



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



Instituto Tecnológico de Pachuca

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PACHUCA

DISEÑO DE UN SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN PARA INVERNADEROS UTILIZANDO ENERGÍA SOLAR

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN INGENIERÍA MECÁNICA
PRESENTA:

ING. ALLIN YARELY JUÁREZ PLATA

DIRECTOR DE TESIS:
DR. ABDIEL GÓMEZ MERCADO
CODIRECTOR DE TESIS: DR. IVAN TOVAR OSPINA

SINODALES:
DRA. ERIKA OSIRIS ÁVILA DÁVILA
DR. CELERINO RESÉNDIZ ROSAS

62 Páginas

Pachuca de Soto, Hidalgo, octubre de 2019.



Carretera México-Pachuca Km. 87.5, Col. Venta Prieta, Pachuca, Hidalgo. C.P. 42080, A. P. 276.

Tels. : (01 771) 710 52 51, 170 03 45, 170 03 01, 170 06 87

www.tecnm.mx | www.itpachuca.edu.mx



Instituto Tecnológico de Pachuca

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

Pachuca, Hidalgo, **6/Septiembre/2019**

OFICIO No. DEPI-209-19

**C. ING. ALLIN YARELY JUÁREZ PLATA
PRESENTE**

La que suscribe, jefa de la División de Estudios de Posgrado e Investigación, le comunica que los miembros de la Comisión Revisora, designada por el Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica para examinar su Tesis:

"Diseño de un sistema de climatización para
invernaderos utilizando energía solar"

se han reunido, y después de intercambiar opiniones manifiestan su aprobación de la Tesis, en virtud que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes y, en consecuencia, se autoriza su impresión.

Sin otro particular por el momento, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia

**MTRA. KARLA MARTÍNEZ TAPIA
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



SEP
SECRETARÍA
DE EDUCACIÓN
PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PACHUCA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Cp. Archivo

KMT/lmpp





"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

**División de Estudios de Posgrado e Investigación
Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica
ACTA**

Siendo las 13:00 horas del 15 de febrero de 2019, reunidos en el aula U6, el Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica manifiesta la APROBACIÓN del tema de Tesis: Diseño de un sistema de climatización para invernaderos utilizando energía solar, con el siguiente contenido:

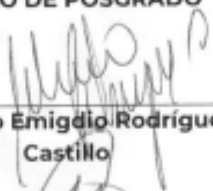



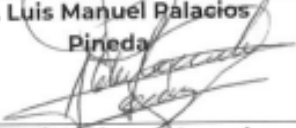



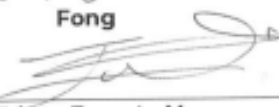
- Resumen/Abstract
- Nomenclatura
- Contenido
- Índice de cuadros, gráficas y figuras.
- 1. Introducción
- 2. Antecedentes
- 3. Marco Teórico
- 4. Materiales y métodos
- 5. Resultados y discusión
- Conclusiones
- Bibliografía
- Apéndices

Para cubrir el requisito correspondiente a la Tesis para que la Ing. Allin Yarely Juárez Plata obtenga el grado de Maestro en Ingeniería Mecánica, bajo la dirección del Dr. Abdiel Gómez Mercado, profesor de la Maestría en Ingeniería Mecánica de la División de Estudios de Posgrado e Investigación.

ATENTAMENTE

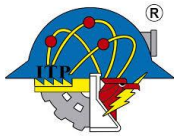
El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia

EL CONSEJO DE POSGRADO

 Dr. Mario Emigdio Rodríguez Castillo	 Dr. Luis Manuel Palacios Pineda	 Dra. Erika Osiris Avila Dávila
 Dr. Ignacio Ramírez Vargas	 Dr. Abdiel Gómez Mercado	 Dr. Hugo Francisco Abundis Fong
 Dra. Marisa Moreno Ríos	 Dr. Rafael Campos Amezcua	 Dr. Edgar Ernesto Vera Cárdenas

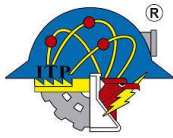


A Dios, por su infinita bondad; a mis padres, porque son mi inspiración y sustento; a mi hermano, por su apoyo incondicional; a mis profesores, por su admirable labor. Pero, sobre todo, a mi pequeña Ivanna, porque es mi razón de ser.



Agradecimiento

Manifiesto mi total agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACyT, al Consejo de Posgrado del Instituto Tecnológico de Pachuca por la confianza depositada en mí para desarrollar y concluir exitosamente mis estudios de Posgrado y a la Universidad Autónoma del Caribe y su Cuerpo Académico de Posgrado por su hospitalidad y enriquecer mi Proyecto de Tesis.

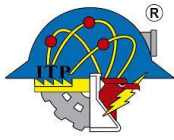


Resumen

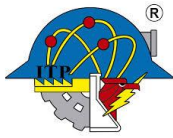
La producción de cultivos bajo invernadero se ha convertido en una actividad en expansión a nivel mundial. El uso de combustibles fósiles para mantener las condiciones climáticas apropiadas dentro de los espacios protegidos resulta costoso y perjudicial al medio ambiente. La selección de un sistema de 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 *EnergyPlus*[®], se observó el ahorro energético al colocar el *PCM RT-25* y se calculó la demanda de energía eléctrica requerida para el sistema de climatización. Con uso del software *Calculation Solar*[®] se definió un sistema fotovoltaico para cubrir la demanda energética del sistema de climatización del invernadero y se realizó la estimación de costos. Así mismo, se determinaron los equipos y los costos para la instalación de un colector solar. La evaluación consistió en un análisis costo beneficio de ambas alternativas, resultando seleccionado el uso de energía solar fotovoltaica para la operación del sistema de climatización del invernadero.

Abstract

The production of greenhouse crops has become an expanding activity worldwide. The use of fossil fuels to maintain 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 *Wolfram Mathematica 11*[®] software, the temperature and humidity values inside the greenhouse were obtained for any season of the year. Using the *EnergyPlus*[®] simulator, the energy saving was observed when by placing the *PCM RT-25* and the electric power demand required for the air conditioning system was calculated. With the use of the *Calculation Solar*[®] software, a photovoltaic system was defined to cover the energy demand of the greenhouse heating - ventilation system and the cost estimate was made. Likewise, the equipment and costs for the installation of a solar collector were determined. The evaluation

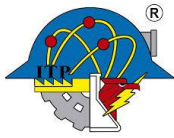


consisted in a cost-benefit analysis of both alternatives, being selected the use of photovoltaic solar energy for the operation of the greenhouse heating - ventilation system.

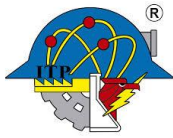


Contenido

1. Introducción	1
2. Estado del arte	4
3. Marco teórico	10
3.1 Invernaderos.....	10
3.1.1 Tipos de invernaderos.....	11
3.2 Factores climatológicos considerados en el invernadero	13
3.2.1 Radiación solar	13
3.2.2 Humedad absoluta y relativa	14
3.2.3 Temperatura.....	14
3.3 Equipos para manipular el clima	15
3.4 Control climático en un invernadero	15
3.5 Sistemas de control utilizando en energías renovables	17
3.5.1 Energía solar fotovoltaica.....	17
3.5.2 Energía solar térmica.....	21
3.6 Balance térmico en el invernadero	24
3.7 Simulador EnergyPlus®.....	25
4. Métodos y materiales	27
4.1 Revisión de la bibliografía	29
4.2 Factores clave para el proceso térmico.....	29
4.2.1 Lugar de desarrollo del proyecto	29
4.2.2 Caracterización del invernadero	30
4.2.3 Adaptación del invernadero.....	31
4.2.4 Visitas a invernaderos de la región.....	32
4.2.5 Monitoreo de condiciones climáticas	33
4.2.6 Condiciones climatológicas de la región	33
4.3 Determinación de las variantes técnicas para la integración del sistema	35
4.3.1 Selección del tipo de energía alternativa a implementar en el invernadero.....	36
4.4 Diseño del sistema de calefacción del invernadero	36
5. Resultados	38
5.1 Monitoreo de variables establecidas.	38
5.2 Modelo de temperatura dentro del invernadero.	38
5.3 Diseño del invernadero en EnergyPlus®	43
5.3.1 Invernadero con PCM RT25.....	44



5.4	Diseño del sistema de climatización convencional	46
5.5	Selección del tipo de calefacción	47
5.6	Diseño del sistema fotovoltaico	49
5.6	Estimación de costos del sistema de climatización	51
5.6.1	Costo del material de cambio de fase	51
5.7	Costos de consumo energético	55
6.	Conclusiones	57
7.	Referencias bibliográficas	59



Índice de figuras

Figura 1. Tipos de techos y cubiertas para invernaderos.....	11
Figura 2. Tipos de invernaderos: a) Plano, b) Túnel, c) Capilla.....	12
Figura 3. Esquema de sistemas de control: sistema entrada-salida [19].	16
Figura 4. La celda solar y el módulo solar como componentes básicos de energía solar fotovoltaica [39].18	
Figura 5. Espectro dentro y fuera de la atmósfera [39].	20
Figura 6. Origen de la radiación global [39].	20
Figura 7. Radiación con superficies inclinadas: la radiación se compone de la radiación directa, difusa y reflejada.....	21
Figura 8. Elementos de un captador solar térmico [40].....	22
Figura 9. Sistema de captación de energía solar térmica.....	23
Figura 10. Balance energético en un invernadero [41].....	24
Figura 11. Diagrama de flujo de la metodología.....	27
Figura 12. Mapa de Control del proceso.	28
Figura 13. Invernadero del Instituto Tecnológico de Pachuca.....	30
Figura 14. Dimensiones del invernadero.....	31
Figura 15. Invernadero del Instituto Tecnológico de Pachuca (parte interior).....	32
Figura 16. Diseño del invernadero en Google SketchUp.....	37
Figura 17. Gráfico de temperatura al interior del invernadero en el mes de diciembre.	38
Figura 18. Gráfico de flujo de calor en el mes de diciembre.....	39
Figura 19. Gráfico de temperatura al interior del invernadero en el mes de enero.	39
Figura 20. Gráfico de flujo de calor en el mes de enero.....	40
Figura 21. Gráfico de temperatura al interior del invernadero en el mes de febrero.....	40
Figura 22. Gráfico de flujo de calor en el mes de febrero.....	41
Figura 23. Gráfico de temperatura al interior del invernadero en el mes de mayo.	42
Figura 24. Gráfico de flujo de calor en el mes de mayo.....	43
Figura 25. Temperatura interna en enero con PCM RT25.	44
Figura 26. Temperatura interna en un día de enero con PCM RT25.....	45
Figura 27. Temperatura interna en mayo con PCM RT25.	46
Figura 28. Temperatura interna en un día de mayo con PCM RT25.....	46
Figura 30. Ventilador para el sistema de climatización marca Ziehl-Abegg.	48
Figura 31. Calefactor eléctrico para el sistema de climatización marca Calelec.....	48
Figura 32. Características del sistema fotovoltaico.	50

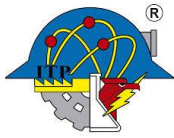
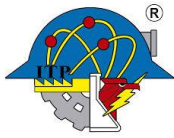


Figura 33. Consumos y producción de energía en kW del sistema solar fotovoltaico 51
Figura 34. Cotización del sistema fotovoltaico por la Empresa Ergosolar 54

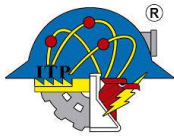
Índice de tablas

Tabla 1. Recursos para la revisión bibliográfica. 29
Tabla 2. Dimensiones del invernadero 30
Tabla 3. Recursos para la adaptación del invernadero. 31
Tabla 4. Recursos para las visitas a invernaderos. 32
Tabla 5. Recursos para el monitoreo de humedad y temperatura..... 33
Tabla 6. Datos climáticos 2017 Pachuca, Hidalgo (SEMARNAT, INIFAP)..... 34
Tabla 7. Sistema de calefacción convencional (datos de EnergyPlus)..... 47
Tabla 8. Características de los tipos de calefacción. 47
Tabla 9. Datos técnicos del ventilador y calefactor para el invernadero. 49
Tabla 10. Resumen de los elementos resultantes del cálculo. 49
Tabla 11. Costos de PCM RT25..... 52
Tabla 12. Costos de equipos para el sistema de climatización. (Conversión a Pesos Mexicanos 18 de marzo de 2019)..... 52
Tabla 13. Costos de equipos para el sistema de climatización. (Segunda propuesta). 53
Tabla 14. Tarifas establecidas por CFE en el año 2019. 55
Tabla 15. Cálculo del costo de electricidad para el sistema de climatización..... 56
Tabla 16. Energía eléctrica requerida en el invernadero para el sistema de climatización sin PCM (EnergyPlus)..... 57
Tabla 17. Energía eléctrica requerida en el invernadero para el sistema de climatización con PCM (EnergyPlus)..... 58



Lista de símbolos

<i>Símbolo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidades</i>
A	Superficie total de captación	m^2
C	Consumo diario de agua	L
c_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 de acumulación	$^\circ C$
T_A	Temperatura ambiente exterior media	$^\circ C$
T_e	Temperatura de entrada del agua de la red hidráulica	$^\circ C$
T_{ext}	Temperatura del aire fuera del invernadero	$^\circ C$
T_{int}	Temperatura del aire dentro del invernadero	$^\circ C$
T_m	Temperatura media del agua en el colector solar	$^\circ C$
w	Relación de la superficie de la cubierta a la superficie del suelo	-
W_{ext}	Humedad absoluta fuera del invernadero	$g_{agua}/kg_{aire seco}$
W_{int}	Humedad absoluta dentro del invernadero	$g_{agua}/kg_{aire seco}$
τ_c	Transmitancia de radiación solar del material de la cubierta del invernadero	-
ρ	Masa específica del aire	$kg_{aire seco}/m^3$



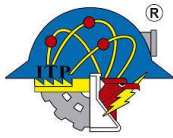
1. Introducción

El contenido de este proyecto muestra una propuesta de aplicación de la energía solar, tanto térmica como fotovoltaica, para la climatización de invernaderos. La finalidad, es atender a la actual demanda en el consumo de productos cultivados bajo invernadero, mediante la implementación de un sistema de control climático que permita reducir los costos energéticos y que sea amigable con el medio ambiente.

Después de la Segunda Guerra Mundial se desarrollaron de manera abundante los fertilizantes, insecticidas, fungicidas y herbicidas para una mayor producción agrícola, abandonando las antiguas prácticas de elaborar abonos propios. La demanda de más alimentos, la apertura de más tierras al cultivo, los residuos químicos industriales, el uso de fertilizantes y el uso de conservadores de alimentos envasados, entre otros, han causado alteraciones en la salud del hombre, tales como cáncer, diabetes, hipertensión arterial, obesidad y otros padecimientos. El cultivo de productos bajo invernadero representa, hoy en día, la garantía de consumir productos de calidad.

Los alimentos cultivados bajo invernadero son el resultado de un proceso agrícola sustentable [1]. La demanda de estos productos registra hoy en día un notable crecimiento. Actualmente, la agricultura bajo invernadero en México cubre casi 400,000 has. y está en franca expansión; la tasa media de crecimiento de esta actividad ha sido del 20% anual en promedio en los últimos 10 años. Entre el 85 y 90% de los productos de invernadero nacionales son de exportación. Chiapas, Oaxaca, Michoacán, Querétaro y Guerrero, son los estados de mayor producción de alimentos de este tipo. Los ingresos en divisas por las exportaciones de productos cultivados en invernadero son de alrededor de 400 millones de dólares promedio anual [2].

Por otra parte, cultivar en invernaderos implica mayores costos que el cultivo convencional, debido a la demanda energética de los sistemas de climatización que permiten mantener las condiciones óptimas para el desarrollo y crecimiento de los cultivos [3]. Derivado de dicho factor, se ha puesto especial atención a la tecnología de desarrollo de invernaderos, que incluye la automatización y control climático del cultivo aprovechando las energías alternativas y reduciendo el uso de combustibles fósiles, que representa daños significativos al medio ambiente, tales como calentamiento global y cambio climático [4].



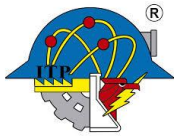
La energía solar, fotovoltaica (FV) o térmica, puede ser aprovechada para mantener las condiciones apropiadas de humedad relativa y temperatura según las necesidades del cultivo [5]. La implementación de energía solar representa una posible solución ante la escasez de combustibles fósiles y ante el incremento de contaminación ambiental causada por los gases de combustión. La energía solar es considerada energía limpia, debido a que durante el proceso de obtención y utilización no se emiten contaminantes a la atmósfera. Cabe mencionar que, además de los beneficios ambientales, existen beneficios económicos por la utilización de este tipo de energía en procesos de cultivo [6].

El sector agropecuario es un área de oportunidad para la implementación de energías solar dentro de sus procesos. Por esta razón, se estima que con un estudio costo-beneficio de la energía solar térmica y solar fotovoltaica aplicada al invernadero, objeto de estudio, es posible determinar cuál es la más adecuada para el funcionamiento del sistema de control.

Diversos estudios han sido realizados sobre el aprovechamiento de la energía solar para el control climático de invernaderos, es decir, instalación de paneles solares FV y colectores solares para la generación de energía. En el Capítulo 2 de este trabajo, es presentada una recopilación de los trabajos de investigación más recientes de la aplicación de energías limpias en invernaderos.

En el Capítulo 3 se definen los aspectos teóricos más relevantes contenidos en el proyecto, tales como tipos de invernaderos, variables consideradas en espacios protegidos, principios sobre balances energéticos y conceptos de energía solar FV y solar térmica, entre otros. De igual forma se describen los programas utilizados para solución de modelos y simulaciones pertinentes.

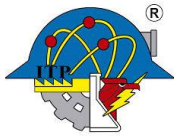
El Capítulo 4 presenta la metodología seguida para la ejecución del proyecto que fue llevado a cabo en el invernadero ubicado al interior del Instituto Tecnológico de Pachuca. En enero de 2018 se comenzó con el monitoreo y registro diario de condiciones climáticas en el interior del invernadero, lo cual permitió el desarrollo del balance térmico y, por consiguiente, la determinación de sus necesidades energéticas en las diferentes estaciones del año. Una vez conocido el comportamiento de temperatura y humedad en el invernadero, se evaluaron las posibles fuentes alternativas de energía para controlar los parámetros de estudio, se determinó



su costo y fue seleccionado el más apropiado. Posteriormente, se inició la construcción del prototipo, re realizó el diseño de las pruebas y se aplicaron al experimento.

El análisis y la discusión de resultados pertenecen al Capítulo 5. En esta sección se muestran los resultados generados en los softwares seleccionados para la solución de los modelos matemáticos de comportamiento de temperatura y humedad relativa dentro del invernadero. De acuerdo con las investigaciones presentadas previamente por diferentes autores, se realiza una comparativa de resultados obtenidos, y se discuten diferencias y similitudes entre ambos. De igual manera se presentan los cálculos obtenidos en el diseño de los sistemas solar FV y solar térmico, incluyendo un análisis de las ventajas y desventajas de cada uno.

