	T_{med} (°C)	RG (W/m ²)	HR (%)
Ene	25.01	3.68	13.86	465.5	47.73
Feb	26.03	5.57	16.12	527.71	42.21
Mar	27.86	8.81	18.33	575.84	45.79
Abr	29.97	9.71	20.99	600.52	35.51
May	32.3	13.24	22.99	581.05	42.56
Jun	30.2	15.14	22.33	515.93	54.27
Jul	27.08	14.13	19.51	514.84	73.48
Ago	27.67	13.88	20.33	550.24	69.68
Sep	26.46	13.57	19.15	457.83	73.28
Oct	26.09	10.82	18.09	490.46	65.39
Nov	26.74	5.93	15.97	492.19	50.90
Dic	24.51	4.58	13.88	421.83	50.91

Tabla 1 Datos climáticos 2017 Pachuca, Hidalgo
Fuente: SEMARNAT, INIFAP

Para el monitoreo de temperatura y humedad relativa dentro del invernadero fue utilizado un Termómetro Digital HTC-5.

2. Características del invernadero

Un invernadero está diseñado para proteger cultivos de los factores medioambientales externos (lluvia, viento y temperatura extrema, entre otros). El invernadero tipo túnel del Instituto Tecnológico de Pachuca, fue fabricado con acero galvanizado para su estructura y con cubierta de polietileno calibre 720. Sus dimensiones son especificadas en la tabla 2 (Licona y Copado, 2016) y mostrados en la Figura 1. Los datos de la geometría del invernadero fueron utilizados para llevar a cabo la simulación.

Propiedad	Marco	Arco techo
Largo (m)	6	6
Ancho (m)	5.4	Arco: 4.24
Altura (m)	3	0.8
Área (m ²)	32.4	25.44
Volúmen (m ³)	97.4	20.35

Tabla 2 Dimensiones del invernadero
Fuente: Licona y Copado, 2016

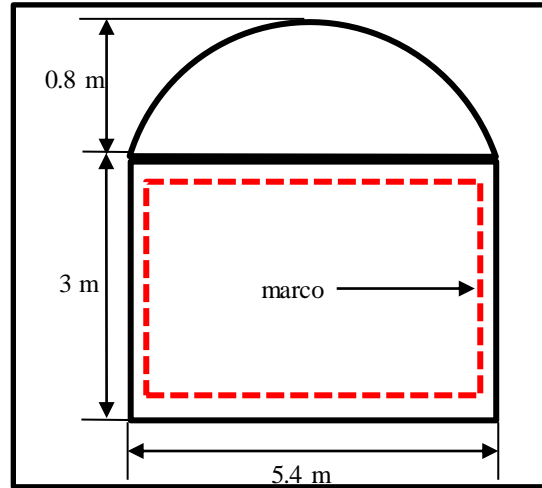


Figura 1 Dimensiones del invernadero

3. Balance de energía en el invernadero

La figura 2 y la ecuación 1 expresan el balance térmico dentro del invernadero (ASAE, 2003),

$$Q_{net} + Q_{nec} = Q_{cc} + Q_{ren} \quad (1)$$

El flujo de calor por evapotranspiración, así como la pérdida de calor a través del suelo son considerados despreciables en el presente trabajo.

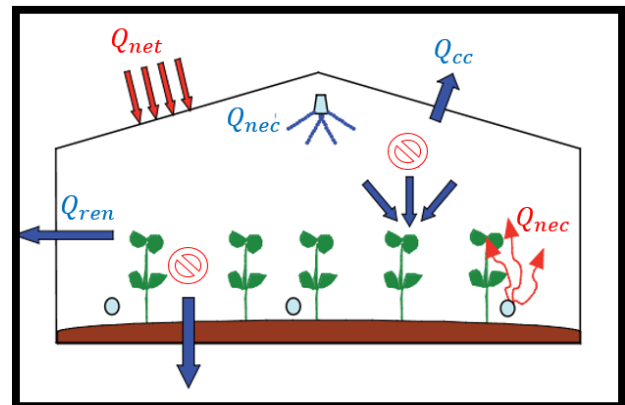


Figura 2 Balance energético en un invernadero
Fuente: Valera, Molina, Álvarez, 2008

