



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

---

---

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

APLICACIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS A INVERNADEROS  
CON PARED HÚMEDA MEDIANTE EL ANÁLISIS TEÓRICO-  
EXPERIMENTAL DE LOS BALANCES ENERGÉTICOS

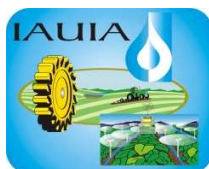
**Tesis**

que como requisito parcial  
para obtener el grado de:

**DOCTOR EN INGENIERÍA**

Presenta:  
Eduardo Ríos Urbán

Bajo la supervisión de:  
Dr. Eugenio Romantchik Kriuchkova



Diciembre de 2017  
Estado de México



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO**

---

---

**POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA**

**APLICACIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS A  
INVERNADEROS CON PARED HÚMEDA MEDIANTE EL ANÁLISIS  
TEÓRICO EXPERIMENTAL DE LOS BALANCES ENERGÉTICOS**

**TESIS**

que como requisito parcial  
para obtener el grado de:

**DOCTOR EN INGENIERÍA**

Presenta:  
**Eduardo Ríos Urbán**

Bajo la supervisión de:  
**Dr. Eugenio Romantchik Kriuchkova**



DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA  
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES  
OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES



Diciembre de 2017  
Estado de México

APLICACIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS A INVERNADEROS CON  
PARED HÚMEDA MEDIANTE EL ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE LOS  
BALANCES ENERGÉTICOS

Tesis realizada por **M.C. EDUARDO RÍOS URBÁN** bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**DOCTOR EN INGENIERÍA**



DIRECTOR  
DR. EUGENIO ROMANTCHIK KRIUCHKOVA



ASESOR  
DR. IRINEO L. LÓPEZ CRUZ



ASESOR  
DR. GILBERTO J. LÓPEZ CANTEÑS



LECTOR EXTERNO  
DR. ENRIQUE BARRERA CALVA  
(UAM-IZT)

## DEDICATORIA

---

A Irene V. Flores Gómez.

---

## **AGRADECIMIENTOS**

Gracias a la Universidad Autónoma Chapingo, al posgrado IAUIA y sus integrantes docentes y administrativos:

**Dr. Eugenio**, guardo su sentido crítico de trabajo. Me enseñó a plantear ideas innovadoras que conducen a la investigación y a resolver los problemas propios de la elaboración de los artículos científicos.

**Dr. José Reyes** su enorme impulso en el desarrollo práctico de la tesis me permitió realizar la experimentación.

**Dra. Elisa Sánchez** tus aportaciones en conocimientos en energía solar y mediciones experimentales para los artículos fue determinante para su publicación.

**Dr. Irineo L., Dr. Gilberto L. y Dr. Enrique B.** sus observaciones durante el examen de grado me permitieron identificar las limitaciones y los alcances de los resultados obtenidos.

**Dr. Martín Hidalgo**, su permanente y sigiloso interés en mis obligaciones y necesidades académicas fue clave para realizar el examen de grado.

Gracias **Rosy Mendoza, Blanca Solís y Mayra Luna** por su comprensión y tolerancia para todas mis solicitudes de apoyo y trámites administrativos.

Gracias al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** por la beca doctoral otorgada para la consecución de este trabajo.

## DATOS BIOGRÁFICOS DEL AUTOR



Nombre: Eduardo Ríos Urbán.

Fecha de nacimiento: 04 abril de 1986.

Lugar de nacimiento: Ciudad de México.

CURP: RIUE860404HDFSRD01

Preparatoria: Instituto Andersen (Inc. UNAM).

Profesión: Empresario.

Licenciatura: Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Iztapalapa.

Título: Ingeniero en Energía. (2010).

Cédula: 7193855.

Maestría: Instituto Politécnico Nacional (Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Unidad Culhuacán)

Título: Maestro en Ciencias de Ingeniería en Sistemas Energéticos. (2013).

Cédula: 10430357.

Doctorado: Universidad Autónoma Chapingo.

Título: Doctor en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. (2017).

Fecha de examen de grado: 15 de diciembre de 2017.