Finalmente, en el Capítulo 6 son presentadas las conclusiones del proyecto de investigación, que incluye la selección de la energía alternativa para el sistema de control de temperatura y humedad. En esta sección se menciona la efectividad de los métodos seleccionados para el desarrollo del proyecto y se sugieren recomendaciones para mejorar el prototipo. Como parte esencial de este Capítulo, se verifica el cumplimiento de objetivos.



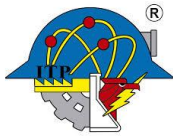
2. Estado del arte

El desarrollo de las energías renovables, en la última década, ha dado un impulso notable en la conservación del medio ambiente y en la disminución de costos en recursos energéticos de diversos sectores industriales. El medio agropecuario no ha sido la excepción, ya que se han aprovechado las fuentes de energías alternas para satisfacer necesidades de electricidad y control climático dentro de invernaderos.

Abdel-Ghany y Al-Helal [8], desarrollaron un modelo térmico en un invernadero estimando las cantidades de energía solar absorbidas por los componentes del invernadero y pérdidas fuera del invernadero, lo cual es generalmente despreciado en los balances térmicos. La teoría de la superposición y la técnica de trazado de rayos fueron utilizadas para el análisis. Los resultados de las relaciones presentadas fueron precisos y más realistas comparados con los resultados de otras relaciones reportadas en las literaturas.

Fitz-Rodríguez et al [9] desarrollaron una aplicación para computadora en donde pueden ser simuladas las variables temperatura y humedad dentro de un invernadero, de acuerdo con las condiciones climáticas de entrada. El proyecto fue desarrollado con fin pedagógico para describir el comportamiento de parámetros de diferentes tipos de invernadero y bajo diversos factores medioambientales. Mediante el simulador fue posible replicar más de 300 000 escenarios diferentes de acuerdo con las variables del invernadero y se determinó que el modelo puede generar buenas aproximaciones con diferentes configuraciones para periodos de 28 horas de simulación, acercándose considerablemente a la realidad.

Farzaneh-Gord et al [10], propusieron un análisis económico para evaluar la efectividad de un sistema de generación de calor para un invernadero utilizando energía solar como fuente alternativa de energía. El trabajo desarrollado fue basado en el método Valor Presente Neto, (NPV, por sus siglas en inglés). El análisis económico demostró que, con base en los resultados, se ahorraron más de 7.7 millones de dólares y más de 11 mil litros de combustibles anuales. Finalmente, se determinó de igual manera que el tiempo de recuperación de la inversión es de diez años.

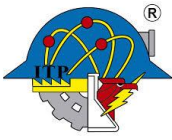


Guadarrama [11] presentó el diseño de un sistema automatizado de calefacción y de riego para cultivo de jitomate en invernadero, utilizando heces de ganado para generar biogás y, por consecuencia, bajas concentraciones de CO₂ que no dañan al cultivo, mientras que las emisiones de H₂S se retuvieron con filtros. Se demostró que, al sustituir los sistemas convencionales de ventilación, extracción y de riego dentro de los invernaderos convencionales por controladores automáticos, se reduce el costo de producción y se mejora la calidad del producto.

Fabrizio [12] desarrolló una investigación sobre el rendimiento energético de algunos de los sistemas tecnológicos más recientes que contribuyen de mejor manera a la demanda de energía para el control climático en invernaderos para lograr una producción intensiva del cultivo. El trabajo se centra en dos aspectos principales: el uso de láminas de polipropileno como sistema de calentamiento y la captura de energía solar mediante colectores solares de plástico de bajo costo. Los resultados demostraron que se pueden lograr ahorros del orden del 30% utilizando más materiales transparentes aislados, sin embargo, la aplicación de colectores solares representa un problema debido a la gran extensión de terreno que utiliza.

Attar et al [13], presentan en su artículo una simulación *TRNSYS* para evaluar el rendimiento de un sistema solar de calentamiento de agua utilizado para invernaderos. El sistema se compone principalmente de dos colectores solares y un intercambiador de calor de polipropileno capilar integrado al invernadero. Los resultados de la simulación mostraron que, al aumentar el volumen del tanque, la temperatura a la salida del colector disminuye. Además, la alta tasa de flujo aumenta la eficiencia del sistema y se determinó que al disminuir la tasa de flujo de entrada del intercambiador ese reducen las pérdidas de calor. Finalmente se demostró que se puede aumentar la temperatura del aire interior del invernadero en 5 ° C y hacerlo adecuado para la agricultura de tomates.

Joudi y Farhan [14], emplearon un sistema de seis calentadores de aire solares colocados en el techo del invernadero sin afectar los requerimientos de luz solar de las plantas. Utilizaron un método de balance de energía para calcular la carga de calor incluyendo el almacenamiento de calor del suelo, ya que se determinó que contribuye de un 13 a un 19% de la carga de calor requerida, lo cual reduce la demanda de calor dentro del invernadero. La experimentación se llevó a cabo durante el invierno. El flujo de masa de aire a través de los colectores fue variado desde 0.006 a 0.012 kg/s-m². Se determinó que el flujo de masa de aire de 0.012 kg/s-m² generó

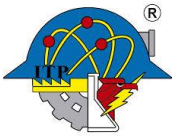


alrededor de 84% de la demanda diaria de calor para mantener una temperatura de 18 °C dentro del invernadero. En este proyecto se concluyó que el calor almacenado durante el día con el sistema de calentadores de aire solares se cubre completamente e incluso excede en un 46%, aproximadamente, por lo que se estima que un banco de calentadores que cubra el 45% del área total del techo puede proveer la demanda de calor requerida por día.

Mantener las condiciones climáticas óptimas en un invernadero es esencial para el correcto crecimiento de los cultivos y evitar enfermedades en las plantas, lo cual representa un reto debido a que diferentes variables deberán ser controladas al mismo tiempo: temperatura, humedad relativa y presión de vapor. Körner y Challaw [15] crearon un software de control de régimen de humedad (*MATLAB* versión 6.0, *MathWorks, Natick, MA, USA*) basado en procesos para un cultivo de crisantemo con integración de la temperatura. Los puntos de ajuste de control de la humedad relativa se generaron en función de los procesos subyacentes. El rendimiento del invernadero con este régimen de humedad y diferentes regímenes de temperatura se simuló con respecto al clima de invernadero, el consumo de energía y la fotosíntesis. En comparación con un punto fijo de 80% de humedad relativa, el consumo anual de energía de un cultivo de crisantemo durante todo el año podría reducirse en un 18% haciendo integración de temperatura.

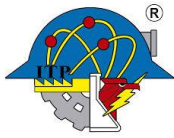
Attar y Farhat [16] desarrollaron un modelo térmico para investigar el potencial de un sistema solar de calentamiento de agua para un invernadero. El sistema está basado principalmente en el acoplamiento de intercambiadores de calor asegurando el abastecimiento de calor al cultivo. Para el análisis se realizó un estudio numérico utilizando el software *TRNSYS 16* para estimar la longitud del intercambiador de calor y el flujo de agua que proporcionarían mejor desempeño del sistema. Los datos de entrada al software fueron tomados para un desarrollo experimental. Los costos y eficiencia del sistema fueron estimados para invernaderos de diferentes tamaños. Se concluyó que el costo de calefacción de un invernadero de 1000 m³ se redujo en 51.8% y la eficiencia del sistema fue validada por el estudio experimental, ya que al realizar la comparación de la simulación y el experimento se registró un error que no excedió del 6%, con lo cual concluyen que el software *TRNSYS 16* es una buena herramienta para reproducir el comportamiento muy cercano a la realidad de un sistema solar de calentamiento de agua.

Attara et al [17] desarrollaron un modelo térmico para investigar la posibilidad de utilizar la energía térmica del suelo para la calefacción o refrigeración del invernadero. Los



intercambiadores de calor capilares de polipropileno, suspendidos en el aire y enterrados en el suelo del invernadero, se utilizan para almacenar o eliminar el exceso de energía solar. Durante el día, los intercambiadores suspendidos en aire recuperan la energía solar en exceso. Esta energía recuperada se almacena en el suelo a través de los intercambiadores enterrados. Por la noche, la energía térmica almacenada es devuelta por los intercambiadores suspendidos para calentar el aire del invernadero. Los resultados fueron promisorios, pero no suficientes para alcanzar la temperatura deseada y se necesitó una contribución eléctrica. La mejora de este sistema al almacenar el exceso de energía en el suelo ha aumentado la temperatura del aire dentro del invernadero en 6°C por la noche y ha hecho que el microclima del invernadero sea apropiado para el cultivo de pimiento. Sin embargo, se observó que en el período de primavera (de marzo a mayo) el modo de calentamiento solo puede ser suficiente para alcanzar la temperatura adecuada. Considerando el período caluroso del año (junio a agosto), donde la cantidad de luz solar es muy importante y la alta temperatura dentro del invernadero puede dañar las plantas, se requiere el uso de un sistema de enfriamiento. La circulación del agua fría en los intercambiadores (suspendida en el aire y enterrada en el suelo) aseguró la disminución de la temperatura del aire de invernadero en 12°C . Como conclusión, el sistema de control, utilizado en sus diferentes modos, ha sido un dispositivo interesante para hacer que el invernadero sea un lugar adecuado para el cultivo de pimiento durante todo el año.

Kiyan et al [18], diseñaron en 2013 un sistema híbrido de calefacción en un invernadero, utilizando combustibles fósiles y energía solar térmica. El sistema consiste de un colector solar, una unidad auxiliar de calentamiento con combustible, un sistema de almacenamiento de agua caliente y una unidad de control y bombeo. Se desarrolló un modelo matemático en Matlab/Simulink para predecir la temperatura del agua almacenada, la temperatura al interior del invernadero y la cantidad de combustible auxiliar, todo en función de parámetros, tales como localización, dimensiones y datos climatológicas de la región. Los resultados de la simulación indicaron que, la instalación sistema híbrido en un invernadero es factible, aunque el tiempo de retorno de la inversión es mayor en comparación con los sistemas convencionales que trabajan con combustibles fósiles, sin embargo, al reducir las emisiones de gas significativamente, se obtiene un considerable impacto ambiental positivo.

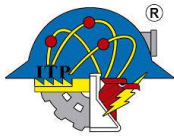


Leal [19] presentó una propuesta a la que denominó “modelo mejorado” para control climático dentro de un invernadero, que consiste en considerar los efectos de la humedad sobre la temperatura partiendo de un modelo convencional encontrado en la literatura, introduciendo una nueva variable del tiempo, la humedad, dentro de la ecuación. En la simulación, se comparan ambas ecuaciones, la convencional y la propuesta, y finalmente el autor demuestra que el modelo mejorado presenta una mayor sensibilidad en cuanto a las variaciones climatológicas a lo largo de un día.

En su estudio, Panwar et al [20], consideran un factor importante para el correcto desarrollo de los cultivos, el CO₂. El enriquecimiento de CO₂ reduce la inhibición de oxígeno para la fotosíntesis, mientras que, por otro lado, incrementa la fotosíntesis neta en las plantas. Adicional a esto, una concentración elevada de CO₂ eleva la temperatura óptima para el crecimiento del cultivo. Los autores realizaron una recopilación de información de la literatura y diversos artículos sobre la influencia del CO₂ en el desarrollo del cultivo y sobre las técnicas de ventilación, calentamiento y enfriamiento más exitosas en invernaderos, lo cual representa una importante herramienta para el lector, ya que permite conocer de manera breve las contribuciones más relevantes resaltando las ventajas e importancia de cada trabajo.

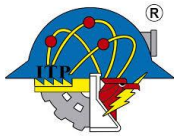
Por su parte, Abdel-Ghany y Toyoki Kozai [21] implementaron un modelo dinámico de simulación para el enfriamiento por niebla en un invernadero, siendo posible la predicción de temperaturas del aire, plantas, cubierta, suelo y la humedad relativa al interior del invernadero. La transpiración y evaporación también fueron consideradas y predichas. El enfriamiento se llevó a cabo de manera intermitente mediante la aspersión agua en forma de neblina a velocidad constante. El modelo matemático fue resuelto numéricamente para las ecuaciones diferenciales y fue validado para diferentes condiciones de aspersión. Los resultados demostraron que el ambiente interior del invernadero se ve afectado considerablemente por la cantidad de agua que se evapora durante el proceso de aspersión.

Trypanagnostopoulos et al [22] 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, por lo



que la introducción de la energía solar FV en los techos espacios protegidos resulta una alternativa factible para el ahorro de energía eléctrica proveniente de combustibles fósiles.

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. Se han realizado diversos estudios sobre sistemas sostenibles de climatización específicos ya construidos e instalados en los invernaderos, en donde se analiza su eficiencia y se comparan los datos experimentales con los resultados de simulaciones en diferentes softwares, sin embargo, es pertinente realizar una evaluación sobre las diferentes tecnologías disponibles para solventar las necesidades energéticas de los invernaderos y seleccionar aquella o aquellas que representen mayores beneficios económicos y de sustentabilidad para el caso de estudio, sin descartar la reproducibilidad del modelo a escalas mayores.



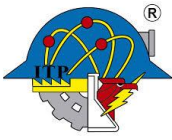
3. Marco teórico

3.1 Invernaderos

El invernadero es una estructura de tamaño y forma variable cubierta de vidrio, plástico u otros materiales herméticos al agua y a la radiación infrarroja que, al atraparla, aumentan y retienen el calor en su interior para favorecer el crecimiento de las plantas. Las principales ventajas de estas estructuras cerradas, es obtener condiciones artificiales de microclima para cultivar plantas fuera de estación en condiciones óptimas, que permiten alcanzar alta productividad, a bajo costo, en menos tiempo, sin daño ambiental, protegiéndose de las lluvias, granizo, heladas, insectos y excesos de viento que pudieran perjudicar al cultivo. Cuando una planta desarrollada en invernadero no es productiva, es porque ha tenido problemas de exceso o falta de humedad, temperatura, ventilación, luminosidad o nutrientes, es decir ha tenido problemas derivados del diseño, construcción del invernadero y manejo del cultivo [23].

Un invernadero es un recinto en que se pueden mantener constantes la temperatura, humedad y otros factores ambientales para favorecer el cultivo de plantas, por tanto, su finalidad es proporcionar condiciones ambientales que se aproximen a las óptimas para un cultivo en las distintas fases de su desarrollo vegetativo e incluso la obtención de producción en estaciones diferentes a las normales. En realidad, es una superficie cerrada por un determinado material que permite la transmisión de un determinado porcentaje de radiación solar, y que confina total o parcialmente una zona de atmósfera. Esta configuración produce el denominado efecto invernadero debido a que el material de cubierta transmite un amplio porcentaje de radiación solar (visible e infrarrojo cercano) pero no transmite las longitudes de onda superiores (infrarrojo medio y lejano).

La cubierta transmite gran parte de la radiación solar que es absorbida por los sólidos que se encuentran en el invernadero (en principio, suelo y cultivo) aumentando su temperatura, lo que provoca que reemitan energía en forma de radiación térmica que la cubierta no transmite (o sólo una pequeña parte) al exterior, quedando esta energía emitida atrapada en el recinto [24].



Las estructuras de los invernaderos deben reunir las condiciones óptimas, tales como las siguientes:

- Ligereza y resistencia
- De material económico y de fácil conservación
- Susceptibles de poder ser ampliados
- Adaptables a los materiales de la cubierta.

Los tipos de invernaderos principalmente varían en cuanto al diseño de su techumbre. En la Figura 1 se aprecian los diferentes tipos de techos y cubiertas y posteriormente se describe cada tipo de invernadero.

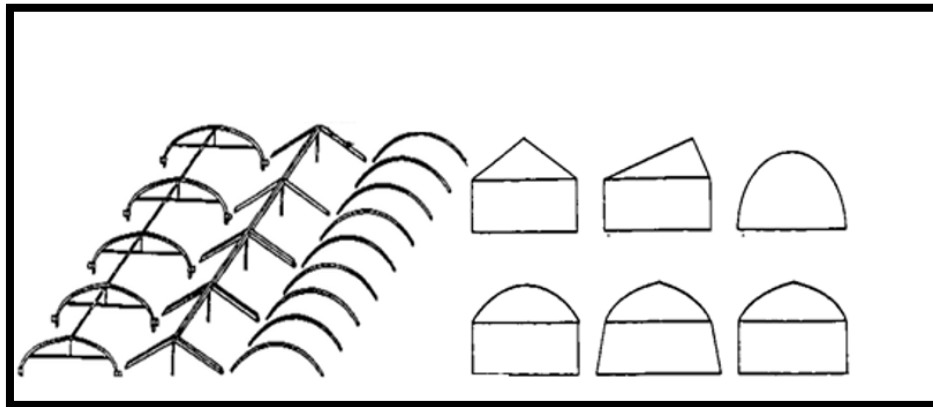
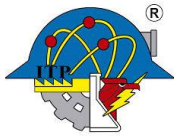


Figura 1. Tipos de techos y cubiertas para invernaderos.

3.1.1 Tipos de invernaderos

El diseño de la armazón del invernadero es una de las partes más importantes que los horticultores deciden, ya que implica el gasto más elevado dentro de la inversión de un negocio. El diseño y tipo de estructura define el potencial del invernadero para ventilarse, así como la entrada de radiación solar y la luminosidad para favorecer al proceso de la fotosíntesis de las plantas.

Los tipos de invernaderos pueden clasificarse de acuerdo con su tipo de material para la estructura, o el tipo de material de la cobertura y por su tipo de techo [25], según se muestra en la Figura 2 a), b) y c).



a)



b)



c)

Figura 2. Tipos de invernaderos: a) Plano, b) Túnel, c) Capilla.

a) Invernadero tipo plano

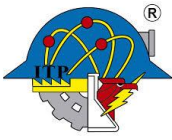
En los últimos años se ha producido un progresivo abandono de las estructuras planas debido a la dificultad que éstas presentan para la implantación de ventilación cenital y los efectos perjudiciales que el agua de lluvia origina al caer sobre los cultivos. Frente a esta regresión de los invernaderos de tipo plano, se observa un avance paulatino de los invernaderos tipo túnel [26].

b) Invernadero tipo túnel

Las estructuras de protección de cultivos tipo túnel, debe de utilizar un determinado material de cobertura que permita pasar a través de su tejido la mayor cantidad posible de radiación solar, al mismo tiempo que se logre conservar la humedad en el suelo y la temperatura en los alrededores de la planta. Es importante que se retenga o no, dependiendo del sistema de protección, el calor emitido por las plantas y el suelo hacia el exterior durante las horas nocturnas, y finalmente, debe de ser ligero [27].

c) Invernadero tipo capilla

Los invernaderos tipo capilla tienen la techumbre formando uno o dos planos inclinados, según sea un agua o dos aguas. Este tipo de invernadero es conveniente para los casos en los que el horticultor es quien lo construye, debido a que su fabricación y mantenimiento son sencillos y se le puede adaptar todo tipo de plástico en la cubierta, tanto rígido como flexible. Otra ventaja del invernadero tipo capilla se debe a la ventilación vertical que se realiza de manera sencilla, aunque se dificulta cuando son colocados en batería [26].