El flujo de calor neto por radiación para un invernadero puede ser escrito según la ecuación 2.

$$Q_{net} = \tau_c(1 - r_s) \cdot Q_{rad} \quad (2)$$

La pérdida de calor debido a la renovación del aire interior del invernadero (ventilación e infiltración) se determinó mediante la ecuación 5.

$$Q_{ren} = q_v \cdot p \cdot \rho(T_{int} - T_{ext}) \quad (3)$$

En donde q_v representa la velocidad de ventilación ($m^3/m^2 \cdot s$) y $(T_{int} - T_{ext})$ define la diferencia de temperatura del aire entre el interior y el exterior del invernadero, respectivamente. La descripción del resto de los parámetros puede encontrarse en la sección de nomenclatura.

Para el cálculo del flujo de calor perdido a través de la cubierta se empleó la ecuación 4.

$$Q_{cc} = h \cdot w(T_{int} - T_{ext}) \quad (4)$$

En la ecuación 4, w representa la relación de las superficies de la cubierta y del piso, por lo que su valor es adimensional.

El flujo de calor que debe ser proporcionado por el sistema de calefacción (aire o agua caliente) se definió por medio de la ecuación 5.

$$Q_{nec} = Q_{cc} + Q_{ren} - Q_{net} \quad (5)$$

Se consideró al ambiente interno del invernadero (el aire delimitado por la cubierta) como el volumen de control del sistema y se asumió que las propiedades temperatura y humedad absoluta son homogéneas en todo el interior, se planteó el comportamiento del sistema mediante las ecuaciones diferenciales 6 y 7 de primer orden (Takakura y Fang, 2002).

$$\frac{dT_{int}}{dt} = \frac{1}{C_p \cdot \rho \cdot H} [Q_{rad} + Q_{nec} - (T_{int} - T_{ext}) \cdot (q_v \cdot C_p \cdot \rho + w \cdot h)] \quad (6)$$

$$\frac{dW_{int}}{dt} = \frac{1}{H \cdot \rho} [q_v \cdot \rho (W_{int} - W_{ext})] \quad (7)$$

Para la solución de las ecuaciones diferenciales se utilizó el software Wolfram Mathematica 11. Las condiciones iniciales para cada una de las variables establecidas, cuando $t = 0$, fueron asumidas de acuerdo con las ecuaciones 8 y 9.

$$t_{int} = t_{ext} \quad (8)$$

$$W_{int} = W_{ext} \quad (9)$$

Las humedades absolutas, interna y externa, pueden ser calculadas mediante la expresión 10.

$$W_{int} \cdot q_v \cdot \rho = W_{ext} \cdot q_v \cdot \rho + E \quad (10)$$

De acuerdo con Joliet (1999), $E = 0$ para invernaderos que aún no tienen cultivo en su interior.

4. Energía solar fotovoltaica como alternativa para el sistema de calefacción

A partir de los resultados obtenidos de las ecuaciones de balance energético, se escribieron las ecuaciones para determinar el número de módulos fotovoltaicos (MFV), los inversores y controladores para el sistema de calefacción (Ibáñez et al, 2004). Se realizó el estudio asumiendo la interconexión del sistema a la red de CFE para evitar el banco de baterías (Figura 3).