# Contenido

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>viii</b>
<b>ÍNDICE DE CUADROS</b> .....	<b>x</b>
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Introducción general.....	1
1.2 Justificación de la investigación.....	5
1.3 Hipótesis general de trabajo.....	6
1.4 Objetivos.....	6
1.5 Desarrollo de la tesis.....	7
<b>CAPÍTULO II. ANTECEDENTES</b> .....	<b>9</b>
2.1 Fundamentos de energía solar fotovoltaica.....	9
2.1.1 Radiación solar.....	9
2.1.2 La constante solar.....	10
2.1.3 Medición de la radiación solar.....	12
2.2 Instalaciones solares fotovoltaicas.....	12
2.2.1 Interconectadas a la red eléctrica.....	13
2.2.2 Aisladas.....	14
2.2.3 Híbridas.....	14
2.3 Parámetros principales de diseño de sistemas fotovoltaicos.....	15
2.4 Aplicaciones de fuentes de energía solar en invernaderos.....	15
<b>CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE LOS BALANCES DE ENERGÍA DE INVERNADERO CON PARED HÚMEDA</b> .....	<b>19</b>
3.1 Balance de energía en la pared húmeda.....	19
3.1.1 Eficiencia de saturación de aire en la pared húmeda.....	22
3.2 Balance de energía en el invernadero durante la acumulación de calor en el aire. ...	22
3.3 Balance de energía en el extractor de aire.....	26
3.4 Cálculos del diseño y evaluación de sistemas fotovoltaicos.....	27
3.4.1 Eficiencia energética.....	28
3.4.2 Eficiencia exergética.....	29
<b>CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN</b> .....	<b>31</b>
4.1 Instrumentación y adquisición de variables climáticas reales.....	31

<b>4.2 Estudio experimental en la pared húmeda.....</b>	<b>33</b>
<b>4.2.1 Gradientes de temperatura de agua en el tanque de suministro por superficie de pared húmeda y por unidad de tiempo.....</b>	<b>35</b>
<b>4.2.2 Gradiente de temperatura de agua por diferencia de altura en la pared húmeda.....</b>	<b>35</b>
<b>4.3 Estudio experimental en el invernadero.....</b>	<b>36</b>
<b>4.4 Estudio experimental en el extractor de aire.....</b>	<b>37</b>
<b>4.5 Modo de funcionamiento del sistema fotovoltaico híbrido en invernadero.....</b>	<b>38</b>
<b>CAPÍTULO V. RESULTADOS.....</b>	<b>42</b>
<b>5.1 Resultados de la modelación del comportamiento térmico de la pared húmeda.....</b>	<b>42</b>
<b>5.1.1 Gradientes de temperatura de agua en el tanque de suministro por superficie de pared húmeda <math>dT/dA</math> y por unidad de tiempo <math>dT/dt</math>.....</b>	<b>42</b>
<b>5.1.2 Gradiente de temperatura de agua por diferencia de altura, <math>dT/dh</math>, en la pared húmeda.....</b>	<b>43</b>
<b>5.1.3 Eficiencia de saturación de aire en la pared húmeda.....</b>	<b>44</b>
<b>5.2 Resultados de la modelación del comportamiento térmico de aire en invernadero..</b>	<b>45</b>
<b>5.2.1 Coeficiente global de transferencia de calor en la cubierta.....</b>	<b>46</b>
<b>5.2.2 Temperatura de invernadero hermético sin funcionamiento de pared húmeda.....</b>	<b>48</b>
<b>5.2.3 Tasas de ventilación de invernadero para diferentes temperaturas máximas de operación.....</b>	<b>49</b>
<b>5.2.4 Energía eléctrica requerida por los extractores.....</b>	<b>50</b>
<b>5.3 Resultados del análisis del balance de energía en el extractor de aire.....</b>	<b>52</b>
<b>5.4 Componentes e instalación del sistema fotovoltaico híbrido en invernadero.....</b>	<b>55</b>
<b>5.5 Modelación matemática de un secador solar de productos agrícolas.....</b>	<b>57</b>
<b>5.5.1 Secador solar experimental tipo invernadero de productos agrícolas.....</b>	<b>58</b>
<b>5.5.2 Tasa de ventilación, selección de extractores de aire, energía requerida y sistema fotovoltaico.....</b>	<b>59</b>
<b>5.6 Resultados de la evaluación energética de sistemas fotovoltaicos.....</b>	<b>64</b>
<b>CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y DISCUSIONES.....</b>	<b>65</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>69</b>
<b>A1. PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS.....</b>	<b>78</b>
<b>A2. SOLICITUD DE PATENTE DERIVADA DE LA TESIS.....</b>	<b>79</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Divergencia de la radiación desde el Sol hasta la Tierra.....	10
Figura 2. El efecto coseno se relaciona con el concepto de irradiancia horizontal extraterrestre.....	11
Figura 3. Piranómetro para medición de radiación solar.....	12
Figura 4. Componentes principales de sistemas fotovoltaicos: (de izquierda a derecha) Panel solar, controlador de carga, batería e inversor. ....	13
Figura 5. Esquema básico del flujo de energía de una instalación FV interconectada a la red compuesta por paneles solares e inversores. ....	14
Figura 6. Esquema básico del flujo de energía de una instalación fv híbrida.....	15
Figura 7. Esquema de flujo de aire en invernadero con pared húmeda.....	19
Figura 8. Flujos de aire y agua en los paneles de celulosa corrugada que conforman la pared húmeda.....	20
Figura 9. Esquema isométrico de invernadero utilizado en la modelación matemática. ....	24
Figura 10. Diagrama de energías del extractor. ....	27
Figura 11. Invernadero experimental usado para instrumentación con sensores de variables climáticas. ....	32
Figura 12. Pared húmeda. (izquierda) y Extractor de aire (derecha).....	32
Figura 13. Ubicación en invernadero de sensores para el registro de las variables climáticas.....	32
Figura 14. Ubicación de los sensores para determinar los gradientes de temperatura de agua en la pared húmeda. ....	34
Figura 15. Ubicación de los sensores para medición de temperatura y humedad relativa de aire.....	35
Figura 16. Esquema de medición de temperaturas de agua medidas por diferencia de altura.....	36
Figura 17. Diagrama de bloques del sistema fotovoltaico híbrido para extractores de invernadero. ....	39
Figura 18. Explicación del funcionamiento del suministro de energía solar - red eléctrica.....	39
Figura 19. Temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo (izquierda) y humedad relativa (derecha) durante el día de experimentación. ....	42
Figura 20. Variación horaria de las temperaturas del agua en el tanque y del aire al salir de la pared húmeda.....	43
Figura 21. Comparación de temperaturas de bulbo seco antes y después de la pared húmeda y temperatura de bulbo húmedo exterior.....	44
Figura 22. Variación horaria de la eficiencia de la pared húmeda.....	45
Figura 23. Variación horaria de la radiación solar el 19 de junio de 2014. ....	46
Figura 24. Temperaturas de operación de pared húmeda para experimentación en invernadero. ....	46
Figura 25. Variación de la humedad relativa exterior.....	46
figura 26. perfil longitudinal de temperatura de aire de datos experimentales comparado con perfiles de temperatura del modelo cuando varía kc. ....	47
figura 27. perfil lineal de temperatura longitudinal comparado con temperatura del modelo cuando $Kc = 5 W/(m^2°C)$ .....	48
Figura 28. Temperaturas de invernadero sin pared húmeda ( $V \rightarrow 0$ ) en función la radiación solar.....	49
Figura 29. Variación de la tasa de ventilación para obtener distintos perfiles de temperatura máxima, cuando $V = 14 m^3/s$ , se obtiene una temperatura máxima de 25°C.....	50