3.2 Factores climatológicos considerados en el invernadero

Es fundamental conocer la interacción que los cultivos comparten con su ambiente. Las variables ambientales que más influyen en el desarrollo y productividad de las plantas son la radiación solar, la temperatura y la humedad ambiental [28]. Cada variable se describe a continuación.

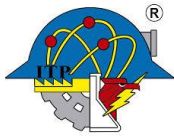
3.2.1 Radiación solar

La luz es el factor principal para el crecimiento de la planta porque impulsa la fotosíntesis. La radiación es un elemento muy importante para el control climático de invernadero porque afecta de manera significativa la temperatura. Separar ambos conceptos resulta complejo, porque radiación y luz son ambas partes del sol, pero en realidad son cosas diferentes. La radiación es un término amplio que incluye toda clase de rayos y ondas, como la luz, el calor, los rayos ultravioletas (UV), los infrarrojos (IR) o rayos X.

Se debe destacar la extraordinaria importancia de la energía solar para prácticamente todos los procesos fisiológicos de la planta. La temperatura, factor que afecta todos los procesos fisiológicos del vegetal, es en realidad una medida indirecta de la energía solar disponible en el ambiente. La radiación solar y, consecuentemente, la temperatura son los únicos factores sobre los cuales la intervención del hombre es relativamente limitada y de pequeña significación económica. La productividad de una vegetación es directamente proporcional a la energía solar o la intensidad de la radiación solar [29].

Las plantas absorben radiación –de 400 a 700 nm– en sus células y la usan para la fotosíntesis, transformando gas de bióxido de carbono (CO_2) en azúcares. Por eso la radiación entre 400 a 700 nm es llamada radiación fotosintéticamente activa (PAR: Photosynthetic Active Radiation) [30].

La radiación solar es la principal fuente de entrada energética al invernadero, la mayor parte es absorbida por la propia planta; un porcentaje menor lo absorbe el suelo y algo la estructura del invernadero [31].



La mayor parte de los cultivos requieren de una buena iluminación. Iluminaciones limitadas originan reducción en la fotosíntesis neta e implican mayor competencia por los productos asimilados, con incidencia en el desarrollo y en la producción. Valores de radiación total diaria alrededor de 0.85 MJ m^{-2} , son los umbrales considerados mínimos para la floración y formación de frutos, siendo preferible mayor iluminación en menor período de tiempo que iluminaciones bajas durante un mayor tiempo [32].

3.2.2 Humedad absoluta y relativa

Para un valor constante de vapor de agua en la atmósfera del invernadero (humedad absoluta), a medida que aumenta la temperatura de la atmósfera del invernadero, disminuye la humedad relativa de la misma. También al disminuir la temperatura, aumenta la humedad relativa.

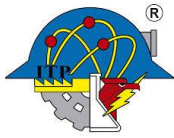
La humedad de la atmósfera de invernadero interviene en la transpiración, en el crecimiento de los tejidos, en la fecundación de las flores y en el desarrollo de enfermedades criptogámicas.

La humedad del ambiente influye bastante en el fenómeno de la transpiración: cuanto más húmedo este el ambiente menos posibilidades hay de aumentar la evaporación, a no ser que se aumente la temperatura del ambiente. Cuando la transpiración es intensa, consecuencia de falta de humedad en el ambiente, puede hacer más concentración de sales en las partes donde se realiza la fotosíntesis y quedar disminuida esa función.

Cuando la fotosíntesis permanece inactiva, sin luminosidad, la transpiración de las plantas es menor y no importa que exista más humedad, si no existen problemas de enfermedades criptogámicas. Cada especie vegetal requiere en el ambiente una cantidad de humedad distinta, variando de unos cultivos a otros [28].

3.2.3 Temperatura

Uno de los aspectos climáticos más importantes para el cultivo en un invernadero es la temperatura. Bajo niveles normales de luz, este parámetro es el de mayor influencia en el crecimiento y desarrollo de las plantas. Además, la temperatura afecta directamente al resto de las condiciones climáticas dentro del invernadero. Interviene en el funcionamiento de vegetales



fotosintéticos, en la respiración, la permeabilidad sobre la membrana celular, la absorción de agua y nutrientes, en la transpiración y actividades enzimáticas, entre otras.

El principal parámetro en el balance energético de un invernadero es la temperatura exterior, que determina de forma directa las necesidades de refrigeración y calefacción. La ventilación de un invernadero puede realizarse de manera natural, a través de ventanas, llamada ventilación pasiva o estática, o bien artificialmente utilizando ventilación forzada, por medio de extractores.

En determinadas ocasiones, debido a la situación climática, resulta insuficiente la mejora de ventilación para disminuir la temperatura y se vuelve necesario incorporar sistemas de refrigeración basados en la evaporación de agua, que permiten de forma simultánea la disminución de la temperatura y aumentan la humedad en el aire.

Por otro lado, es necesario instalar sistemas de calefacción artificial en regiones con bajas temperaturas invernales, o para aquellos cultivos que requieren condiciones térmicas especiales. Pueden distinguirse dos mecanismos distintos para la distribución de calor, por aire forzado, conocido como transferencia de calor por convección o por agua caliente, denominado conducción de calor por radiación [33].

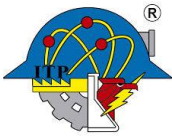
En un invernadero, se consideran las temperaturas de la superficie exterior de la cubierta, la temperatura de la superficie interior de la cubierta, temperatura del cultivo, temperatura de la superficie del suelo y la temperatura de cada una de las capas en las que se divide el suelo.

3.3 Equipos para manipular el clima

Ante la imposibilidad de modificar los elementos del clima para producir todo el año a la intemperie, se han diseñado estructuras y equipos que modifican ciertos elementos climáticos y crean condiciones favorables para el desarrollo de las plantas. Entre las estructuras más importantes se encuentran los invernaderos, los Bioespacios y las casas sombra [34].

3.4 Control climático en un invernadero

Aun dentro de cualquier tipo de estructuras, las condiciones climáticas en un invernadero varían en tiempo y espacio. La percepción de los cambios con los sentidos humanos y su ajuste sería



una labor difícil y costosa, por lo que se han desarrollado los automatismos, los cuales son mecanismos de precisión que registran los cambios en los elementos climáticos a regular y que a veces son imperceptibles para los humanos. Estas variaciones se visualizan, registran e interpretan para tomar decisiones [35].

La regulación de un proceso, en un sistema físico, agrupa el conjunto de técnicas y medios materiales que se encargan de regular las condiciones para alcanzar la magnitud física óptima para el correcto funcionamiento del sistema.

El principio general de la regulación consiste en cuantificar el valor del parámetro que se pretende regular, compara el valor obtenido con el valor óptimo y finalmente poner en funcionamiento los equipos que sean pertinentes para reducir la diferencia entre el valor medido y el valor óptimo.

En control clásico, los procesos a regular son considerados como sistemas entrada-salida. Las entradas del sistema en un invernadero son: el aporte de CO₂, el aporte de calor de calefacción y la apertura de ventanas para ventilar. Las perturbaciones son la temperatura exterior, la velocidad y dirección del viento exterior, la humedad exterior, la radiación y el CO₂ exterior. Las salidas son la temperatura interior, la humedad interior y el CO₂ interior [36]. El proceso puede resumirse en la Figura 3.

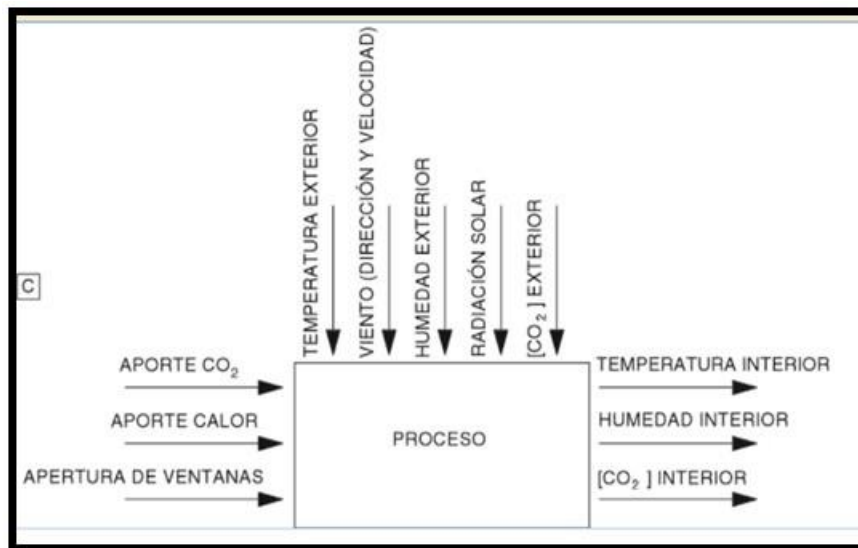
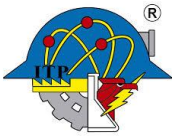


Figura 3. Esquema de sistemas de control: sistema entrada-salida [19].



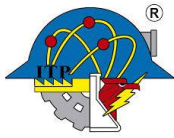
Existen diferentes medios para generar las condiciones óptimas de crecimiento y desarrollo del cultivo de jitomate. En general, se utilizan sistemas de generación de calor como calderas, las cuales funcionan empleando combustibles fósiles o incluso, calefactores que operan con energía eléctrica suelen ser utilizados.

3.5 Sistemas de control utilizando energías renovables

Las energías renovables son, por definición, fuentes de energía inagotables y autorregeneradoras del recurso energético [37]. De entre las energías alternas, las fuentes renovables ocupan particular atención; éstas son aquellas que por su capacidad de regeneración natural y cantidad en relación a los consumos que los seres humanos pueden hacer de ellas, son inagotables y su explotación con responsabilidad poco afecta al medio ambiente; por esta característica es que reciben su nombre y están consideradas como fuentes que permiten sostener el consumo. Estas son: la energía solar, la eólica, la biomasa, la geotérmica, las pequeñas centrales hidráulicas y la oceánica [38]. La energía solar y biomasa serán descritas a continuación.

3.5.1 Energía solar fotovoltaica

A la transformación directa de la luz solar en electricidad en un dispositivo optoelectrónico se le llama Efecto Fotovoltaico. A la energía generada mediante este proceso se le conoce como Energía Solar Fotovoltaica (FV). Dicho fenómeno se lleva a cabo en dispositivos o uniones formados por sólidos, líquidos y gases, pero es en sólidos, especialmente en los llamados semiconductores, donde se han observado las mayores eficiencias de conversión de potencia luminosa (luz) a potencia eléctrica (electricidad). La unidad mínima de transformación en donde se realiza el efecto FV se llama celda solar. La electricidad que se genera es del tipo directo o corriente directa (CD). Las celdas solares se asocian o agrupan mediante conexiones en serie o en paralelo para aumentar la potencia de generación y formar los llamados módulos FV's, y éstos conectados en serie o en paralelo para formar los arreglos FV's. Independientemente del tipo de agrupación eléctrica entre las celdas y/o los módulos solares, a las tecnologías de transformación de luz a electricidad se les llama comúnmente generadores fotovoltaicos. Las celdas solares y los módulos fotovoltaicos se especifican y comercializan por la potencia



máxima o potencia pico que pueden generar cuando sobre ellos incide una irradiación de $1,000 \text{ W/m}^2$ llamada el pico de la radiación solar [39].

Los generadores fotovoltaicos son usados para suministrar electricidad a cualquier aparato eléctrico en CD tales como motores, lámparas, baterías para almacenar energía, y cualquier aparato electrodoméstico en corriente alterna (CA), sólo que en este caso es necesario usar un acondicionador de energía que transforme la CD en CA. Con este tipo de acondicionadores es posible que un sistema FV opere en paralelo e interactúe con la red de corriente alterna convencional. El acoplamiento entre el generador FV, el acondicionador y sistema de almacenamiento de energía, y las cargas a energizar se les conoce con el nombre de sistema fotovoltaico [39].

El componente básico de cada sistema fotovoltaico es la celda solar (Figura 4). En la mayoría de los casos está fabricada de silicio, un semiconductor que también se usa para diodos, transistores y chumaceras. En las celdas solares se genera un voltaje de aproximadamente 0.5 V. La corriente liberada varía según la radiación y el área de la celda, y se encuentra entre 0 y 10 A [39].

Para incrementar el voltaje de 20-50 V, por ejemplo, muchas celdas se conectan en serie en un módulo solar (Figura 4). Además de esto, las celdas solares en los módulos están protegidas mecánicamente y selladas contra influencias ambientales (por ejemplo, entrada de humedad).

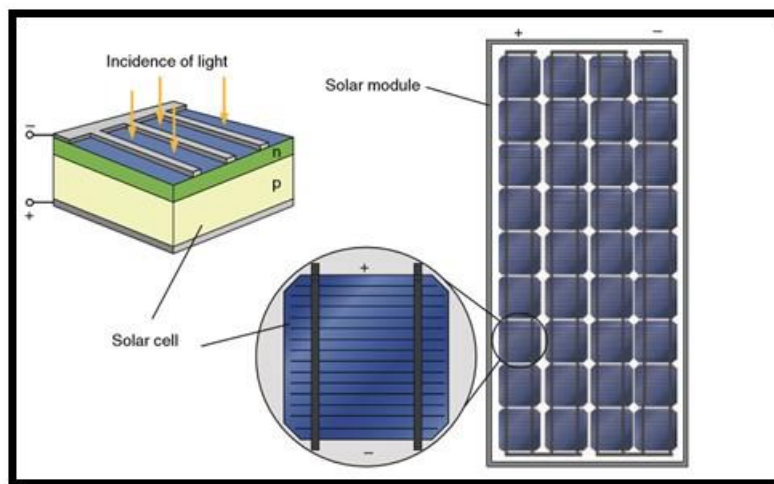
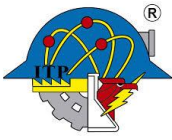


Figura 4. La celda solar y el módulo solar como componentes básicos de energía solar fotovoltaica [39].



La potencia de un módulo solar se mide de acuerdo con las condiciones de prueba estándar y se define por la intensidad de luz solar, E , a una temperatura de 25 °C para el módulo.

$$E = 1000 \text{ W/m}^2 \quad (1)$$

La capacidad del módulo solar en condiciones estándar es la potencia nominal del módulo. Se proporciona en Watt-Peak (W_p) ya que en realidad describe la potencia máxima del módulo en condiciones óptimas.

El grado de eficiencia Módulo de un módulo solar es la relación entre la potencia nominal eléctrica entregada referenciada y la potencia óptica incidental P_{Opt} :

$$\eta_{Modulo} = \frac{P_{STC}}{P_{opt}} = \frac{P_{STC}}{E_{STC} \cdot A_M} \quad (2)$$

Donde A_M es el área del módulo.

La constante solar es la irradiación solar extraterrestre (I_{cs}), incidente en un plano perpendicular a la dirección de esta radiación, cuando la Tierra está a la distancia media del Sol (149.5×10^5 km). De acuerdo con el World Radiation Center, el valor de I_{cs} es:

$$I_{CS} = 1367 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad (3)$$

Cada cuerpo caliente emite radiación a su entorno. Según la Ley de radiación de Planck, la temperatura de la superficie determina el espectro de la radiación. En el caso del sol, la temperatura de la superficie es de 5778 K, lo que conduce al espectro de cuerpo negro idealizado que se muestra en la Figura 9 (línea de puntos). El espectro real medido fuera de la atmósfera de la Tierra (AM 0) sigue aproximadamente esta línea idealizada. El término AM 0 significa masa del aire 0 y significa que esta luz no ha atravesado la atmósfera. Si las cantidades individuales de este espectro se agregan juntas en la Figura 5, entonces el resultado es una irradiación de 1367 W / m^2 , que es la constante solar ya mencionada. Sin embargo, el espectro cambia cuando la luz del sol pasa a través de la atmósfera.

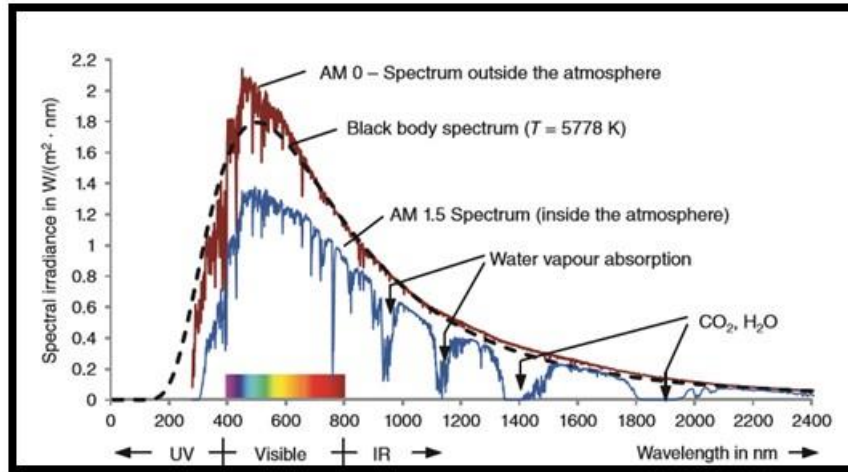
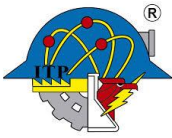


Figura 5. Espectro dentro y fuera de la atmósfera [39].

Los diversos efectos, como la dispersión y la absorción, provocan el debilitamiento del espectro AM 0 del Espacio. En la suma del espectro de AM 1.5 en la Figura 5, solo se obtuvieron 835 W / m². Por lo tanto, de los 1367 W / m² originalmente disponibles, la Tierra recibe solo el 61% de la llamada radiación directa. Sin embargo, debido a la dispersión de la luz en la atmósfera existe una porción adicional: la radiación difusa (Figura 6).

Las porciones débiles de radiación llegan desde todas las direcciones del cielo y se agregan a la radiación difusa, $E_{Diffuse}$. La suma de ambos tipos de radiación se llama radiación global, E_G (Ecuación 4):

$$E_G = E_{Direct} + E_{Diffuse} \quad (4)$$

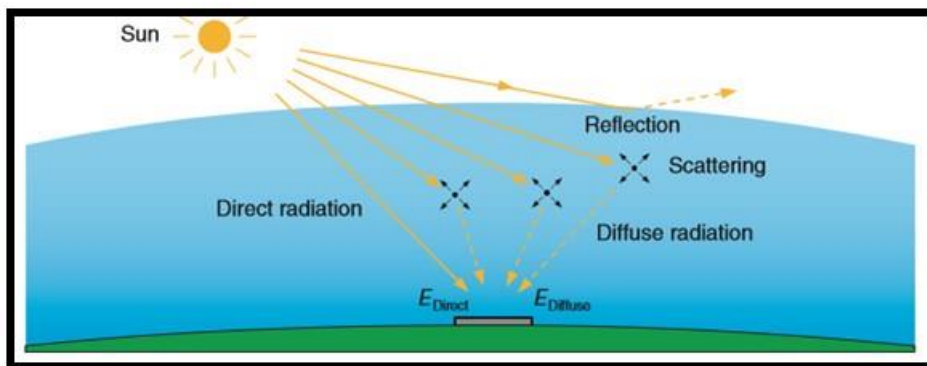
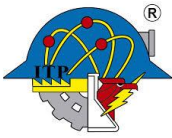


Figura 6. Origen de la radiación global [39].