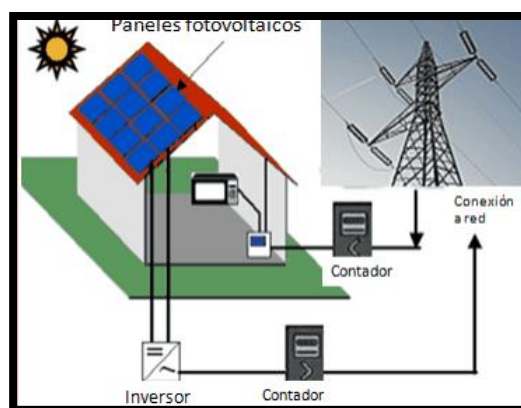


Figura 3 Sistema Fotovoltaico interconectado a la red
Fuente: Krishnamurthy, 2015

Para el cálculo y selección de equipos necesarios, así como la estimación de costos, se utilizó el simulador de Selección de Sistemas Fotovoltaicos de la Universidad Autónoma de Chapingo.

Al analizar la relación mensual de las horas solar pico (H_{sp}) entre el consumo de energía mensual durante un año se seleccionó el mes crítico, en donde la incidencia de radiación solar fue la más baja y se eligió un tipo de módulo fotovoltaico (MFV) del catálogo del software para disponer de su potencia (P_{mod}) y características eléctricas. A partir de esta información se calculó la cantidad de MFV (N_{mod}) necesarios, considerando un factor de seguridad ($F_s = 1.25$).

$$N_{mod} = F_s \frac{E_{p,diario}}{H_{sp} P_{mod}} \quad (11)$$

La cantidad de reguladores (N_r) para el subsistema de regulación se determinó de la relación de la intensidad de corriente de generación-acumulación ($I_{reg, gen-acu}$) y la intensidad de corriente de un regulador específico ($I_{max, reg}$)

$$N_r = \frac{I_{reg, gen-acu}}{I_{max, reg}} \quad (12)$$

La metodología de cálculos, catálogos de los equipos de invernaderos y componentes fotovoltaicos, se analizaron en el software "Selección de sistema fotovoltaico para invernadero" disponible de uso libre en de la red y se encuentra registrado ante el Instituto Nacional de Derecho de Autor.

5. Energía solar térmica como alternativa para el sistema de calefacción

Se realizó el cálculo del sistema de calefacción para el invernadero mediante el uso de colectores solares. La Figura 4 muestra el diseño de la instalación del sistema.

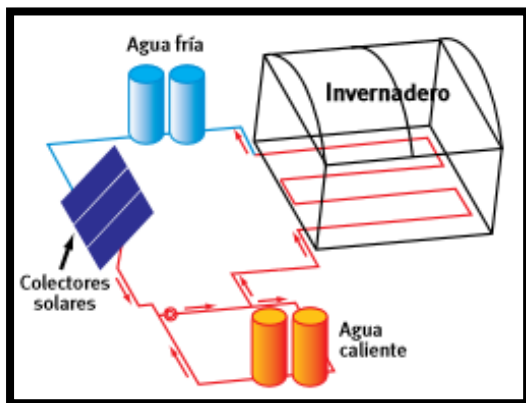


Figura 4 Sistema de colectores solares
Fuente: Bargach et al., 2004

Se consideró agua de la red hidráulica como el fluido de trabajo para el balance energético en el sistema térmico solar. La captación solar se realiza con paneles solares. Dentro de estos paneles circula el agua que se calienta gracias a la incidencia de los rayos del sol. El calor así obtenido se transmite al agua de consumo a través de un intercambiador y normalmente queda acumulado en un depósito para su uso posterior.

Para la determinación de la radiación real recibida, I , se empleó la ecuación 13 (Martínez, 2016).

$$I = \frac{I_n K}{N} \quad (13)$$

El rendimiento del colector solar se determinó mediante el gráfico de la Figura 5, proporcionado por un proveedor de colectores solares, y habiendo calculado previamente el diferencial de temperaturas de la ecuación 14 (Martínez, 2016).