Figura 30. Tasas de ventilación en función de la superficie del invernadero.....	51
Figura 31. Esquema de instalación de sistema de recuperación de energía residual de invernadero....	53
Figura 32. Esquema de instalación de los principales componentes del SFV híbrido para invernadero.	55
Figura 33. Instalación de los paneles fotovoltaicos y conexión de inversor y baterías en gabinete eléctrico. ....	56
Figura 34. Instalación fotovoltaica concluida.....	56
Figura 35. Secador solar experimental con cubierta parabólica de policarbonato. ....	59
Figura 36. Temperaturas de secador solar operando con diferentes tasas de ventilación. ....	60
Figura 37. Distribución espacial de la temperatura en el secador con $V=3\text{m}^3/\text{s}$ .....	60
Figura 38. Instalación de paneles y conexión eléctrica de inversores. ....	62
Figura 39. Instalación completa de sistema fotovoltaico en secador solar. ....	62
Figura 40. Esquema de instalación eléctrica de sistema fotovoltaico en secador solar. ....	63

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Investigaciones sobre análisis energéticos en invernaderos.....	4
Cuadro 2. Trabajos sobre técnicas de dimensionamiento del sistema fotovoltaico para invernaderos. .	16
Cuadro 3. Características principales del invernadero experimental. ....	31
Cuadro 4. Resumen de resultados de los Gradientes de temperatura de fluidos en la pared húmeda. .	45
Cuadro 5. Datos experimentales utilizados para la calibración del modelo de temperatura. ....	47
Cuadro 6. Características técnicas de algunos ventiladores comerciales. ....	50
Cuadro 7. Energía eléctrica requerida por los extractores de aire para invernaderos de diferentes superficies. ....	52
Cuadro 8. Resultados de energía producida por un eje rotatorio de tres aspas utilizando el flujo de aire de un extractor de 1.2 m de diámetro.....	54
Cuadro 9. Principales componentes del SFV híbrido para invernadero.....	56
Cuadro 10. Modificación de parámetros de modelo matemático para aplicarse a secador solar. ....	58
Cuadro 11. Características principales del secador experimental. ....	59
Cuadro 12. Determinación de la energía requerida por el secador solar. ....	61
Cuadro 13. Componentes principales del SFV híbrido para el secador solar. ....	62
Cuadro 14. Indicadores energéticos del rendimiento de los sistemas fotovoltaicos. ....	64