La Figura 7 muestra las relaciones de radiación en el caso de una superficie de módulo solar adecuada (o más generalmente, un generador solar). Además de la radiación directa y difusa, todavía hay otro componente de radiación: la radiación reflejada desde el suelo. Estos se suman a una radiación general E_{Gen} en el generador inclinado (Ecuación 5).

$$E_{Gen} = E_{Direct_Gen} + E_{Diffuse_Gen} + E_{Refl_Gen} \quad (5)$$

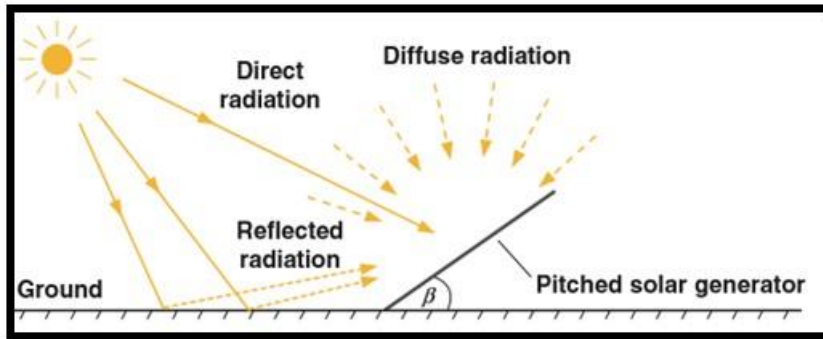


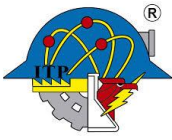
Figura 7. Radiación con superficies inclinadas: la radiación se compone de la radiación directa, difusa y reflejada

3.5.2 Energía solar térmica

La producción de energía solar térmica (o termosolar), es una forma de aprovechamiento de la energía del sol para producir calor con diferentes fines tales como la producción de agua caliente destinada al consumo de agua doméstico (agua caliente sanitaria, calefacción), la producción de energía mecánica y a partir de ella energía eléctrica, y otras aplicaciones [40].

Una central solar térmica es una instalación industrial en la que, a partir del calentamiento de un fluido mediante radiación solar y su uso en un ciclo termodinámico convencional, produce la potencia necesaria [40].

Estos sistemas de energía solar utilizan la radiación solar como fuente de energía de alta temperatura para producir electricidad. La radiación solar en la superficie terrestre posee una densidad (kW/m^2) adecuada para la producción de agua caliente con colectores solares planos, pero no para un ciclo termodinámico eficiente debido a su baja temperatura. Por tanto, resulta necesario concentrar los rayos solares para aumentar la densidad de radiación y alcanzar temperaturas medias y elevadas ($300\text{ }^\circ\text{C}$ hasta $1000\text{ }^\circ\text{C}$) con lo cual se obtiene un rendimiento aceptable en el ciclo termodinámico. La captación y concentración de los rayos solares se hacen



por medio de espejos con orientación automática que apuntan a un absorbedor donde se calienta el fluido. El calor solar recogido durante el día puede almacenarse en medios líquidos, sólidos o que cambian de fase (sales fundidas, cerámicas, cemento, etc.). Por la noche, se extrae este calor para hacer funcionar la turbina [40].

El principio básico de funcionamiento de estos sistemas solares es sencillo: la radiación solar se capta y el calor se transfiere a un fluido (generalmente agua o aire). Para aprovechar la energía solar térmica se usa el captador solar, también denominado colector o placa solar. El fluido calentado se puede usar directamente (por ejemplo, para calentar agua en piscinas) o indirectamente mediante un intercambiador de calor (por ejemplo, en el caso de la calefacción de una habitación). El colector es el elemento que capta la energía solar. Normalmente consta de los siguientes elementos (Figura 8).

1. Cubierta frontal transparente, por lo general vidrio.
2. Superficie absorbente, por donde circula el fluido (normalmente agua) y que suele ser de color negro.
3. Aislamiento térmico, para evitar las pérdidas de calor.
4. Carcasa externa, para su protección.

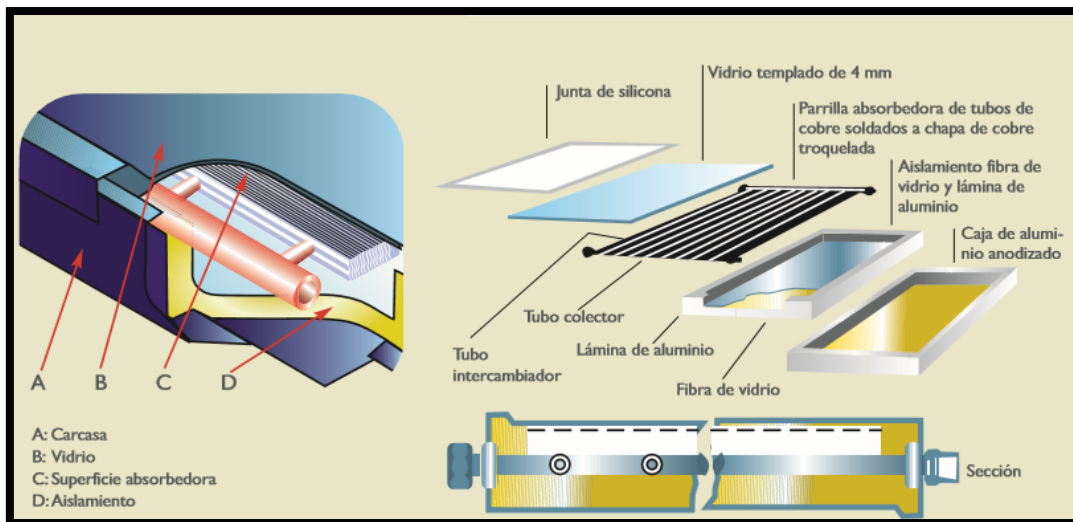
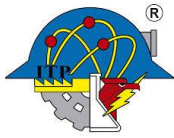


Figura 8. Elementos de un captador solar térmico [40].



El colector solar basa su funcionamiento en el efecto invernadero: la radiación solar –rayos solares– (onda corta) incide en el vidrio y lo atraviesa y es absorbida por una superficie que se calienta. Esta superficie emite, a su vez, calor –radiación térmica– (onda larga); no obstante, este tipo de onda no puede atravesar el vidrio, por lo que se queda atrapada dentro del colector (Figura 9).

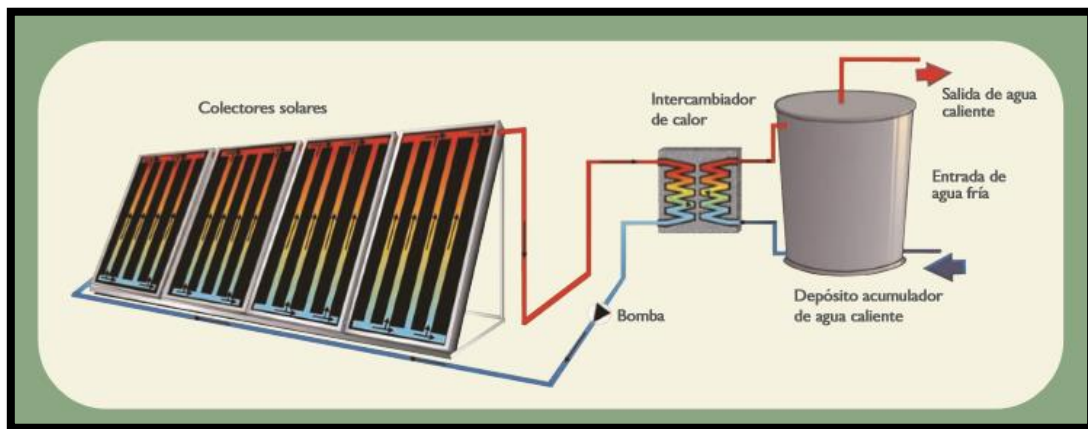
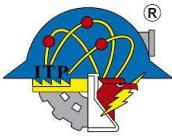


Figura 9. Sistema de captación de energía solar térmica.

La energía solar térmica se utiliza principalmente para calentar fluidos, normalmente agua. Dependiendo de la temperatura final alcanzada por el fluido a la salida, las instalaciones se dividen en:

1. Baja temperatura: Son las más extendidas y se destinan a aquellas aplicaciones que no exigen temperaturas del agua superiores a los 90 °C, como, por ejemplo, la producción de agua caliente sanitaria para viviendas y polideportivos, apoyo a la calefacción de viviendas, calentamiento de agua para piscinas, etc.
2. Media temperatura: Destinada a aquellas aplicaciones que exigen temperaturas del agua comprendidas entre 80 °C y 250 °C, como, por ejemplo, el calentamiento de fluidos para procesos industriales y la desalinización de agua de mar.
3. Alta temperatura Destinada a aquellas aplicaciones que requieran temperaturas del agua superiores a los 250 °C, como es el caso de la generación de vapor para la producción de electricidad.



3.6 Balance térmico en el invernadero

Del conjunto de variables climáticas que pueden regularse en un invernadero es quizás la temperatura la que reviste mayor importancia, aunque claro está, sin descuidar las restantes, es decir, humedad, luz, CO₂, etcétera, principalmente en regiones con determinado régimen climático.

El hecho planteado desde los últimos años y cada vez con mayor intensidad de la crisis mundial de la energía, hace que los estudios encaminados a reducir el consumo energético se prodiguen más incesantemente. En el terreno de los cultivos protegidos, este afán de reducción energética se hizo muy palpable en la literatura especializada del tema desde mediados de los setenta.

El estudio del balance térmico de un invernadero abarca una amplia gama de posibilidades y complejidades en función del rigor con que se quiera estudiar.

Las ecuaciones 6 a 10 representan el balance de energía en el invernadero [9]. La Figura 10 expresa el balance térmico dentro del invernadero.

$$Q_{net} + Q_{nec} = Q_{cc} + Q_{ren} \quad (6)$$

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

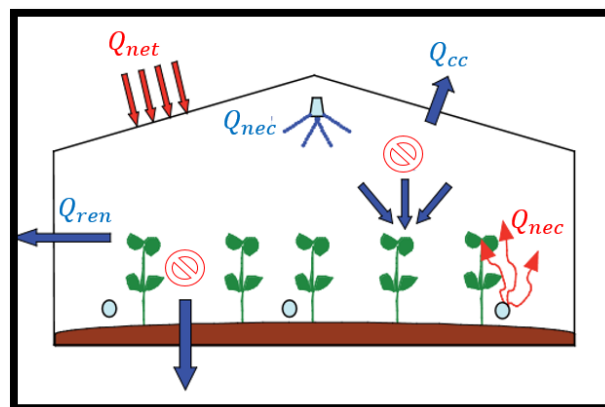
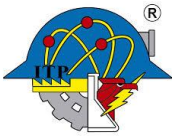


Figura 10. Balance energético en un invernadero [41].



El flujo de calor neto por radiación para un invernadero puede ser escrito de acuerdo con la ecuación número 7.

$$Q_{net} = \tau_c(1 - r_s) \cdot Q_{rad} \quad (7)$$

La pérdida de calor debido a la renovación del aire interior del invernadero (ventilación e infiltración) se determinó mediante la ecuación 8.

$$Q_{ren} = q_v \cdot c_p \cdot \rho(T_{int} - T_{ext}) \quad (8)$$

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 9.

$$Q_{cc} = h \cdot w(T_{int} - T_{ext}) \quad (9)$$

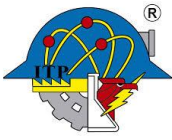
En la ecuación 9, w representa la relación de las superficies de la cubierta y del piso, por lo que su valor es adimensional.

El flujo de calor que debe ser proporcionado por el sistema de calefacción (aire o agua caliente) se definió por medio de la ecuación 10.

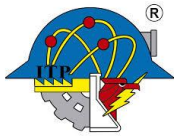
$$Q_{nec} = Q_{cc} + Q_{ren} - Q_{net} \quad (10)$$

3.7 Simulador *EnergyPlus*®

EnergyPlus® es un programa completo de simulación de energía de edificios que los ingenieros, arquitectos e investigadores utilizan para modelar tanto el consumo de energía para calefacción, refrigeración, ventilación, iluminación y enchufes y procesos, como el uso de agua en los edificios. Algunas de las características y capacidades notables de *EnergyPlus*® incluyen solución integrada y simultánea de las condiciones de la zona térmica, solución basada en el equilibrio térmico de los efectos radiantes y convectivos que producen temperaturas de la superficie, confort térmico y cálculos de condensación, pasos de tiempo por hora, definidos por el usuario para la interacción entre las zonas térmicas y el medio ambiente, modelo combinado



de transferencia de calor y masa que explica el movimiento del aire entre zonas, modelos avanzados de ventanilla que incluyen persianas controlables de ventana, acristalamientos electrocrómicos y balances de calor capa por capa que calculan la energía solar absorbida por los cristales de las ventanas y cálculos de iluminancia y deslumbramiento para informar el confort visual y los controles de iluminación de conducción.



4. Métodos y materiales

El tipo de investigación desarrollada en el presente proyecto es de carácter experimental debido a que el objetivo se centra en controlar el fenómeno a estudiar empleando el razonamiento hipotético-deductivo, así como en realizar diseño experimental y estrategias de control. El diagrama de flujo presentado en la Figura 11 muestra la metodología del presente proyecto. De igual manera, en la Figura 12 resume las variables de entrada y salida del proceso mediante un mapa de control.

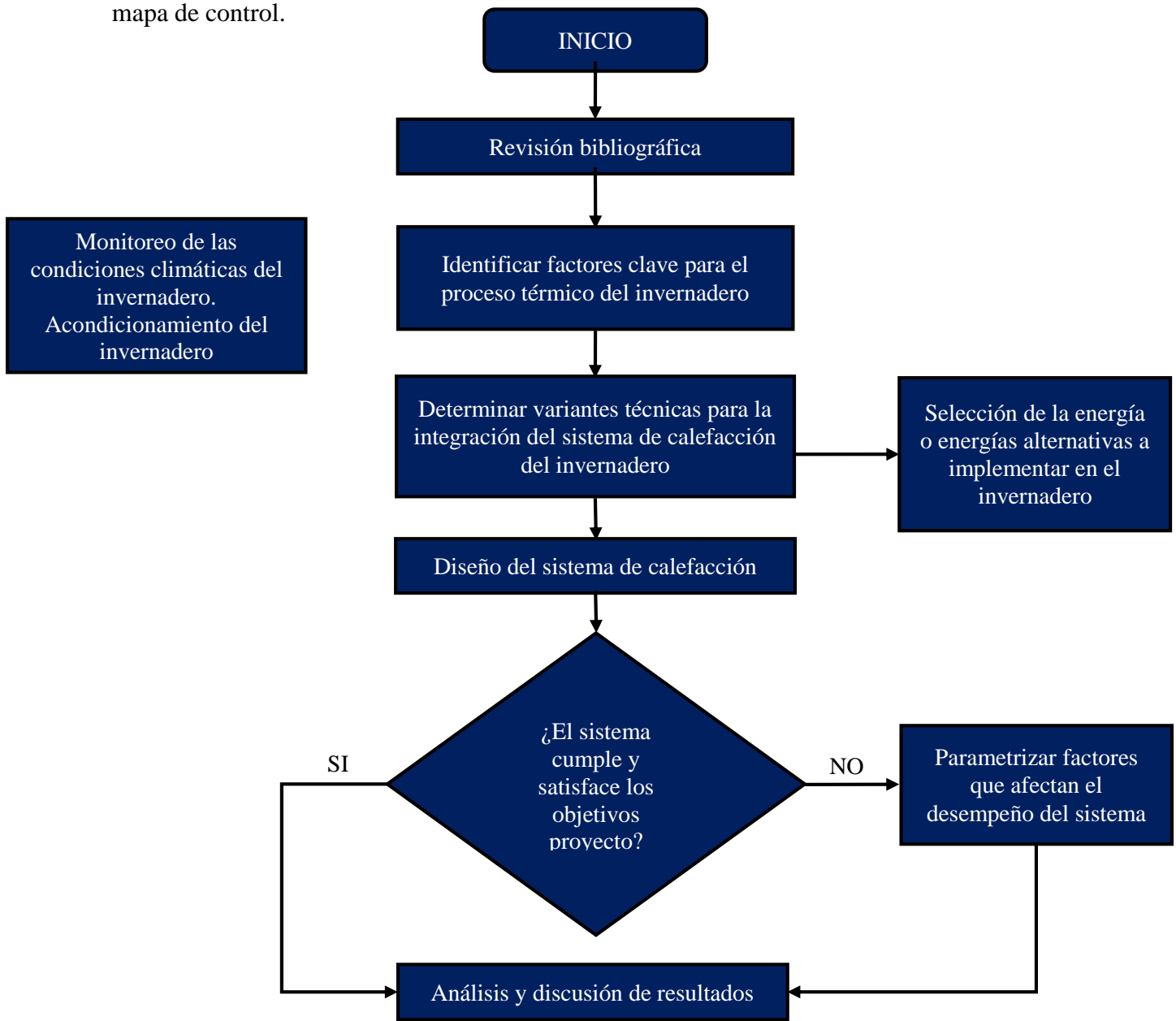


Figura 11. Diagrama de flujo de la metodología

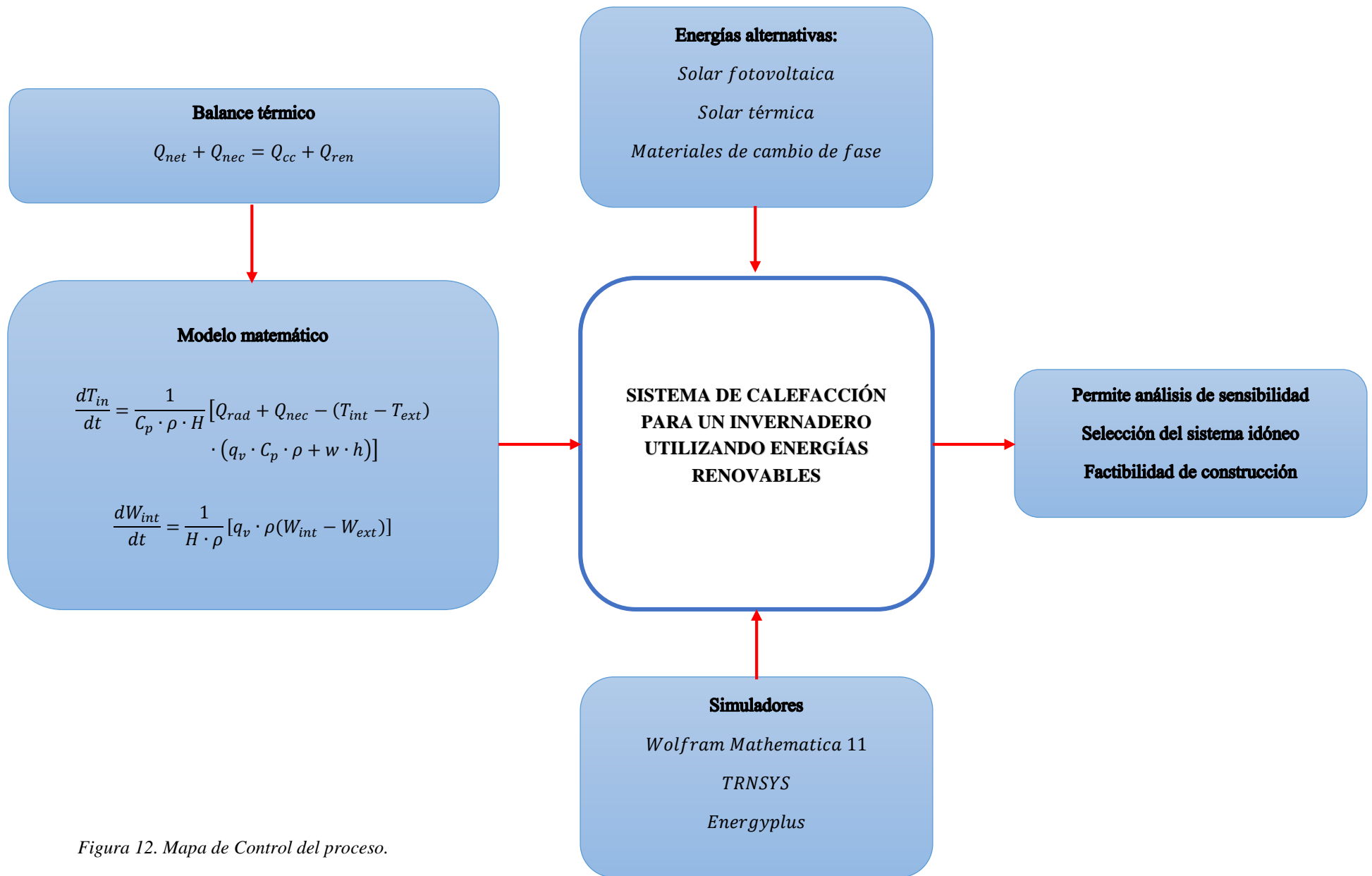


Figura 12. Mapa de Control del proceso.