$$\Delta T = \frac{I_0}{I} (T_m - T_A) \quad (14)$$

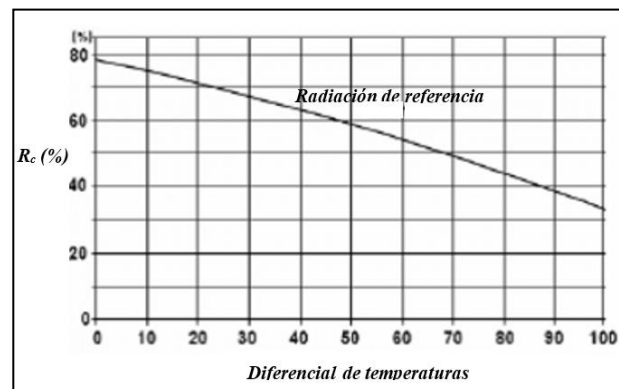


Figura 5 Rendimiento del colector
Fuente: RENOVA Energía

El área del colector solar, se determinó mediante la ecuación 15 (Martínez, 2016).

$$A = \frac{C(T_a - T_e)}{I_n \cdot K \cdot R_c} \quad (15)$$

La cantidad de colectores necesarios para cubrir las necesidades energéticas del invernadero se obtuvo a partir de la ecuación 15 (Arroyo, 2016):

$$N_{col} = \frac{A}{A_{colector}} \quad (16)$$

Análisis y Discusión de Resultados

1. Monitoreo de variables establecidas

De acuerdo con las mediciones de temperatura, humedad relativa y radiación global diaria reportadas por SAGARPA e INIFAP, se consideraron los datos registrados en los meses con temperaturas más críticas durante el año (diciembre, enero, febrero y mayo) para generar el modelo matemático de temperatura dentro del invernadero, así como la determinación de energía total necesaria tanto para calefacción como para ventilación del espacio protegido.

2. Modelo de temperatura dentro del invernadero

En diciembre, enero y febrero se registraron temperaturas ambientales por debajo de los cero grados Celsius. Por otra parte, el comportamiento de la temperatura dentro del invernadero se determinó a partir de la resolución de la ecuación 6 mediante el software Wolfram Mathematica 11[®], de donde se obtuvieron los gráficos 1 a 8.