## RESUMEN

### Aplicación de sistemas fotovoltaicos a invernaderos con pared húmeda mediante el análisis teórico-experimental de balances energéticos

<sup>1</sup>Eduardo Ríos Urbán

<sup>2</sup>Eugenio Romantchik Kriuchkova

La radiación solar es una fuente de energía inagotable y gratuita. La cual puede ser aprovechada por sistemas fotovoltaicos para suministrar electricidad a los extractores de aire de invernaderos con pared húmeda, con ello se aumenta su nivel de sustentabilidad y representa una solución a la falta de red eléctrica en lugares aislados. La pared húmeda se utiliza para controlar, principalmente, la temperatura del invernadero. El objetivo de este trabajo es diseñar un sistema fotovoltaico en función de la temperatura de operación del invernadero. Existen diversas investigaciones relacionadas de aplicación de energía fotovoltaica en invernaderos, sin embargo, estos sistemas no satisfacen las necesidades energéticas de enfriamiento. La metodología de trabajo fue: 1) análisis de los balances de energía en pared húmeda, invernadero, extractor de aire y sistema fotovoltaico. 2) Estudios experimentales utilizando los balances de energía para la obtención de los parámetros de operación del invernadero durante su funcionamiento. 3) Modelación de la temperatura del invernadero y calibración. 4) Diseño, instalación y evaluación del sistema fotovoltaico. Los principales resultados son: 1) Coeficiente global de transferencia de calor en la cubierta, 2) Caudal y energía eléctrica requerida por los extractores en función de la temperatura, 3) Potencial de recuperación de energía de desecho en los extractores de aire. 4) Eficiencia energética y exergética de los sistemas fotovoltaicos. Se obtuvo la relación de las variables de los balances energéticos que permite obtener el diseño del sistema fotovoltaico en función de la temperatura.

#### PALABRAS CLAVE:

Tasa de ventilación, extractores, temperatura de invernaderos, fotovoltaico, eficiencia.

---

<sup>1</sup> Estudiante de doctorado

1 Director de tesis

## ABSTRACT

### Application of photovoltaics to greenhouses with pad-fan system through theoretical-experimental analysis of energy balances

<sup>1</sup>Eduardo Ríos Urbán

<sup>2</sup>Eugenio Romantchik Kriuchkova

Solar radiation is an inexhaustible and free source of energy. It can be exploited by photovoltaic systems to supply electricity to the exhaust fans of greenhouses with a pad-fan system, thereby increasing their level of sustainability and representing a solution to the lack of electrical grid in isolated places. The pad-fan system is mainly used to control greenhouse temperature. The objective of this work is to design a photovoltaic system based on the operating temperature of the greenhouse. There are several studies related to the application of photovoltaic energy in greenhouses; however, these systems do not satisfy the energy needs of the cooling process. The work methodology was: 1) analysis of energy balances in evaporative pad, greenhouse, exhaust fan and photovoltaic system. 2) Experimental studies using energy balances to obtain the operating parameters of the greenhouse during its operation. 3) Modeling the greenhouse temperature and calibration. 4) Design, installation and evaluation of the photovoltaic system. The main results are: 1) Global coefficient of heat transfer in the cover, 2) Mass flow and electrical energy required by the exhaust fans as a function of temperature, 3) Recovery energy potential of the exhaust fans. 4) Energy and exergy efficiencies of photovoltaic systems. The relationship of the variables of the energy balances was obtained, enabling the design of the photovoltaic system as a function of temperature.

#### KEYWORDS:

Ventilation rate, exhaust fans, greenhouse temperature, photovoltaic, efficiency.

---

<sup>1</sup> PhD student

<sup>2</sup> Supervisor

# **CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.**

## **1.1 Introducción general**

Existe un renovado interés en el uso de energías renovables, impulsado por la necesidad de reducir el alto impacto producido por el uso de sistemas de energía fósil. La demanda mundial de energía es de 16 TW aproximadamente y se espera que se duplique en los próximos veinte años. La fuente de energía más abundante y sostenible es el Sol, que proporciona más de 150000 TW de potencia a la Tierra (Duffie, 2013); aproximadamente la mitad de esta energía alcanza la superficie de la Tierra, mientras que la otra mitad se refleja en el espacio exterior. Uno de los mayores retos científicos y tecnológicos que enfrentamos hoy en día es desarrollar formas eficientes de recolectar, convertir, almacenar y utilizar la energía solar a costos accesibles para diversificar su aplicación en todos los sectores. Los valores de la intensidad de radiación solar son fundamentales para el diseño de las instalaciones de energía fotovoltaica (Li, 2012) y para los diseños de recintos de alta eficiencia energética (Yang, 2013). Sin embargo, estos valores de radiación solar varían según la latitud geográfica, la estación y la hora del día, debido a las diversas posiciones del sol en condiciones climáticas impredecibles.