4.1 Revisión de la bibliografía

Se inició la consulta de información de interés en fuentes bibliográficas especializadas: libros, artículos científicos y tecnológicos indizados y tesis relacionadas con el presente proyecto, con la finalidad de conocer el estado del arte del prototipo, conformar el marco teórico y desarrollar la metodología del presente trabajo. Cabe mencionar que la revisión bibliográfica se realizó durante toda la ejecución del proyecto. La Tabla 1 muestra los recursos utilizados para la actividad.

Tabla 1. Recursos para la revisión bibliográfica.

CONCEPTO	DESCRIPCIÓN	FECHA	OBSERVACIONES
<i>Materiales</i>	Libros especializados, artículos indizados, tesis.	Septiembre 2017 a mayo 2018.	Material proporcionado por el Instituto Tecnológico de Pachuca, base de datos CONRCYT, libros y manuales disponibles en la red.

4.2 Factores clave para el proceso térmico

Para llevar a cabo el balance térmico dentro del invernadero, fueron considerados los siguientes factores clave, previos al cálculo de los requerimientos energéticos.

4.2.1 Lugar de desarrollo del proyecto

En el Instituto Tecnológico de Pachuca se cuenta con las instalaciones propias de un invernadero, mostrado en la Figura 13. Actualmente se encuentra en vías de desarrollo un proyecto multidisciplinario para iniciar la producción de jitomate, lechuga y lombricomposta, que serán comercializados dentro de la comunidad estudiantil. Así mismo, se planea lograr la reproducción del invernadero en otras comunidades. Con la realización del presente trabajo, se integró el área de Posgrado en la actividad previamente señalada.

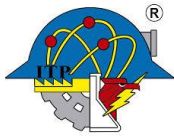


Figura 13. Invernadero del Instituto Tecnológico de Pachuca

4.2.2 Caracterización del invernadero

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 [43] y mostrados en la Figura 14. Los datos de la geometría del invernadero fueron utilizados para llevar a cabo la simulación.

Tabla 2. Dimensiones del invernadero

<i>PROPIEDAD</i>	<i>MARCO</i>	<i>ARCO TECHO</i>
<i>Largo (m)</i>	6	6
<i>Ancho (m)</i>	5.4	Arco: 4.24
<i>Altura (m)</i>	3	0.8
<i>Área (m²)</i>	32.4	25.44
<i>Volúmen (m³)</i>	97.2	20.35

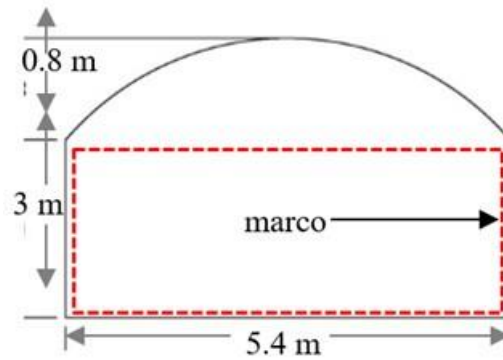
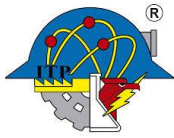


Figura 14. Dimensiones del invernadero

4.2.3 Adaptación del invernadero

Como primer paso, se realizó limpieza general dentro del invernadero y fue revisado para detectar sus condiciones físicas e implementar el mantenimiento correctivo pertinente, debido a que el invernadero fue construido desde el año 2016. En la Tabla 3 se presentan los recursos utilizados para la actividad.

Tabla 3. Recursos para la adaptación del invernadero.

CONCEPTO	DESCRIPCIÓN	FECHA	OBSERVACIONES
<i>Materiales</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Palas • Bolsas para basura • Parches plásticos 	Diciembre 2017	Material proporcionado por el Instituto Tecnológico de Pachuca
<i>Recursos humano</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Personal de Intendencia 		Personal del Instituto Tecnológico de Pachuca

El área del invernadero fue delimitada y protegida para evitar el paso de personal ajeno al proyecto, así como de fauna nociva para el cultivo, debido a la detección de la presencia de tuzas y ardillas. En la Figura 15 se muestra la fotografía del interior del invernadero.

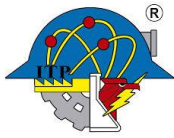


Figura 15. Invernadero del Instituto Tecnológico de Pachuca (parte interior)

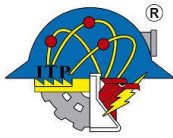
4.2.4 Visitas a invernaderos de la región

Se realizaron diversas visitas a invernaderos que se encuentran en operación cerca de la ciudad de Pachuca en el estado de Hidalgo, con la finalidad de visualizar las instalaciones, visualizar los procesos de producción y principalmente, conocer las tecnologías empleadas para el control climatológico de cada invernadero.

Las visitas fueron realizadas en coordinación con personal experto en el área de Biotecnología como apoyo durante la revisión de campo. En la Tabla 4 se presentan los recursos necesarios para la actividad.

Tabla 4. Recursos para las visitas a invernaderos.

CONCEPTO	DESCRIPCIÓN	FECHA	OBSERVACIONES
<i>Materiales</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Vehículo de traslado 	Febrero 2018:	Proporcionado por el
		Atotonilco el Grande; abril	Instituto Tecnológico de Pachuca
<i>Recursos humano</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Dra. Rosario Melina Barrón Yáñez 	2018: Actopan; junio 2018: Zempoala.	Directora de Sector Agropecuario de Mineral de la Reforma, Doctora en Biotecnología. Asesora en las visitas.



4.2.5 Monitoreo de condiciones climáticas

Se llevó a cabo la lectura diaria de temperaturas y humedades mínimas, máximas y promedios dentro del invernadero. con el instrumento *Indoor Outdoor Thermometer and Hygrometer TA-318*, el cual fue colocado estratégicamente dentro del invernadero para obtener mediciones representativas. Los datos obtenidos fueron registrados en una bitácora durante los meses de enero a diciembre de 2018. Es importante especificar que los horarios de medición y número de mediciones diarias fueron modificados de acuerdo con las necesidades que se presentaron durante el desarrollo del proyecto. Los materiales requeridos para la actividad se detallan en la Tabla 5.

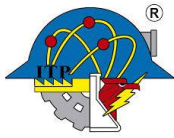
Tabla 5. Recursos para el monitoreo de humedad y temperatura.

CONCEPTO	DESCRIPCIÓN	FECHA	OBSERVACIONES
<i>Materiales</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Termómetro e higrómetro para interiores y exteriores modelo TA – 318 	Enero 2018 a diciembre 2018.	El costo del instrumento fue solventado con recursos propios.
<i>Recursos humano</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Residentes de la carrera Ingeniería en Sistemas Computacionales del ITP 		Alumnos participantes en el proyecto multidisciplinario.

4.2.6 Condiciones climatológicas de la región

De manera complementaria al monitoreo de las temperaturas y humedades dentro del invernadero, se recurrió a una base de datos climatológicos de la región. 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 semi-húmedo, con temperatura promedio anual de 16 °C, temperatura mínima promedio de 4 °C y temperatura máxima promedio de 27 °C.

En la Tabla 6 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).

Tabla 6. Datos climáticos 2017 Pachuca, Hidalgo (SEMARNAT, 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

4.2.7 Balance energético

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 de primer orden, mostradas en las ecuaciones 11 y 12 [44].

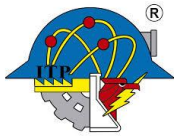
$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{1}{C_p \cdot \rho \cdot H} [Q_{rad} + Q_{nec} - (T_{int} - T_{ext}) \cdot (q_v \cdot C_p \cdot \rho + w \cdot h)] \quad (11)$$

$$\frac{dW_{int}}{dt} = \frac{1}{H \cdot \rho} [q_v \cdot \rho (W_{int} - W_{ext})] \quad (12)$$

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 como $t_{int} = t_{ext}$ y $W_{int} = W_{ext}$.

Las humedades absoluta interna y externa fueron calculadas mediante la ecuación 13,

$$W_{int} \cdot q_v \cdot \rho = W_{ext} \cdot q_v \cdot \rho + E \quad (13)$$

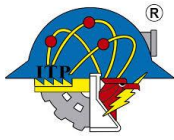


$E = 0$ para invernaderos que aún no tienen cultivo en su interior [45].

4.3 Determinación de las variantes técnicas para la integración del sistema

Se realizó un análisis sobre los beneficios que ofrece la utilización de la energía solar térmica y la energía solar fotovoltaica para el control de temperatura dentro del invernadero. Se elaboró un cuadro comparativo con las ventajas y desventajas que presentan cada tipo de energía considerando los siguientes aspectos:

- Cumplimiento de las necesidades de acondicionamiento bioclimático: Se realizó el análisis pertinente en bibliografía especializada y artículos publicados con respecto a la utilización de la energía solar térmica y solar fotovoltaica para generar la corriente de vapor de agua o aire caliente necesarios para lograr el medio ambiente adecuado para el cultivo. Fueron estudiados y seleccionados los modelos y cálculos pertinentes para el diseño de cada sistema de generación de energía (solar FV y térmica), considerando las adecuaciones necesarias para ser implementado en el invernadero y generar las condiciones bioclimáticas requeridas.
- Costos de fabricación asequibles: Se realizó una cotización detallada de los materiales requeridos para la construcción del sistema de control de temperatura del invernadero, investigando en el mercado los materiales que cumplieron con los requisitos estándar de calidad haciendo comparativa de costos entre distintos proveedores.
- Accesibilidad en la adquisición de materiales de construcción del prototipo: Se buscó que los materiales de fabricación del prototipo estuvieran disponibles con respecto al tiempo de entrega y lo más cerca posible de la ciudad para evitar incremento de costos por envío.
- Herramientas para la fabricación disponibles en la Institución: Se utilizaron las herramientas disponibles dentro de la Institución para la instalación del sistema seleccionado para control de temperatura.



4.3.1 Selección del tipo de energía alternativa a implementar en el invernadero

Una vez realizada la comparación de ventajas y desventajas para cada tipo de energía solar, se llevó a cabo un análisis de la información obtenida para que, finalmente, fuera seleccionada la alternativa más apropiada para cubrir las necesidades energéticas del invernadero. No se descartó la posibilidad de seleccionar ambos sistemas de generación de energía a partir de energía solar y diseñar un sistema en donde se ensamblaran tanto el colector solar como las celdas fotovoltaicas. Se descarta la posibilidad de un sistema híbrido utilizando un tipo de energía alternativa y combustibles fósiles debido a la importancia de demostrar que las necesidades energéticas pueden ser cubiertas utilizando exclusivamente energías limpias.

4.4 Diseño del sistema de calefacción del invernadero

Con el uso del simulador *EnergyPlus*®, se diseñó el sistema de calefacción del invernadero de acuerdo con el siguiente procedimiento.

1. Diseño de la edificación: En *Google SketchUp* (Figura 16) se diseñaron diferentes invernaderos utilizando como variable el material de construcción y se observó el comportamiento de la temperatura para cada caso.
 - A. Cubierta de plástico
 - B. Paredes de concreto
 - C. Paredes de concreto y ventanas.
 - D. Paredes de concreto y un material de cambio de fase (PCM)
 - E. Paredes de concreto, ventanas y PCM
 - F. Cubierta plástica y PCM

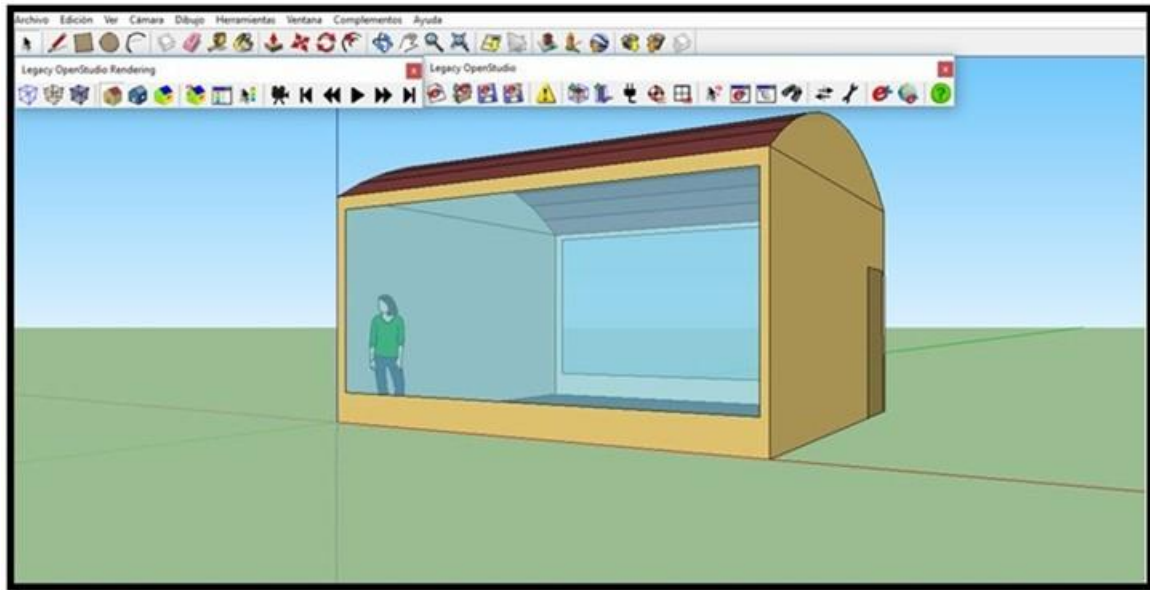
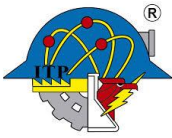
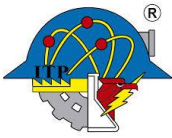


Figura 16. Diseño del invernadero en Google SketchUp

2. Determinación de las curvas de temperaturas diarias, mensuales y anuales dentro del invernadero mediante *EP-Lounge* de *EnergyPlus*®.
3. Selección y diseño del equipo de climatización en *EnergyPlus*®.
4. Cálculo del sistema solar fotovoltaico en el software *Calculation Solar*® a partir de los datos obtenidos en el diseño del sistema de climatización de *EnergyPlus*®.
5. Estimación de costos del sistema de climatización para el invernadero.



5. Resultados

5.1 Monitoreo de variables establecidas.

De acuerdo con las mediciones de temperatura, humedad relativa y radiación global diaria reportadas por SEMARNAT 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.

5.2 Modelo de temperatura dentro del invernadero.

El comportamiento de la temperatura dentro del invernadero se determinó a partir del modelo matemático presentado en las ecuaciones 11 y 12 y fue resuelto en el software *Wolfram Mathematica 11*®, obteniendo las gráficas mostradas en las figuras 17 a la 24.

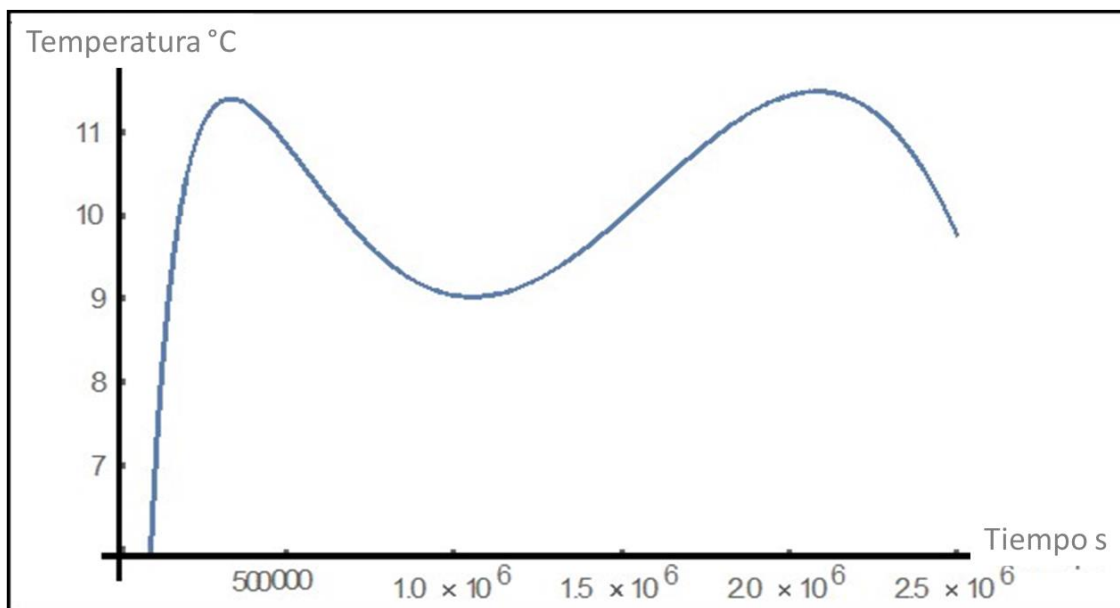


Figura 17. Gráfico de temperatura al interior del invernadero en el mes de diciembre.