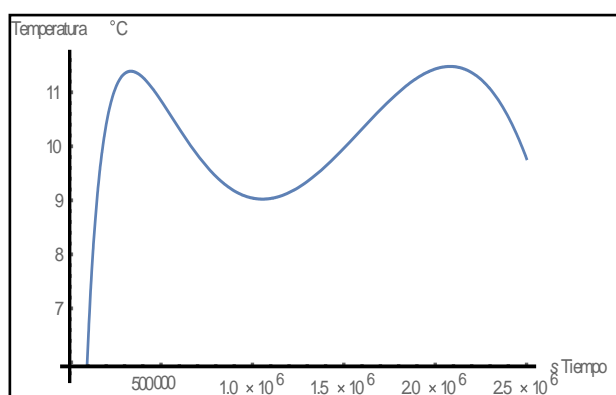


Gráfico 1 Temperatura interior en diciembre

Fuente: Wolfram Mathematica 11

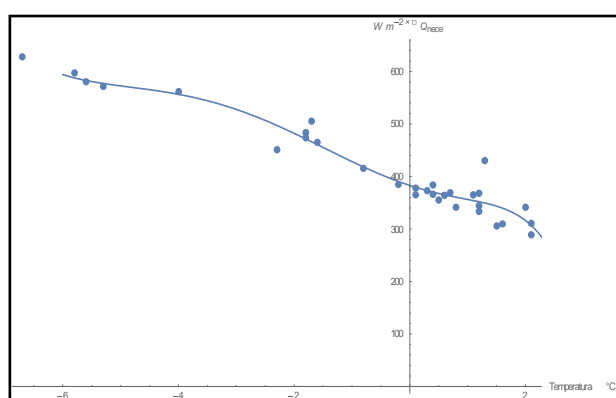


Gráfico 2 Flujo de calor en diciembre

Fuente: Wolfram Mathematica 11

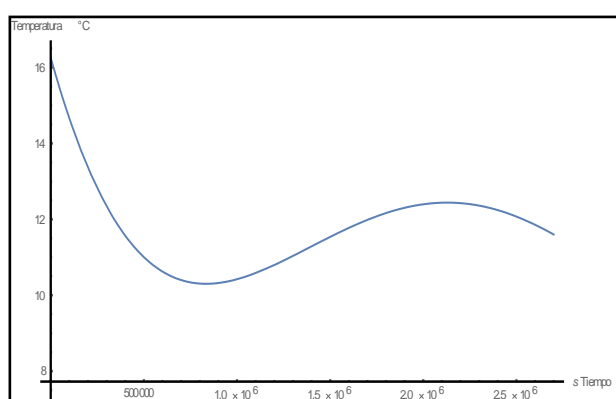


Gráfico 3 Temperatura interior en enero

Fuente: Wolfram Mathematica 11

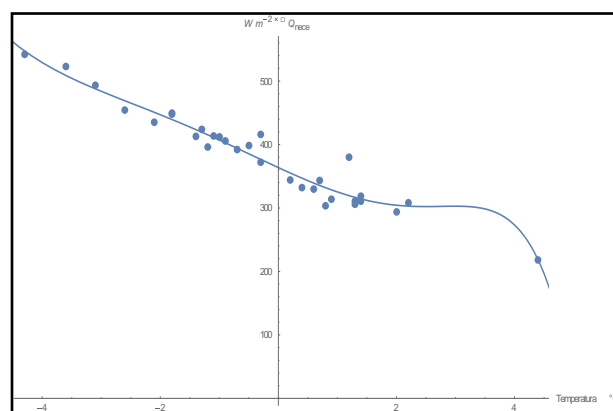


Gráfico 4 Flujo de calor en enero

Fuente: Wolfram Mathematica 11

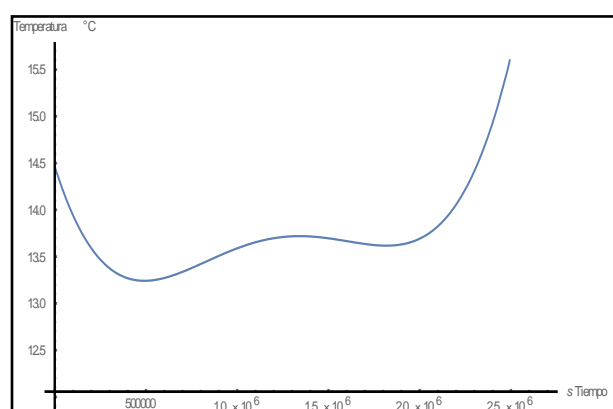


Gráfico 5 Temperatura interior en febrero

Fuente: Wolfram Mathematica 11

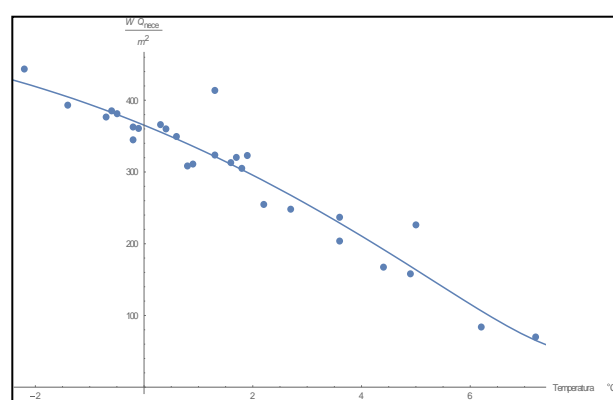


Gráfico 6 Flujo de calor en febrero

Fuente: Wolfram Mathematica 11

Los Gráficos 1, 3 y 5 corresponden al comportamiento de la temperatura esperado dentro del invernadero de en los meses de diciembre, enero y febrero. Los registros más altos de temperatura ocurren, en promedio, a menos de 15 °C, lo que representa amenaza para cierto tipo de cultivos debido a la generación de bacterias que se ven favorecidas en su crecimiento por las bajas temperaturas, o bien, puede ocurrir afectación en el desarrollo de las plantas por la ausencia de condiciones óptimas de temperatura para su crecimiento.