Uno de los principales inconvenientes de la energía fotovoltaica es que la radiación solar no siempre está disponible cuando es necesaria. Se están dedicando considerables esfuerzos de investigación a técnicas que pueden ayudar a superar estos inconvenientes. Mientras que en otros procesos de generación de energía la principal fuente de energía (el combustible) puede ser manipulada como la principal variable de control, en los sistemas de energía solar la principal fuente de energía, la radiación solar, no puede ser manipulada.

Existen diversas actividades en el sector agrícola que requieren el uso de fuentes de energía alternativa, entre ellas destaca la agricultura protegida bajo invernadero. El ambiente del invernadero está representado por un grupo de variables climáticas, como la radiación, la temperatura, la humedad y la concentración de dióxido de carbono, que afectan el desarrollo y el crecimiento de

las plantas. También depende del sistema de ventilación, hoy es común utilizar ventilación natural o forzada.

Los invernaderos requieren dos formas distintas de enfriamiento, una para el verano y otra para el invierno. Aquellos lugares que no se encuentran en grandes elevaciones sobre el nivel del mar, experimentan periodos de calor en el verano adversos para la producción bajo invernadero. Las temperaturas interiores de invernaderos enfriados con ventiladores son frecuentemente 11 °C mayores que el ambiente circundante. Los efectos perjudiciales de las altas temperaturas en los cultivos se caracterizan por pérdidas de fuerza en el tallo, reducción de tamaño de la flor, retraso de floración, entre otras (ASABE, 2008). Los sistemas de enfriamiento evaporativo, desarrollados para combatir el exceso de calor, son más eficientes en el verano. Se basan en el proceso de absorción de calor durante la evaporación del agua. Los dos principales sistemas utilizados hoy son la pared húmeda y la nebulización. El sistema de pared húmeda se ha utilizado desde 1954 y es el sistema más comúnmente utilizado en invernaderos. A lo largo de una cara del invernadero se ubican paneles, de celulosa corrugada principalmente, por los cuales circula agua en sentido vertical y descendente. A su vez, ventiladores de extracción son colocados en la pared opuesta. Con esto se hace pasar el aire caliente por los paneles de celulosa, mediante el proceso de evaporación donde el agua absorbe el calor del aire caliente y este circula a través de todo el invernadero (Bucklin 1993, Arbel 1999). Este sistema puede reducir la temperatura del aire en el invernadero por debajo de la temperatura exterior. La pared húmeda puede reducir la temperatura del aire entrante en alrededor de 80% de la diferencia entre las temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo.

Los principales parámetros de diseño de estos sistemas son (Nelson, 1998): 1. Tasa de ventilación (eliminación de aire caliente para permitir la entrada de aire frío desde la pared). 2. Materiales de intercambio de calor para enfriar el aire. 3. La ubicación de los extractores. La radiación solar aumenta la temperatura del aire que sale de la almohadilla durante su paso a lo largo del invernadero hacia los ventiladores de extracción en el lado opuesto. Se considera importante mantener una temperatura constante en todo el invernadero. Por lo tanto, para controlar el

aumento de temperatura, será necesario aumentar la velocidad del aire. Este aumento en la tasa de ventilación también representa un aumento en la cantidad de energía eléctrica consumida por los ventiladores.

Se han realizado investigaciones sobre el comportamiento térmico en los invernaderos durante el verano, así como gradientes de temperatura de los fluidos: agua y aire, en la pared húmeda y sistemas de suministro de energía solar para llevar a cabo el proceso de enfriamiento (Abdel 1994, Wahab 2006). Willits (2008) desarrolló un modelo para investigar la estratificación térmica en los invernaderos, considerando como parámetros principales la temperatura de aire, humedad relativa y radiación solar, sus resultados permitieron determinar los lugares óptimos para la instalación de sensores de temperatura dentro del invernadero. Franco, et al. (2014) propuso un sistema mejorado para aumentar la eficiencia energética en el enfriamiento de invernaderos, en el sureste de España, el lugar con mayor concentración de invernaderos en el mundo, comparó el efecto de enfriamiento utilizando cuatro distintos materiales de pared húmeda y sus resultados muestran que los paneles de celulosa corrugada presentan una caída de presión menor, así como una mejor eficiencia de saturación. Al-Helal (2004) analizó el consumo de energía de la pared húmeda durante las condiciones extremas en el verano, demostró que el incremento en el consumo de electricidad no es proporcional al incremento en la temperatura ambiente. En 2011 Ahmed propuso un diseño de sistema fotovoltaico aislado para suministrar la energía a los ventiladores de los invernaderos en áreas remotas, sin embargo, el sistema resulta costoso y su principal objetivo es suministrar la totalidad de la energía, dado que está desconectado de la red y las cargas eléctricas son inductivas disminuye la confiabilidad del banco de baterías, poniendo en riesgo el control de la profundidad de descarga y disminuyendo la vida útil de las mismas.