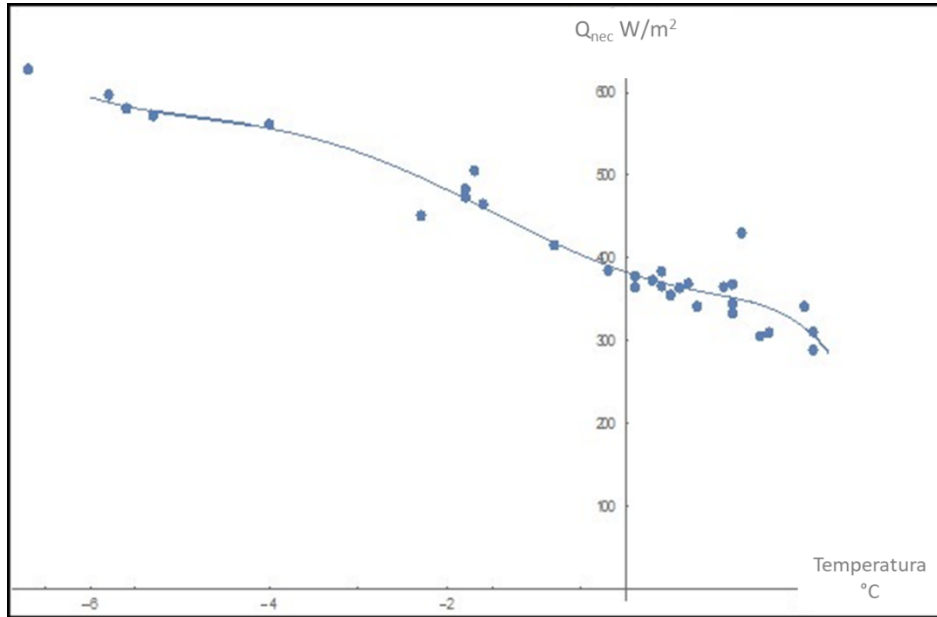
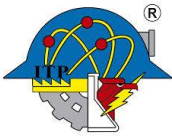


Figura 18. Gráfico de flujo de calor en el mes de diciembre.

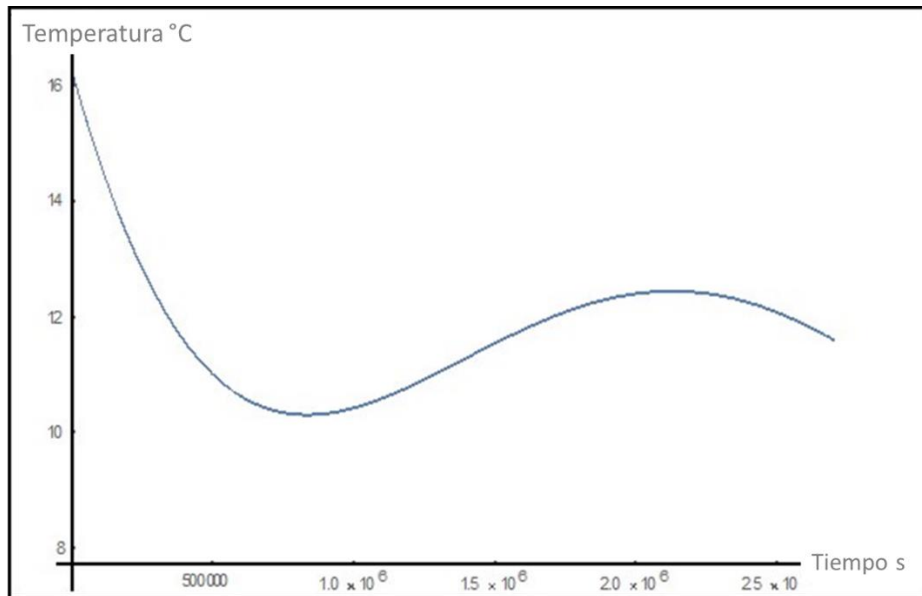


Figura 19. Gráfico de temperatura al interior del invernadero en el mes de enero.

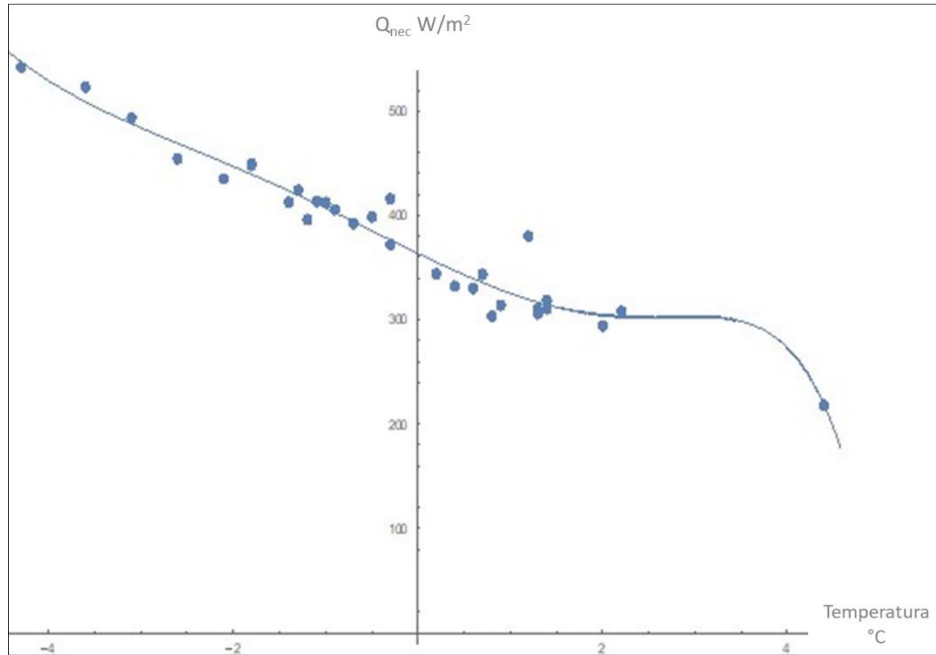
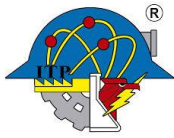


Figura 20. Gráfico de flujo de calor en el mes de enero.

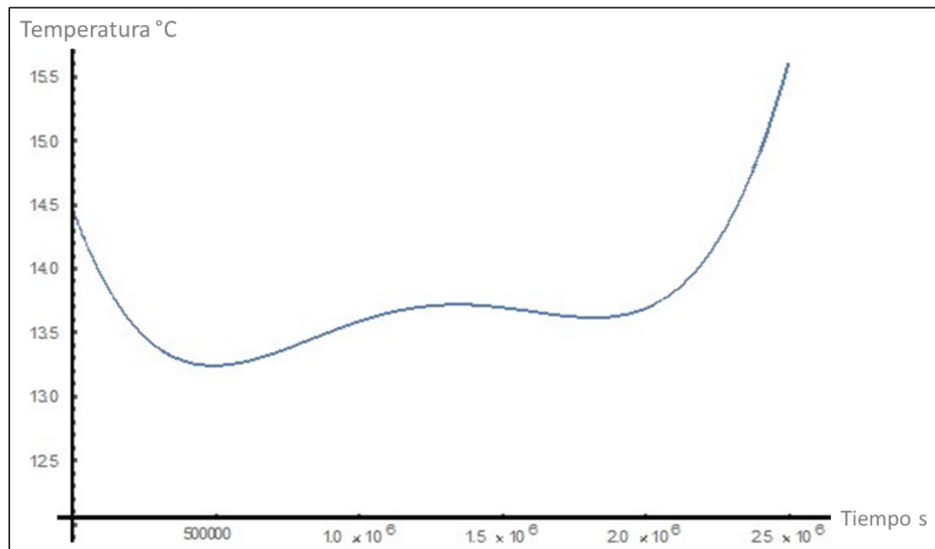


Figura 21. Gráfico de temperatura al interior del invernadero en el mes de febrero.

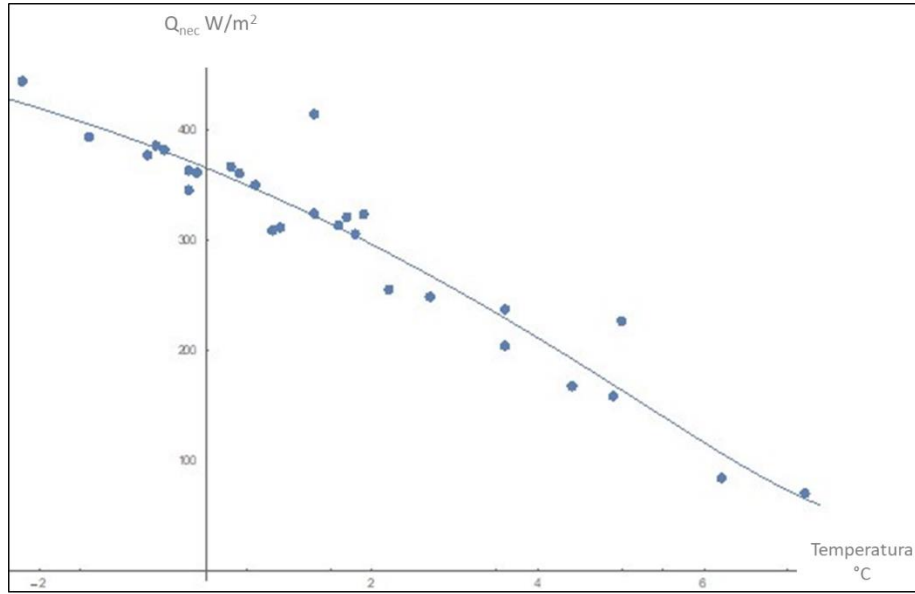
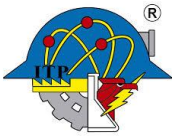
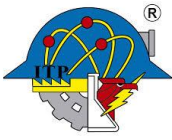


Figura 22. Gráfico de flujo de calor en el mes de febrero

Las Figuras 17, 19 y 21 corresponden al comportamiento de la temperatura dentro del invernadero en enero, febrero y diciembre, meses en los que se registran las temperaturas más bajas durante el año en la ciudad de Pachuca, Hidalgo. En las gráficas se observa que los registros más altos de temperatura ocurren, en promedio, a menos de 15 °C, lo que representa amenaza para cierto los cultivos, debido a la generación de hongos y bacterias que se desarrollan en condiciones de bajas temperaturas, o bien, puede ocurrir afectación en el desarrollo de las plantas por la ausencia de condiciones óptimas para su crecimiento. De esta manera, se vuelve indispensable el suministro de energía calorífica para mantener la temperatura correcta dentro del invernadero. Las Figuras 18, 20 y 22 muestran el flujo de calor en W/m² que requiere adicionarse al sistema para mantener las temperaturas ideales de crecimiento de los cultivos. Puede observarse que el flujo de calor es inversamente proporcional a la temperatura exterior; es decir, mientras más baja sea la temperatura ambiental, mayor será el requerimiento energético.

Fitz-Rodriguez et al [9] 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. La solución de la ecuación diferencial para el comportamiento de la temperatura dentro del invernadero se puede observar en la Figura 23. En la curva se observa la variación de temperaturas a lo largo del mes, anticipando datos superiores a los 40 °C para los días más calurosos, lo que representa amenaza para los cultivos debido a que las temperaturas óptimas de desarrollo se encuentran por debajo de los 30 °C. En la gráfica de la Figura 24 se aprecia el calor que necesitará ser extraído del invernadero en días con elevadas temperaturas para mantener las condiciones adecuadas para el cultivo.

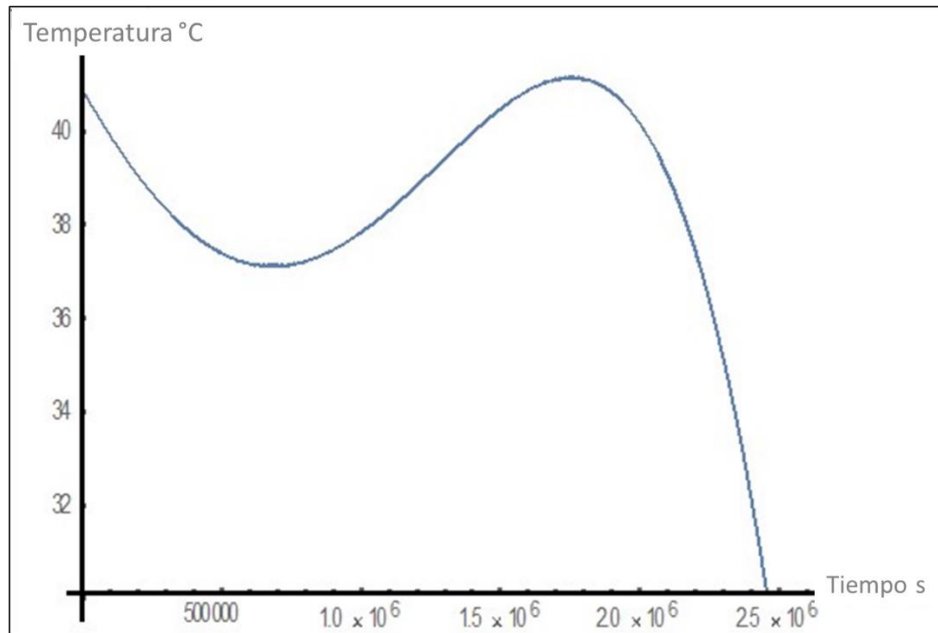


Figura 23. Gráfico de temperatura al interior del invernadero en el mes de mayo.

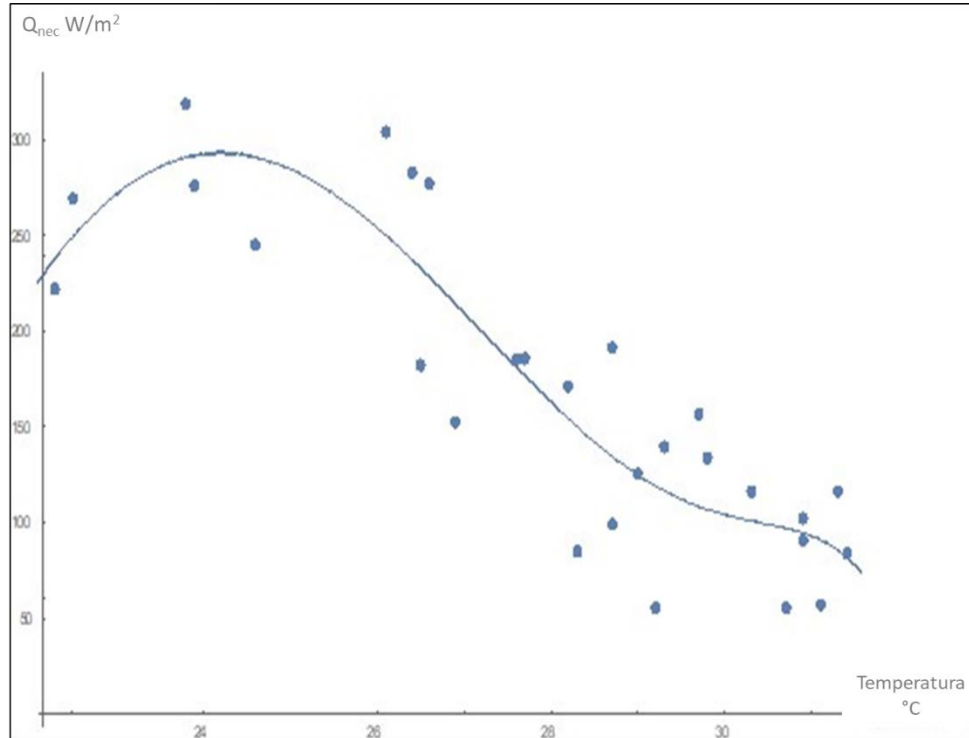
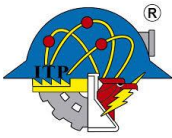
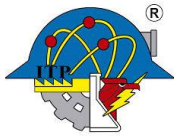


Figura 24. Gráfico de flujo de calor en el mes de mayo.

Joudi et al [14] 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 tanto para días de temperaturas elevadas como bajas.

5.3 Diseño del invernadero en *EnergyPlus*®

El software *EnergyPlus*® fue utilizado para simular el comportamiento de la temperatura dentro del invernadero al colocar un PCM y un sistema de climatización. Primeramente, los resultados mostrados en las gráficas indican el efecto del PCM sobre las paredes del invernadero y, posteriormente, se presentan las gráficas de la temperatura interior utilizando PCM y el sistema de climatización.



5.3.1 Invernadero con PCM RT25

Al colocar el PCM seleccionado, RT25, en la parte exterior de la cubierta plástica del invernadero, se observó un incremento en la temperatura mínima con respecto a la registrada en la simulación sin PCM. Por otra parte, para la temperatura máxima, se observó una disminución con respecto a la registrada en la simulación sin PCM.

En los meses de enero y diciembre, principalmente, se encuentran los días con las temperaturas más bajas del año. En la Figura 25 se muestra el comportamiento de la temperatura durante el mes de enero, y se observa que la temperatura promedio (línea amarilla) se ubica alrededor de los 21 °C, lo que representa el efecto del PCM. Por otro lado, se observa poca incidencia en temperaturas por debajo de la mínima recomendable para cultivos sanos (15 °C), zona enmarcada por el recuadro negro. La línea verde representa la temperatura ideal de crecimiento de cultivos, lo que permite identificar los puntos y las distancias de los valores que se encuentran fuera de la temperatura óptima, lo que indica la necesidad de adicionar un sistema de control climático.

En la figura 26 puede apreciarse el comportamiento de la temperatura en un día del mes de enero. Se localizan alrededor de ocho horas con temperaturas que se registran por debajo de los 15 °C, zona enmarcada por el recuadro negro, lo que representa posibles afectaciones a los cultivos.