De esta manera, se vuelve indispensable el suministro de energía calorífica para mantener la temperatura correcta dentro del invernadero.

Las Figuras 2, 4 y 6 muestran el flujo de calor en W/m^2 que requiere adicionarse al sistema de acuerdo con la temperatura exterior y con la temperatura interior deseada. Puede observarse que el flujo de calor es proporcional a la temperatura exterior, representada en el eje horizontal de cada gráfico; es decir, mientras más baja sea la temperatura ambiental, mayor será el requerimiento energético.

Fitz-Rodriguez et al (2009) determinaron temperaturas internas del invernadero durante 28 horas consecutivas para determinar la tasa de ventilación apropiada para el invernadero, sin embargo, en el presente trabajo se analizaron las temperaturas de todos los días del año para identificar los meses más críticos para los invernaderos y se determinaron las cantidades de energía requeridas para lograr la temperatura apropiada para los cultivos.

En el mes de mayo, por otra parte, se registraron las temperaturas más altas del año 2017. La solución de la ecuación diferencial para el comportamiento de la temperatura en mayo dentro del invernadero se puede observar en el gráfico 7.

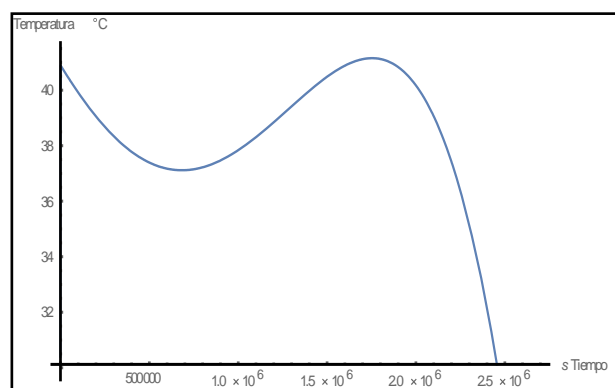


Gráfico 7 Temperatura interior en mayo

Fuente: Wolfram Mathematica 11

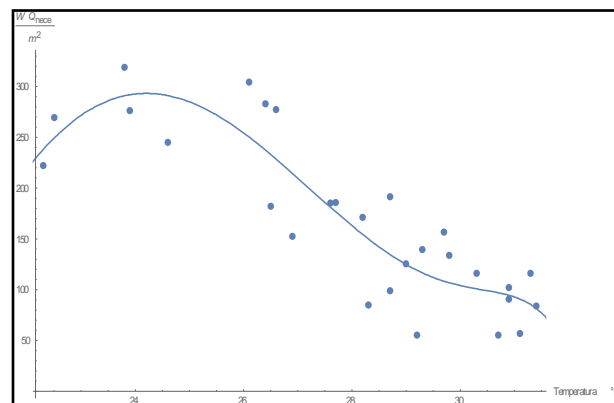


Gráfico 8 Flujo de calor en mayo

Fuente: Wolfram Mathematica 11

Joudi et al (2014) realizaron un estudio sobre ventilación de invernaderos, sin embargo, en el balance de energía el calor transferido desde la superficie del suelo fue despreciable, por lo que el balance de energía no resulta adecuado para aplicarse en el invernadero razón de estudio del presente trabajo. Por otra parte, en el invernadero del Tecnológico de Pachuca se requiere calefacción además de la ventilación, es por ello que se determinaron las necesidades energéticas no sólo para días de temperaturas elevadas, sino también de temperaturas bajas.