Diversas investigaciones se han desarrollado sobre la aplicación de la energía fotovoltaica en los sistemas de ventilación en invernaderos, sin embargo, en este trabajo se han identificado algunas desventajas y observaciones sobre ellos, donde se demuestra que esos sistemas fotovoltaicos estén dimensionados o calculados a partir de las necesidades energéticas de los invernaderos. En el cuadro 1 se

muestra un resumen de investigaciones destacadas sobre el análisis del comportamiento energético de invernaderos.

**CUADRO 1. INVESTIGACIONES SOBRE ANÁLISIS ENERGÉTICOS EN INVERNADEROS.**

Temas	Autores	Observaciones	Forma de atender el problema en esta investigación
Balace de energía del invernadero	Slimani (2016) Ahmed (2011)	No hay relación entre resultados de modelación y sistema fotovoltaico. No se considera la influencia de la pared húmeda.	Con modelo de invernadero se analizará el caudal de aire en función de la temperatura. Con esto se conocerá la energía eléctrica que deberá producir el sistema fotovoltaico.
Eficiencia en secadores tipo invernadero	Vidaña, (2013)	El análisis de eficiencia está centrado en el secado de los productos.	El análisis de eficiencia estará centrado en el uso de la energía en los extractores.
Materiales de cubierta	Janjai, (2006)	Fue utilizada cubierta de policarbonato con transmitancia de 0.8	Se utilizarán materiales con mejores valores de transmitancia.
Aplicación de energía solar	Janjai, (2009)	El diseño del SFV no satisface las necesidades del secador solar.	El SFV se diseñará a partir del cálculo de energía requerida por el secador.

En esta investigación se abordan las observaciones y desventajas de los trabajos mencionados las cuales cobran importancia cuando se planea la implementación de sistemas fotovoltaicos en invernaderos, debido a que cuando no se consideran las necesidades energéticas de los invernaderos para su sistema de enfriamiento con pared húmeda: 1) se corre el riesgo de aumentar los costos de inversión para la adquisición de los equipos eléctricos. 2) no existe la seguridad de que el sistema fotovoltaico pueda suministrar la energía total demandada por los extractores de aire. La importancia de dimensionar un sistema fotovoltaico es garantizar que la electricidad generada a partir de la radiación solar sea equivalente



a la energía consumida por los ventiladores. En este trabajo también se propone el uso de modelos matemáticos basados en los balances de energía de la pared húmeda, el invernadero, y el extractor de aire para obtener el diseño de un sistema fotovoltaico conectado adecuado para cada invernadero en particular. Se calcula la energía requerida desde la fase de diseño, es decir, selecciona la potencia eléctrica de los ventiladores y el número de ellos. Este estudio también resuelve el problema de la complejidad de los sistemas fotovoltaicos híbridos y aislados.

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar una metodología de aplicación de sistemas fotovoltaicos en invernaderos con pared húmeda, relacionando los resultados experimentales de los balances de energía para calcular la energía requerida por los extractores de aire. Esto permitirá reducir las temperaturas excesivas y no deseadas dentro de un invernadero. También aumentará la confiabilidad del rendimiento de los sistemas fotovoltaicos para generar invernaderos agrícolas sostenibles energéticamente.

## **1.2 Justificación de la investigación.**

- La energía solar es inagotable y gratuita, se deben desarrollar métodos de aprovechamiento de esta fuente en el sector agricultura.
- Esta investigación aportará el conocimiento teórico del comportamiento energético de invernaderos considerando los balances energéticos presentes en el proceso de extracción de aire.
- Esta tesis contribuye al desarrollo de la sustentabilidad energética del sector agrícola. Propiciando y fomentando el cuidado del medio ambiente por la disminución de emisiones de CO<sub>2</sub>. Cualquier invernadero agrícola, sin importar su nivel de tecnología actual, puede integrar un sistema fotovoltaico con costos de inversión de acuerdo a sus necesidades energéticas.

- Motivación del autor: “Lejos de ser una opción ingenua y poco costeable, la energía solar es una de las pocas opciones realistas. Lo ingenuo es pensar que podemos sostener una sociedad que está acabando con sus fuentes de energía y su entorno, sin preocuparnos por lo que ocurrirá después”.