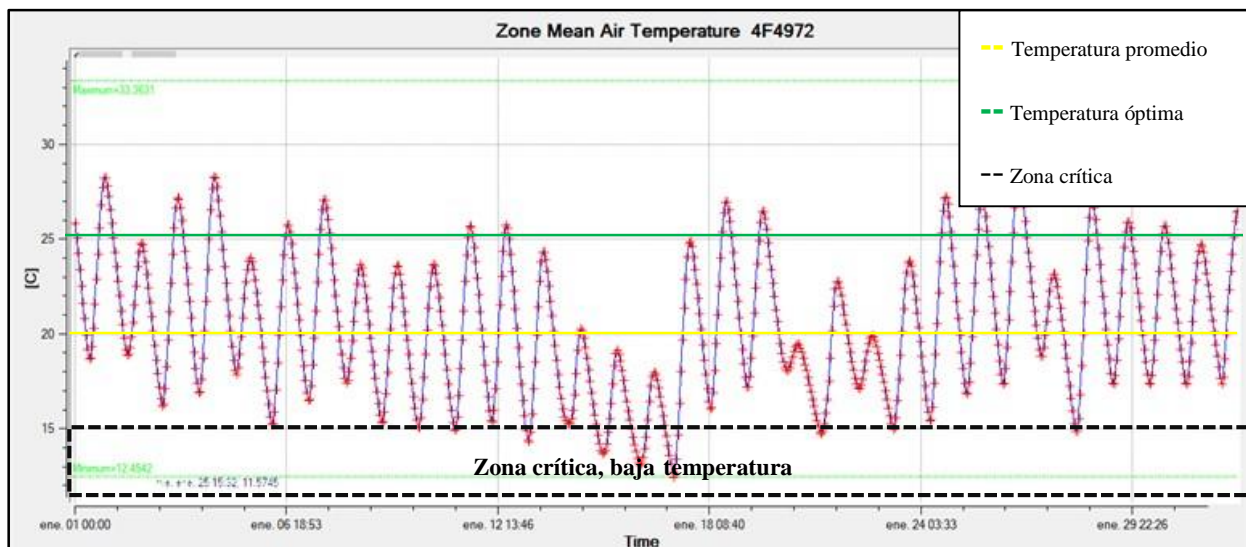


Figura 25. Temperatura interna en enero con PCM RT25.

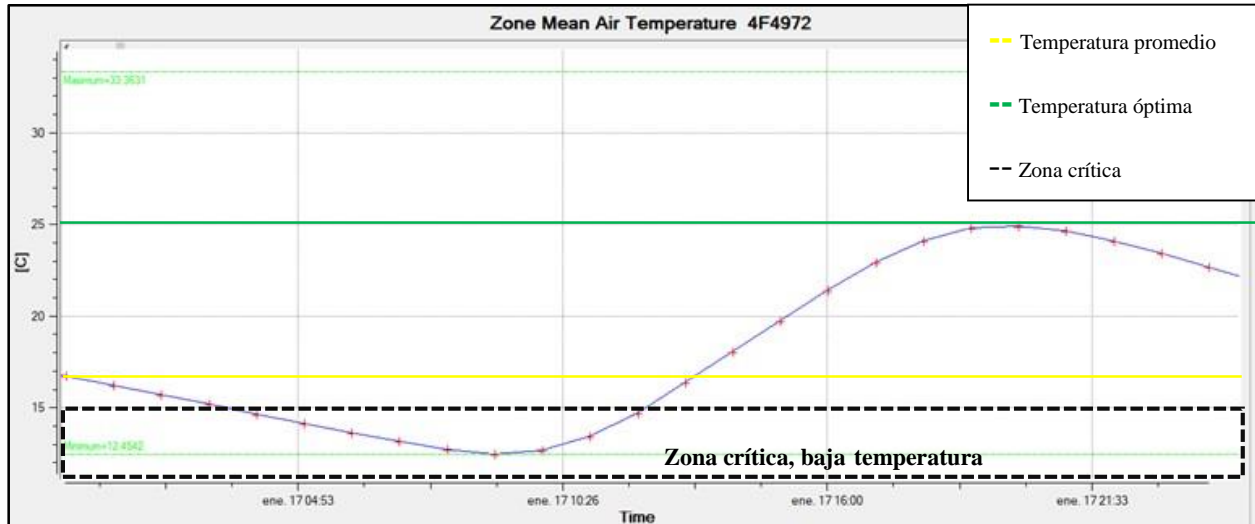
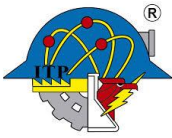
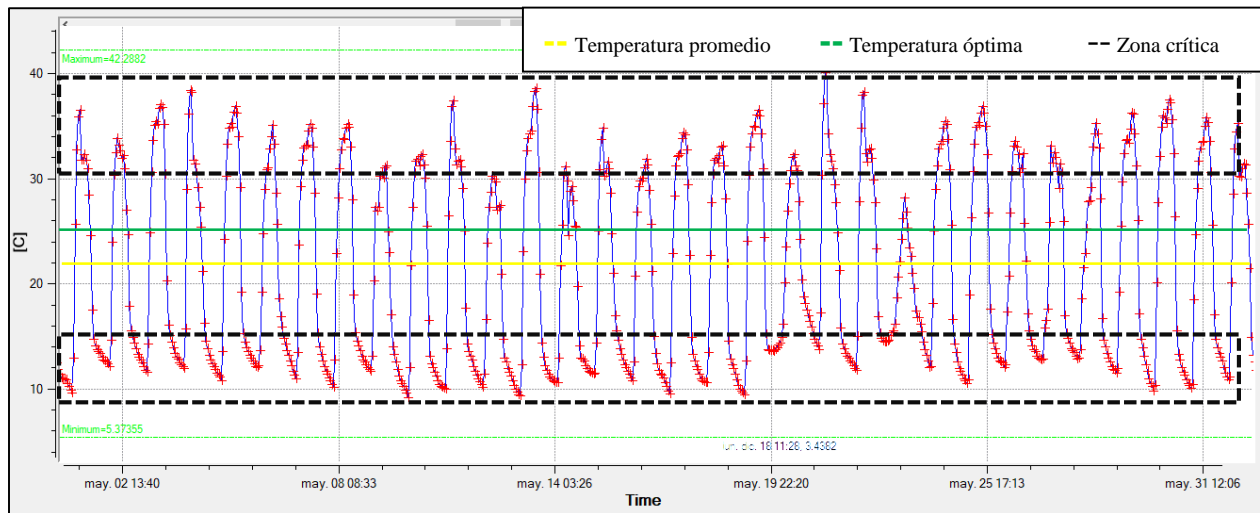


Figura 26. Temperatura interna en un día de enero con PCM RT25.

En la Figura 27 se muestra el comportamiento de la temperatura en mayo, mes donde se registraron las temperaturas más altas durante el año. Se puede observar una cantidad importante de datos ubicados en las zonas críticas, que van de los 9 °C durante las noches y que llegan a los 40 °C durante el día. Para visualizar el comportamiento de la temperatura durante un día de mayo, se presenta la gráfica de la Figura 28, en donde es posible observar que más de diez horas al día se registra una temperatura por encima de los 30 °C y alrededor de once horas corresponden a temperaturas por debajo de los 15 °C.



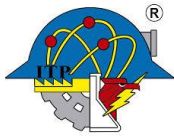


Figura 27. Temperatura interna en mayo con PCM RT25.

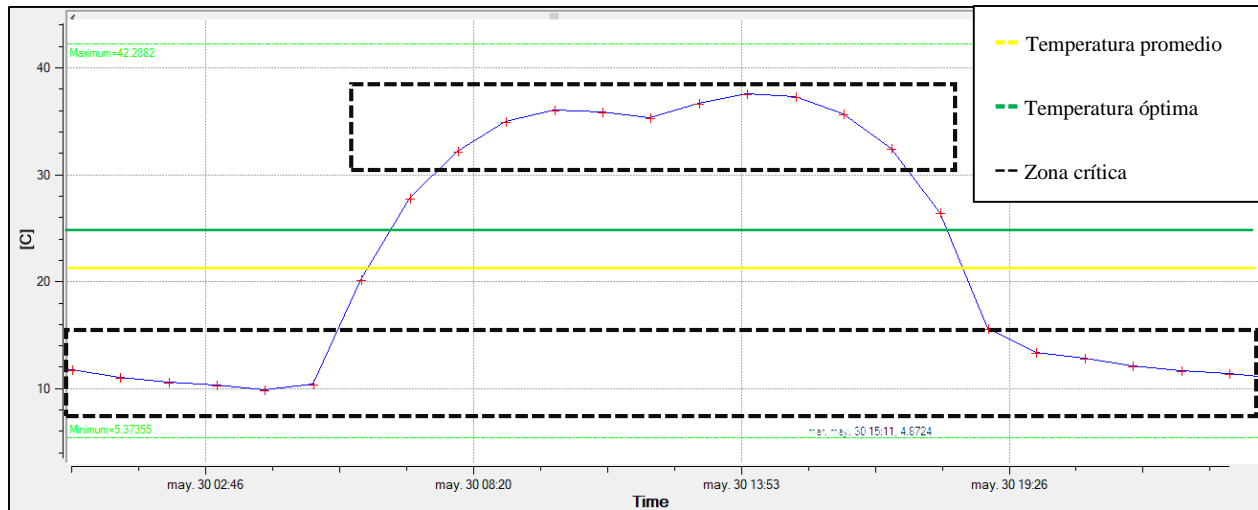


Figura 28. Temperatura interna en un día de mayo con PCM RT25.

Los resultados en las gráficas obtenidas demuestran que la colocación del PCM en las paredes del invernadero disminuye la demanda energética en el interior, sin embargo, es necesaria la implementación de un sistema de climatización para adecuar la temperatura durante las ocho horas que en promedio la temperatura se encuentra por encima o por debajo de los límites de temperatura recomendada para un desarrollo adecuado de cultivo.

5.4 Diseño del sistema de climatización convencional

Se utilizó el software *EnergyPlus*® para diseñar un sistema eléctrico de climatización para el invernadero. El sistema consiste en un calefactor y un ventilador para acondicionar la zona a las temperaturas apropiadas para el cultivo. En la Tabla 7 se especifican las características del sistema determinadas por el simulador. El análisis fue desarrollado equipo de climatización solar. Se observa que el requerimiento energético total diario para adecuar el ambiente es de 6.8 kW/h, aproximadamente, comprendido entre el calentamiento, el enfriamiento y el uso de ventiladores, lo que representa un consumo mensual aproximado de 204 kW/h y de 2,448 kW/h anuales. (La estimación de costos será presentada en el capítulo 5.6).

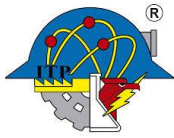


Tabla 7. Sistema de calefacción convencional (datos de EnergyPlus)

Usos finales	Electricidad [kWh]
Calentamiento	3.30
Enfriamiento	2.67
Iluminación interna	0.00
Iluminación externa	0.00
Equipo exterior	0.00
Ventiladores	0.82

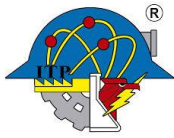
5.5 Selección del tipo de calefacción

La climatización para el invernadero puede realizarse con aire forzado o mediante agua caliente o vapor de agua circulado a través de una red de tuberías. Después de una revisión bibliográfica, se realizó una tabla comparativa (Tabla 8) con las principales características, ventajas y desventajas de ambos tipos de climatización, y posteriormente se seleccionó la más apropiada.

Tabla 8. Características de los tipos de calefacción.

Aire forzado	Circulación de agua caliente o vapor de agua
<ul style="list-style-type: none"> • Utiliza resistencias de potencia para calentar. • Distribuye masas de aire caliente dentro del invernadero. • Mantenimiento sencillo y económico. • Instalación y desinstalación sencilla. • Equipos de menor costo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tuberías de diámetro pequeño colocadas en forma de red en la superficie del invernadero. • La distribución de las tuberías va en relación con la distribución del cultivo. • El costo de inversión y mantenimiento es mayor, así como el tiempo para su realización. • La instalación es más compleja. • El costo se incrementa por requerir bombas para la distribución de agua, intercambiadores de calor y el material adecuado para la red de tuberías.

Con base en el análisis realizado y la síntesis de las principales características de los tipos de sistemas de climatización presentados en la Tabla 7, se seleccionó el sistema de calefacción por



aire forzado. El sistema se compone de calefactor eléctrico y un ventilador, seleccionados del mercado en línea de acuerdo con las características obtenidas en el simulador *EnergyPlus*®.

Las Figuras 30 y 31 se muestran los equipos seleccionados para el sistema de climatización, mientras que en la Tabla 9 se especifican los datos técnicos de cada equipo.



Figura 29. Ventilador para el sistema de climatización marca Ziehl-Abegg.



Figura 30. Calefactor eléctrico para el sistema de climatización marca Calelec.

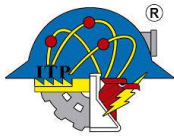


Tabla 9. Datos técnicos del ventilador y calefactor para el invernadero.

Dato técnico	Ventilador	Calefactor eléctrico
Marca	Ziehl-Abegg.	Calelec Heating
Modelo	ZN045-6DL.2C.V7P3	CM12-02-11VAXD5
Voltaje	230 V	120 V
Consumo de corriente	139 W	2,000 W

5.6 Diseño del sistema fotovoltaico

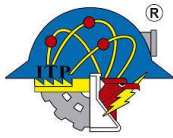
De acuerdo con los resultados obtenidos en el simulador *EnergyPlus*® sobre el requerimiento energético para la climatización del invernadero, se llevó a cabo el diseño del sistema solar fotovoltaico en el software *Calculation Solar*®, considerando un consumo diario de 6,800 W/h.

Una vez realizada la simulación, los resultados indican un total de 10 paneles fotovoltaicos de 230 W cada uno conectados en paralelo. Las especificaciones sobre los modelos, características y número de elementos para cada equipo se describen en la Figura 32.

En la Tabla 10 se presenta un resumen con los equipos necesarios para la instalación del sistema fotovoltaico.

Tabla 10. Resumen de los elementos resultantes del cálculo.

Unidades	Elementos
4	Módulo tipo –LUXOR Eco line 60/230 W Policristalino
1	Regulador tipo –STECA TAROM 245 PW/M
12	Batería tipo –ECOSAFE TYS -7 TUBULAR-PLATE
1	Inversor tipo –VICTRON MULTIPLUS C24/3000/700-16



DATOS TECNICOS

TENSIÓN DEL SISTEMA	24 V	ENERGIA TEORICA DIARIA	4120 WH/DIA
PERFORMANCE RATIO	82.88 %	ENERGIA REAL DIARIA	4971.04 WH/DIA

CAMPO FOTOVOLTAICO

Inclinación óptima anual por consumos: 23.31 °
 Potencia fotovoltaica necesaria: 1047 Wp

CARACTERÍSTICAS MODULO PV [Cambiar](#)

88 % LUXOR Eco line 60/230 W Policristalino

Pmax: 230 Wp | Vmp: 29.8 V | Voc: 37 V
 Potencia Fotovoltaica Calculada: 920 Wp
 N° total de módulos: 4
 N° Uds serie: 1 | N° Uds paralelo: 4

REGULADOR DE CARGA

Intensidad total sistema (abierto): 41.00 A
 Intensidad total sistema (cerrado): 38.91 A

CARACTERÍSTICAS REGULADOR [Cambiar](#)

110 % STECA TAROM 245 PWM

A.max: 45 A | Voc: 48 V | Eficiencia: 89.60 %
 A. Total: 45 A | N° reguladores: 1

BATERIA

Autonomía (días): 3 | Prof. descarga: 60 %
 Capacidad Util: 621 Ah | Capacidad Real: 1036 Ah

CARACTERÍSTICAS BATERIA [Cambiar](#)

104 % ECO SAFE TYS-7 TUBULAR-PLATE

Capacidad C100: 1082 Ah | Tensión/ud: 2 V
 Capacidad total: 1082 Ah | N° total elementos: 12
 N° uds serie: 12 | N° uds paralelo: 1

INVERSOR CARGADOR / INVERSOR

W cal.: 1922 w | W Min: 1538 w
 Carga max.: 65 Ah | Carga min.: 32 Ah

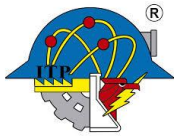
CARACTERÍSTICAS INVERSOR CARGADOR [Cambiar](#)

Coef. simulta. (0-1): 0.7 | Factor seguridad: 80 %

130 % VICTRON MULTIPLUS C 24/3000/70-16

W nominal: 3000 W | W continua: 2500 W
 Capacidad de carga: 70
 Eficiencia: 94 | N° uds: 1

Figura 31. Características del sistema fotovoltaico.



Con los elementos de consumos y los componentes de la instalación calculados, en *Calculation Solar*® se obtuvo la comparativa de consumos y producción estimados a lo largo del año en y se muestra en la Figura 33.

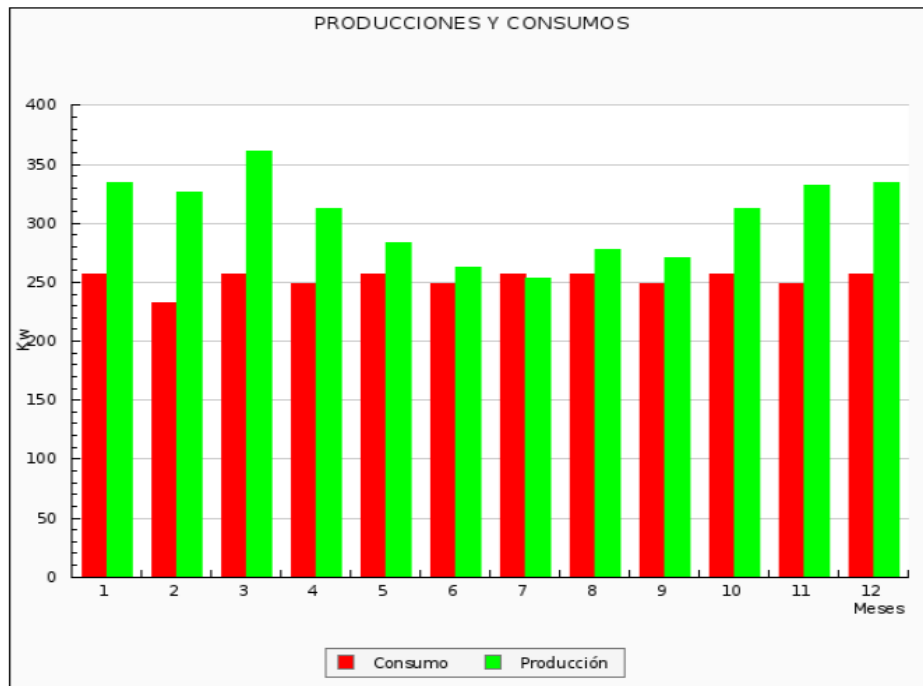


Figura 32. Consumos y producción de energía en kW del sistema solar fotovoltaico.

Los equipos y elementos que cubrirán la demanda energética fueron diseñados y especificados en los simuladores antes mencionados. En el capítulo 5.6 se realiza un análisis de costos de adquisición e instalación del sistema de climatización para verificar la factibilidad de compra.

5.6 Estimación de costos del sistema de climatización

5.6.1 Costo del material de cambio de fase

El material de cambio de fase seleccionado para el sistema de climatización del invernadero es una parafina denominado RT 25, distribuido por *Rubitherm*®. El costo estimado para la adquisición del PCM fue calculado con base en las dimensiones de los dos muros del invernadero en donde será colocado el material. Los costos se muestran en la Tabla 11.