3. Evaluación de la energía solar fotovoltaica para el sistema de calefacción

Se realizó un estudio en el software proporcionado al público en general por la Universidad Autónoma de Chapingo, con base en las necesidades del sistema, siendo el resultado del análisis el mostrado en la Figura 7, donde se desglosan los modelos, los costos y la cantidad de módulos fotovoltaicos, baterías, controladores e inversores necesarios, así como el costo de los accesorios y de la instalación. Finalmente, se presenta el precio total estimado del sistema fotovoltaico.

4. Evaluación de la energía solar térmica para el sistema de calefacción

Se determinó el área del colector solar, resultando en 4.2 m^2 . Del catálogo de proveedores de calentadores solares (SAECSA), se seleccionó un colector plano con área útil de 2.6 m^2 , por lo tanto, se requieren 2 colectores para satisfacer las necesidades energéticas en el invernadero.

Selección de Sistema Fotovoltaico para Invernadero	
Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua Universidad Autónoma Chapingo	
Inventario de aplicaciones	Datos generales
<p>General Resumen </p> <p>REPORTE GENERAL</p>	
Componentes del Sistema Fotovoltaico	
Resultado del análisis para Empresa: INSTITUTO Dirección: BOULEVARD FELIPE ÁNGELES Para la ciudad de: Pachuca	
Módulos Fotovoltaicos	Marca: Techno Sun Modelo: SYP605-M Horas solar pico (HSP): 4.20 Voltaje nominal: 6 V Módulos FV en Serie: 1 Módulos FV en Paralelo: 5 Total de Módulos FV: 5 Potencia total instalada 300 W Precio unitario: 1,909.95 MXN Precio total (estimado) del arreglo 9,549.75 MXN
Batería	Días de autonomía: 3 Voltaje Nominal: 6V Capacidad requerida: 937.50A-h Tipo de batería: Descarga Profunda Marca: Hawker Modelo: T-105 Capacidad de régimen: 225 Voltaje por unidad: 6 Baterías en Serie: 1 Baterías en Paralelo: 4 Total de baterías: 4 Precio unitario: 1,625.00 MXN Precio total estimado: 6,500.00 MXN
Controlador (es)	Corriente de Corto Circuito: 24.13 A Voltaje nominal del sistema: 6 V Marca: samlexsolar Modelo: Solarix PRS 2020 Corriente nominal: 20 A Total de controladores: 1 Precio unitario: 1,960.00 MXN Precio total estimado: 1,960.00 MXN
Inversor (es)	Tipo de onda: Senoidal Modificada Potencia Nominal: 75 W Total de inversores: 3 Precio unitario: 540.60 MXN Precio total estimado: 1,622.00 MXN
Instalación y Accesorios	4,908 MXN
Precio estimado del sistema 24,540 MXN	

Figura 7 Resumen de equipos y costos del sistema fotovoltaico

El costo de cada colector es de \$13,080 y la instalación tiene un precio de \$1,900. Se estimó un costo total aproximado del sistema térmico solar de \$30,000. En la figura 8 se muestran las especificaciones del colector solar



CALENTADOR SOLAR RESIDENCIAL	
MODELOS	
EL SISTEMA INCLUYE	CALENTADOR SOLAR RESIDENCIAL 150 LITROS
Colector solar SAECSA	1
Área de captación	2.6 m ²
Termotanque	Modelo Básico 150 Lts
Base metálica para termotanque	Incluye
Área de instalación	Ancho 1.5m, Largo 3.5m
Orientación	Hacia el sur libre de sombras
Peso máximo	Equipo lleno de agua 250 Kg
Temperatura promedio anual	50°C
Número de usuarios	4-5 personas
Alimentación	Tinaco o hidroneumático de hasta 3kg/cm ² de presión
Garantía	5 años contra defectos de fabricación

Figura 8 Características del colector solar

Fuente: SAECSA

Conclusiones y Recomendaciones.