### **1.3 Hipótesis general de trabajo.**

El análisis del comportamiento de la temperatura de aire en la pared húmeda y dentro del invernadero permite calcular la tasa de ventilación y la energía eléctrica requeridas por los extractores de aire para llevar a cabo el proceso de enfriamiento evaporativo, dicha cantidad de energía sirve como parámetro principal del diseño de un sistema fotovoltaico.

### **1.4 Objetivos**

#### **General:**

Desarrollar una metodología de aplicación de sistemas fotovoltaicos a invernaderos con pared húmeda a partir de las tasas de ventilación y de la energía requerida por los extractores de aire utilizando los balances de energía en la pared húmeda, en el invernadero y en los extractores de aire.

#### **Específicos:**

1. Instrumentar una pared húmeda de invernadero para determinar experimentalmente los gradientes de temperaturas de los flujos de agua y aire.
2. Modelar matemáticamente y estudiar la distribución de temperaturas del flujo de aire desde su salida de la pared húmeda hasta su salida del invernadero en los extractores de aire.
3. Determinar la energía contenida en el flujo de aire que sale del invernadero y que se puede recuperar como energía de desecho del extractor. Para proponer un método de recuperación de energía en invernaderos.

4. Diseñar y construir un sistema fotovoltaico para invernadero a partir de las tasas de ventilación y energía requerida por los extractores obtenidos de los balances de energía.
5. Diseñar y construir un sistema fotovoltaico que valide la metodología desarrollada para invernaderos, en un secador solar tipo invernadero de productos agrícolas.
6. Evaluar las eficiencias energéticas y exergéticas de los sistemas fotovoltaicos en invernadero y secador durante su funcionamiento.

### **1.5 Desarrollo de la tesis.**

En el capítulo 2 se presentan los fundamentos de la energía solar fotovoltaica, de la radiación solar y su disponibilidad en la superficie terrestre para que pueda ser aprovechada mediante su conversión en energía eléctrica por los paneles fotovoltaicos. Se describen los tipos de tecnología disponibles actualmente en las instalaciones fotovoltaicas, destacando las principales ventajas y desventajas entre cada una de ellas. Así como el estado del arte de la aplicación de la modelación matemática de los invernaderos y de sistemas fotovoltaicos.

Una vez conocido el funcionamiento del sistema fotovoltaico se procedió a analizar, en el capítulo 3, los balances de energía en los subsistemas que componen el invernadero con pared húmeda. Esto permite la identificación clara de las necesidades energéticas del invernadero en función de la temperatura.

En el capítulo 4, se muestra el desarrollo de la experimentación en el invernadero para obtener los parámetros de diseño del sistema fotovoltaico. Para esto se obtuvieron datos reales de operación que fueron utilizados en los balances de energía del apartado anterior, principalmente el modelo de temperatura de invernadero fue calibrado para obtener la cantidad de energía que consumen los extractores de aire. Con estos resultados se diseñó el sistema fotovoltaico. Posteriormente se realizó la instalación fotovoltaica y finalmente su evaluación de rendimiento energético durante su funcionamiento. La calibración del modelo matemático de temperatura permitió dimensionar un sistema fotovoltaico para un

secador solar de productos agrícolas. Ambos sistemas fotovoltaicos fueron evaluados mediante la eficiencia energética y eficiencia exergética de cada arreglo fotovoltaico.

En el capítulo 5 se muestran los resultados derivados de los análisis experimentales de los balances de energía, en la pared húmeda se realizó la determinación mediante los análisis termodinámico y psicrométrico de la temperatura del aire enfriado por la pared húmeda, se desarrolló la teoría del aire húmedo y se obtuvo como resultado la eficiencia de saturación adiabática del aire en la pared húmeda. Después se analizó la distribución de la temperatura del aire a lo largo del invernadero mediante la resolución de una ecuación diferencial lineal. Se calibró el modelo matemático mediante la determinación del coeficiente global de transferencia de calor en la cubierta. Se obtuvieron las tasas de ventilación del invernadero para mantener una temperatura máxima de 25°C. Del análisis del balance de energía en el extractor se obtuvo como resultado principal la determinación de la cantidad de energía que puede recuperarse del flujo de aire de salida. Derivado de este análisis se realizó una solicitud de patente de invención de “Invernadero con sistema de enfriamiento de pared húmeda que integra un equipo de aprovechamiento de energía residual”. Se realizó la relación de las variables de los balances de energía anteriores, se procedió a utilizar el resultado de energía requerida por los extractores para diseñar el sistema fotovoltaico que suministre esta cantidad de energía. Por último, se muestran los resultados de rendimiento energético donde se incluyen los análisis de costos de inversión y el impacto ambiental que los sistemas fotovoltaicos producen.