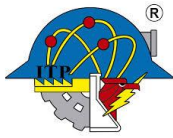


Tabla 11. Costos de PCM RT25

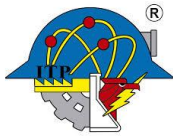
Cantidad (kg)	Concepto	Costo \$USD
264	RT25 Rubitherm	234.96

El costo del PCM está calculado en dólares. El costo total del material de acuerdo con la cantidad de kilogramos requeridos es de MXN\$4,490.50 aproximadamente, según el tipo de cambio.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la simulación realizada en *Calculation Solar*[®], los equipos necesarios para instalar el sistema de climatización del invernadero, se especifican en la Tabla 12, en donde son mostrados los costos unitarios y totales para cada componente. Es preciso mencionar que los equipos cotizados corresponden a los modelos sugeridos por el simulador y se encuentran disponibles en el mercado europeo.

Tabla 12. Costos de equipos para el sistema de climatización. (Conversión a Pesos Mexicanos 18 de marzo de 2019).

Cantidad	Nombre del equipo	Características	Costo Unitario (€)	Costo Total (€)	Costo Total MXN
1	Calefactor Eléctrico Bio Green PHX 2.8 Phoenix	De 1 a 2.8 kW, 230 V	223.64	223.64	\$4832.16
1	Ventilador para invernadero XTAD-16	Monofásico, ½ hp, tubo axial de 16”	306.72	306.72	\$6,600
4	Módulo tipo –LUXOR Eco line	Pánel fotovoltaico 60/230 W policristalino	246.49	985.96	\$21,204
1	Regulador tipo –STECA TAROM 245 PW/M	45 A, 48 V	274.19	274.19	\$5,897
12	Batería ECOSAFE TYS - 7 TUBULAR-PLATE	C100 1082 Ah	174.27	2,091.34	\$45,000
1	Inversor tipo –VICTRON MULTIPLUS	C24/3000W/70-16	728	728	\$15,665
COSTO TOTAL DE INVERSIÓN				€ 4,609.85	\$99,120.59



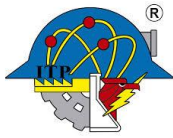
En la Tabla 12 se puede observar que los costos por cada equipo se presentan en euros, debido a que el mercado que ofrece dichos productos es europeo, lo que implica un alto costo de inversión al adquirir los elementos sugeridos por el simulador.

Se realizó una segunda cotización de los equipos para el sistema de climatización eligiendo del mercado productos con las mismas características y especificaciones que indican los resultados de la simulación, pero a costos más accesibles y con mayor factibilidad de adquisición. La Tabla 13 presenta los costos de la segunda propuesta.

Tabla 13. Costos de equipos para el sistema de climatización. (Segunda propuesta).

<i>Cantidad</i>	<i>Nombre del equipo</i>	<i>Características</i>	<i>Costo Unitario (MXN)</i>	<i>Costo Total (MXN)</i>
1	Calefactor Eléctrico Calelec CM12-02-11VAXD5	2 kW, 230 V	\$4,399	\$4,399
1	Ventilador para invernadero Ziehl-Abegg.	139 W, 230 V	\$6,599.00	\$6,599.00
10	Panel solar NDNPS265W	Pánel fotovoltaico 60/265 W policristalino	\$2,515	\$25,150
2	Regulador Decdeal 30a Mppt	Regulador de carga solar, 48 V	\$1,738	\$3,476
12	Batería Renogy RNG-BATT-GEL 12-100	Batería de gel para ciclo profundo (12 V, 100 Ah)	\$2,279	\$27,348
1	Inversor 3000W Solar Energía	24 V/3000/120-50	\$2,492	\$2,492
COSTO TOTAL DE INVERSIÓN			\$69,465	

Como puede observarse en la Tabla 13, el costo total de inversión representa aproximadamente la mitad del costo total calculado con los equipos cotizados en la Unión Europea, por lo que resulta conveniente realizar la adquisición de equipos presentados en la Tabla 13.



Se presenta una tercera propuesta, con una cotización realizada por un proveedor que propone un sistema interconectado a la red de la Compañía Federal de Electricidad, CFE. El sistema consiste de los paneles fotovoltaicos, los reguladores e inversores, y omite el uso de baterías debido a que la energía eléctrica generada durante el día se transfiere a la red de distribución de CFE, y durante la noche se consume de dicha red la energía eléctrica requerida para el funcionamiento del sistema de calefacción del invernadero. Un medidor de kilowatt es colocado para saber la cantidad de energía alimentada y consumida de la red, con la finalidad de verificar mensualmente la diferencia. Si la energía consumida es mayor a la energía alimentada a la red, se deberá pagar la diferencia correspondiente. En caso contrario, la CFE guarda el número de kilowatt que se alimentaron en exceso y podrán ser utilizados por el usuario en cualquier momento del año que sean requeridos.

La Figura 34 presenta la cotización realizada por el proveedor para un Sistema Fotovoltaico Interconectado a la Red de CFE. Como puede apreciarse, los costos resultan menores debido a que, a diferencia de un sistema autónomo, se prescinde del banco de baterías.

INVERSIÓN

A través del siguiente medio ponemos a su disposición la siguiente propuesta:

Descripción	Cantidad	MXN
Panel policristalino ET SOLAR 335w	4	\$ 15,674
Microinversor APS-YC500	2	\$ 11,231
Estructura de Aluminio PLP	1	\$ 7,179
Instalación de sistema, incluye: cableado y conexión, montaje de estructuras, microinversores y paneles. Material eléctrico y mano de obra	1	\$ 5,104
SUBTOTAL		\$ 39,188
		IVA \$ 6,270
TOTAL		\$ 45,458

GARANTIAS:

- 1.- 12 AÑOS en paneles solares a una eficiencia del 90%
- 2.- 10 AÑOS en inversores
- 3.- 10 AÑOS en estructura de aluminio.

TIEMPO DE ENTREGA: 2-3 semanas a partir de la fecha de pago

APARTA CON TAN SOLO EL 30% DEL TOTAL

FORMA DE PAGO:	%	Monto
70%	Anticipo de instalación	\$ 31,820.66
30%	Al finalizar la instalación	\$ 13,637.34

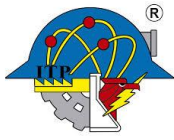
Cualquier cambio que se tenga que realizar en el sistema será un costo extra.
El proyecto se está cotizando de acuerdo a la información recibida.
El monto del proyecto es por el conjunto de las partidas.

Cambios sujetos al precio del dólar, de acuerdo al día de la compra.
No se garantiza cualquier uso diferente al original del producto.

ATENTAMENTE
ING. DIEGO RIVERA

www.ergosolar.mx

Figura 33. Cotización del sistema fotovoltaico por la Empresa Ergosolar



Se selecciona el Sistema Fotovoltaico Interconectado a la Red de CFE por presentar las siguientes ventajas:

1. Resulta más económico que los sistemas autónomos.
2. No representa problema la cantidad de energía generada por el sistema debido a que toda la energía es alimentada a la red de CFE.
3. El sistema podrá operar sin temor a que no haya energía suficiente, ya que toda la energía eléctrica necesaria será tomada de la red de CFE.

5.7 Costos de consumo energético

Para estimar los costos de energía eléctrica para el sistema de climatización, es necesario conocer las tarifas por kW/h que establece la CFE para el año 2019, los cuales se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14. Tarifas establecidas por CFE en el año 2019.

<i>Concepto</i>	<i>Costo</i>	<i>Descripción</i>
<i>Consumo básico</i>	\$2.302	Por cada uno de los primeros 75 kW/h.
<i>Consumo intermedio</i>	\$2.780	Por cada uno de los siguientes 65 kW/h.
<i>Consumo excedente</i>	\$3.061	Por cada kW/h adicional a los anteriores.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la simulación de *EnergyPlus*® para estimar los requerimientos energéticos que demanda la climatización del invernadero, se obtuvo un consumo de energía eléctrica de 6,800 W/h por día, lo que representa un consumo mensual de 204,000 W/h. Si la energía se consume del suministro que ofrece Comisión Federal de Electricidad (CFE), los costos energéticos mensuales serían los mostrados en la Tabla 15.

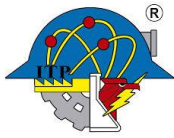
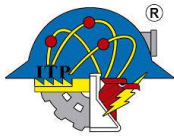


Tabla 15. Cálculo del costo de electricidad para el sistema de climatización.

Concepto	Costo	Descripción
Consumo básico	\$172.65	Por cada uno de los primeros 75 kW/h.
Consumo intermedio	\$180.7	Por cada uno de los siguientes 65 kW/h.
Consumo excedente	\$195.9	Por cada kW/h adicional a los anteriores.
TOTAL A PAGAR MENSUALMENTE		\$ 549.25

En la Tabla 15 se presentan los costos mensuales que se cubrirían por el consumo de energía eléctrica si se consumiera de la red de CFE, lo cual representa un costo anual de \$6,591. Si se considera una inversión en la adquisición de equipos por \$70,000, al paso de 10.6 años se pagaría el costo de inversión y el sistema solar fotovoltaico sería funcional por 10 años más, debido a que se estima que posee una vida útil de 20 años aproximadamente.



6. Conclusiones

De acuerdo con el análisis de los resultados obtenidos, se presentan las siguientes conclusiones:

- El uso de un sistema solar fotovoltaico para cubrir la demanda energética del invernadero resulta más económico en cuanto a inversión inicial y mantenimiento que un sistema solar térmico, debido a que el sistema solar térmico requiere de intercambiadores de calor, la red de tuberías y bombas de distribución del fluido.
- Un sistema solar fotovoltaico requiere una instalación más sencilla que un equipo de calefacción por energía solar térmica debido a la cantidad de equipos que se requieren para el sistema solar térmico y la ubicación de la red de tuberías que se coloca en la superficie del invernadero. De igual manera, el desmontaje de los equipos para mantenimiento o por culminación del ciclo de vida, resulta más complejo para un sistema solar térmico.
- El uso de un material de cambio de fase, PCM, resulta en un considerable beneficio en el ahorro energético. Las Tablas 16 y 17 representan el consumo diario de energía eléctrica con y sin empleo del PCM, respectivamente, lo que representa una disminución en el costo de los equipos del sistema solar fotovoltaico.

Tabla 16. Energía eléctrica requerida en el invernadero para el sistema de climatización sin PCM (EnergyPlus).

<i>Usos</i>	<i>Electricidad (kWh)</i>
<i>Calentamiento</i>	5.32
<i>Enfriamiento</i>	3.27
<i>Iluminación interna</i>	0.00
<i>Iluminación externa</i>	0.00
<i>Equipo exterior</i>	0.00
<i>Ventiladores</i>	1.94

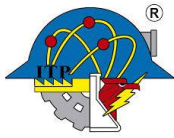
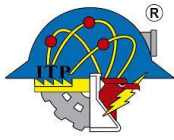


Tabla 17. Energía eléctrica requerida en el invernadero para el sistema de climatización con PCM (EnergyPlus)

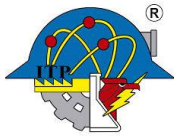
<i>Usos</i>	<i>Electricidad (kWh)</i>
<i>Calentamiento</i>	3.30
<i>Enfriamiento</i>	2.67
<i>Iluminación interna</i>	0.00
<i>Iluminación externa</i>	0.00
<i>Equipo exterior</i>	0.00
<i>Ventiladores</i>	0.82

- El sistema solar fotovoltaico interconectado a la red de CFE es menos costoso que el sistema autónomo debido a que se ahorra el banco de baterías y resulta más conveniente, ya que cualquier cantidad de energía generada por el sistema fotovoltaico puede suministrarse a la red de CFE.
- Un sistema fotovoltaico autónomo para el sistema de climatización del invernadero del Instituto Tecnológico de Pachuca puede costar entre MXN\$70,000 y \$100,000, mientras que un sistema interconectado a la red de CFE tiene un costo aproximado de MXN\$50,000, resultando la opción más adecuada para abastecer la energía necesaria para la operación del sistema de climatización del invernadero.

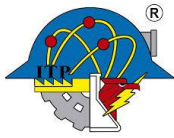


7. Referencias

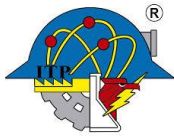
1. Procuraduría Federal del Consumidor. (2018). *Alimentos orgánicos*. 20 de febrero, Sitio web: <https://www.gob.mx/profeco/articulos/alimentos-organicos-144992?idiom=es>
2. Consejo Nacional de la Producción orgánica. (2018). *Sector orgánico*. 21 de febrero, de SAGARPA Sitio web: <http://www.cnpo.org.mx/presentacion.html>
3. Procuraduría Federal del Consumidor. (2018). *Alimentos orgánicos*. 20 de febrero, Sitio web: <https://www.gob.mx/profeco/documentos/alimentos-organicos?state=published>
4. Cuce, E., Young, CH., Riffat, SB. (2015). *Thermal insulation, power generatio, lighting and energy saving performance of heat insulation solar glass as a curtain wall application in Taiwan: a comparative experimental study*. Elsevier.
5. Cuce, E, Cuce, PM. (2013). *A comprehensive review on solar cookers*. Elsevier.
6. Sethi, VP., Sharma, SK. (2008). *Survey and evaluation of heating technologies for worldwide agricultural greenhouse applications*. Elsevier. 82(9).
7. Secretaría de Energía. (2015). *Prospectiva del sector eléctrico 2015-2029*. 18 de abril, de SENER Sitio web: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/44328/Prospectiva del Sector Electrico.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/44328/Prospectiva_del_Sector_Electrico.pdf)
8. A.M. Abdel-Ghany, I.M. Al-Helal. (2010) *Solar energy utilization by a greenhouse: General relations*, Elsevier, p. 189-196.
9. Fitz-Rodríguez, et al (2010). *Dynamic modeling and simulation of greenhouses environments under several scenarios: A web-based application*, Elsevier, p. 105-116.
10. M. Farzaneh-Gord, et al (2013). *New method for applying solar energy in greenhouses to reduce fuel consumption*, EBSCOHost, p. 64-75.
11. Guadarrama, O. (2014). *Automatización de clima para un invernadero*, Instituto Politécnico Nacional, México, D. F.



12. E. Fabrizio (2012). *Energy reduction measures in agricultural greenhouses heating: Envelope, systems and solar energy collection*, Elsevier, p. 57-63.
13. I. Attar (2013). *Parametric and numerical study of a solar system for heating a greenhouse equipped with a buried exchanger*, Elsevier, p. 163-173.
14. Joudi, A, (2014). *A dynamic model and experimental study for the internal air and soil temperatures in an innovative greenhouse*. Elsevier, p. 76-82.
15. Körner, O. Challa, H. (2003). *Process – based humidity control regime for greenhouse crops*, Elsevier, p. 173 – 192.
16. I. Attar et al, (2014). *Experimental study of an air conditioning system to control a greenhouse microclimate*, Elsevier, p. 543-553.
17. I. Attara, (2015). *Efficiency evaluation of a solar water heating system applied to the greenhouse climate*, Elsevier, p. 212-224.
18. Kiyan, M (2013). *Modelling and simulation of a hybrid solar heating system for greenhouse applications using Matlab/Simulink*, Elsevier, p. 147-155.
19. Leal, J. (2015). *Modelado del clima en invernaderos*. Universidad de Nuevo León.
20. Panwar, N. (2011). *Solar greenhouse an option for renewable and sustainable farming*, Elsevier, p. 3934-3945.
21. Abdel, G. et al. (2005). *Dynamic modelo of the environment in a naturally ventilated, fog-cool greenhouse*. Elsevier, p.1521-1539.
22. Trypanagnostopoulos, G., Kavga, A., Souliotis, M., Trypanagnostopoulos, Y. (2017). *Greenhouse performance results for roof installed photovoltaics*. Elsevier. 724-731.
23. Moreno, A., (2013). *Mantenimiento y manejo de invernaderos*, Ediciones Paraninfo, España.



24. Rodríguez, F. (2002). *Modelado y Control jerárquico de crecimiento de cultivos en invernadero*. Universidad de Almería.
25. Escobar, H., (2009), *Manual de producción de tomate bajo invernadero*, Segunda edición, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Colombia.
26. Serrano, Z. (2005). *Construcción de invernaderos*. Mundi Prensa. Madrid.
27. Moreno, A. (2017). *Manejo y mantenimiento de invernaderos*. Mundi Prensa, Madrid España.
28. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2010) *Jitomate. Monografía de Cultivos*. Subsecretaría de Fomento a los Agronegocios, México D.F.
29. Alvim, P. (1965). *Energía solar y producción agrícola*. Separata de Agronomía. Brasil
30. Shahak, Y., Gal, Y. y Ben-Yakir, D. (2008). *Photoselective shade netting integrated with greenhouse technologies for improved performance of vegetable and ornamental crops*. *Acta Hortic.* 797: 75-80.
31. Khalid, A. Ammar, A. (2014). *Greenhouse heating by solar air heaters on the roof*, Elsevier, p. 406-414.
32. Escobar, H., (2009), *Manual de producción de tomate bajo invernadero*, Segunda edición, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Colombia.
33. Farzaneh-Gord, M., et al (2013). *New method for applying solar energy in greenhouses to reduce fuel consumption*, EBSCOHost, p. 64-75.



34. Bustamante, J. de D. (20013) *Manual para el cultivo del jitomate en bioespacio e invernadero*, SAGARPA e INIFAP, Ciudad de México.
35. Giacomelli Gene, A., (1998). *Components of radiation defined: definition of units, measuring radiation transmission, sensors. Greenhouse Glazing & Solar Radiation Transmission Workshop*, Center for Controlled Environment Agriculture. Rutgers University, Cook College, Nueva Jersey.
36. Rodríguez, F., (2002). *Modelado y control jerárquico de crecimiento de cultivos en invernaderos*. Universidad de Almería. España.
37. Díaz, J., (2015). *Sistemas de energías renovables*. Editorial Paraninfo, España.
38. Estrada, C. et al (2010). *Energías alternativas: Propuesta de Investigación y Desarrollo Tecnológico para México*, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
39. Mertens, K., (2015). *Photovoltaics fundamentals, technology and practice*, Ed. Wiley, Alemania.
40. Martínez, P., (2010). *Energía Solar Térmica: Técnicas para su Aprovechamiento*, MARCOMBO, S. A., Barcelona.
41. Valera, D. (1999). *Los invernaderos de Almería: Tipología y mecanización de la gestión del clima*. Monografías de Ciencia y Tecnología. Almería.
42. EnergyPlus. Fecha de consulta: 13 de octubre de 2018. <https://energyplus.net/>
43. Licona, L., Copado, E., (2016). *Construcción de Invernadero Sustentable*. Instituto Tecnológico de Pachuca.
44. Takakura, T., Fang, W., (2002). *Climate under cover*. Kluwer Academic Publishers, p. 190.
45. Jolliet, O. (1994). *Hortitrans, a model of predicting and optimizing humidity and transpiration in greenhouses*. J. Agric. Eng. Res., p. 23-37.