De acuerdo con los resultados obtenidos a partir de la determinación de temperaturas y humedades dentro del invernadero por medio del software Wolfram Mathematica 11, fue posible identificar las épocas del año en las que se requiere adicionar o extraer energía calorífica del espacio protegido para mantener las condiciones bioclimáticas adecuadas para la correcta reproducción de los cultivos. La energía solar fotovoltaica puede ser utilizada como fuente alternativa de energía en el invernadero.

Según los resultados generados en el software de la Universidad Autónoma de Chapingo, se calcularon los equipos a utilizar y los costos son relativamente asequibles en comparación con los costos de un sistema de colectores solares, resultando \$6,000 más costoso un sistema térmico solar, además, con la instalación de un sistema solar fotovoltaico, puede ser aprovechada la energía eléctrica para la iluminación y el sistema de riego dentro del invernadero.

Una vez realizado el cultivo dentro del invernadero y para futuras experimentación, será necesario considerar la transpiración de las plantas en el balance térmico para obtener una mayor precisión en el cálculo de los requerimientos energéticos.

Referencias

CNPO Presentación, recuperado el <http://www.cnpo.org.mx/presentacion.html>

Cuce, E., Young, CH., Riffat, SB. (2015). Thermal insulation, power generation, lighting and energy saving performance of heat insulation solar glass as a curtain wall application in Taiwan: a comparative experimental study. Elsevier.

Cuce, E, Cuce, PM. (2013). A comprehensive review on solar cookers. Elsevier

Cuce E, Cuce, PM, Bali, T. (2013). An experimental analysis of illumination intensity and temperature dependency of photovoltaics cell parameters. Elsevier.

Cuce, E., Harjunowibowo, D., Cuce, P. (2015). Renewable and sustainable energy saving strategies for greenhouse systems: A comprehensive review. Elsevier. 34-59.

Hassanien, R., Hassanien, E., Li, M., Dong, W. (2015). Advanced applications of solar energy in agricultural greenhouses. Elsevier. 989-1001.

Krishnamurthy, S. (2015). Aplicaciones de sistemas Fotovoltaica. P-13.

Licona, L., Copado, E., (2016). Construcción de Invernadero Sustentable. Instituto Tecnológico de Pachuca.

Martínez, V., Giménez, B., Castilla, N., Pastor, R. (2016). Contribución solar para agua caliente sanitaria: dimensionado de colectores solares. Departamento de Contruccion de Arquitectónicas, España.

PROFECO <https://www.gob.mx/profeco/articulos/alimentos-organicos-144992?idiom=es>

PROFECO <https://www.gob.mx/profeco/documentos/alimentos-organicos?state=published>

PROFECO <https://www.gob.mx/profeco/documentos/alimentos-organicos?state=published>

Sethi, VP., Sharma, SK. (2008). Survey and evaluation of heating technologies for worldwide agricultural greenhouse applications. Elsevier. 82(9).

Sethi, VP., Sharma, SK. (2007). Greenhouse heating and cooling using aquifer water. 32(8).

Sotitios, A., Sotirios, A., Colantoni, A., Pascuzzi, S. (2016). Thermal energy assessment of a small scale photovoltaic, hydrogen and geothermal stand-alone system for greenhouse heating. Elsevier. 115-127.

Sethi, V., Sumathy, K., Lee, C., Pal, D. (2013). Thermal modeling aspects of solar greenhouse microclimate control: A review on heating technologies. Elsevier. 56-82.

Trypanagnostopoulos, G., Kavga, A., Souliotis, M., Trypanagnostopoulos, Y. (2017). Greenhouse performance results for roof installed photovoltaics. Elsevier. 724-731.

Wael, M., Maghlany, E., Mohamed, A., Tanaka, H. (2015). Optimum design and orientation of the greenhouses for maximum capture of solar energy in North Tropical Region. Elsevier. 1096-1104.

Xu, J., Li, Y., Wang, R., Liu, W. (2013). Performance investigation of a solar heating system with underground seasonal energy storage for greenhouse application. Elsevier. 61-73.