En el capítulo 6 se desarrollan las conclusiones de esta investigación, donde se consideran los aportes científicos, la utilidad de los resultados y la capacidad del trabajo desarrollado en esta investigación para ser reproducido en el sector agrícola mexicano.

## **CAPÍTULO II. ANTECEDENTES**

### **2.1 Fundamentos de energía solar fotovoltaica.**

La Tierra recibe la mayor parte de su energía del Sol en forma de radiación electromagnética solar. Las fuentes de energía renovables, como la energía eólica, la energía de las olas y los biocombustibles, dependen de la energía del sol (Parida 2011). Además, algunas de las fuentes de energía no renovables, como los combustibles fósiles, fueron originadas por la energía solar en el pasado. La energía solar se origina a partir de las reacciones de fusión nuclear que se producen en el núcleo del Sol, donde los átomos de hidrógeno se fusionan en helio. La expectativa de vida restante del Sol es de 5 mil millones de años. La reacción de fusión crea calor que da lugar a temperaturas en el núcleo cercanas a los 15 millones de grados Celsius ( $^{\circ}C$ ). A esas temperaturas, los fotones son emitidos por los átomos y viajan una distancia muy corta antes de ser absorbidos por otro átomo causando que el átomo vecino se caliente y la posterior emisión de otro fotón. Toma un fotón alrededor de 100000 años para llegar a la superficie y alrededor de 8 minutos para recorrer los 149,5 millones de kilómetros que separan al Sol de la Tierra.

#### **2.1.1 Radiación solar.**

La velocidad a la cual la energía solar alcanza un área unitaria en la Tierra se llama irradiancia solar y se mide en  $W/m^2$ . La integral de la irradiancia solar durante un período de tiempo se llama radiación solar o irradiación y se mide en  $J/m^2$ . Con mucha frecuencia, la irradiancia solar también se denomina radiación solar usando las mismas unidades ( $W/m^2$ ) (Zhang, 2017).

La potencia total emitida por la superficie del Sol es de aproximadamente  $63 MW/m^2$ . La fotosfera tiene una temperatura promedio de aproximadamente  $5800 K$  y suministra radiación con un espectro similar al espectro de radiación emitida por un cuerpo negro a  $5800 K$ ; la mayor parte de la energía se emite en las bandas visibles ( $450-700 nm$ ). Una porción significativa de la energía solar se emite en el

infrarrojo (IR) y ultravioleta (UV) y más pequeñas cantidades de energía se transmiten por radio, microondas, rayos X y rayos gamma.

La radiación solar es absorbida por la atmósfera, el suelo y los océanos. Viento y olas provienen de la energía solar. Una pequeña porción de energía solar se transforma en cinética energía de los vientos utilizados por los sistemas de energía eólica. El viento también causa olas y corrientes que son utilizados por ondas o generadores de corriente. Parte de la energía solar es transformada por las plantas en biomasa mediante fotosíntesis, esto finalmente se convierte en energía térmica por oxidación (Bakirci, 2009). La parte restante de la biomasa produce sedimentos orgánicos que se transformarán en combustibles fósiles en el futuro. El disco de la Tierra intercepta la radiación solar con un área  $\pi R^2$ ; donde  $R$  es el radio de la Tierra. Para un equilibrio térmico, la absorción de la radiación solar debe ser igual a la energía emitida desde la Tierra al espacio. Cuando la radiación solar golpea la atmósfera, parte de ella se refleja, otra parte es dispersada o absorbida por el aire. La radiación que llega a la superficie directamente y no se absorbe, se refleja o dispersa, se llama radiación solar directa. La radiación reflejada y dispersa llegar al suelo se llama radiación difusa.

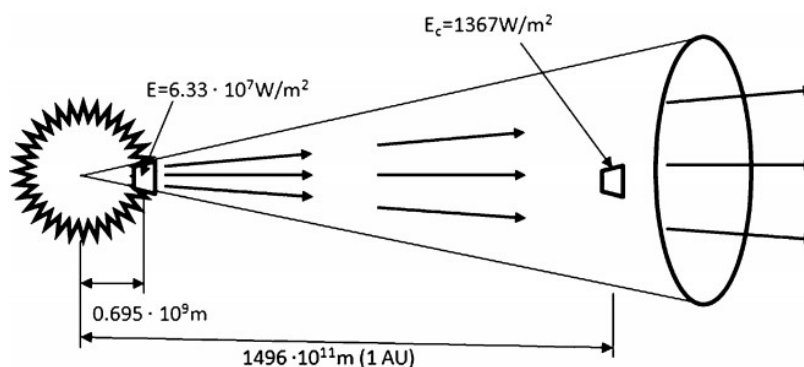


FIGURA 1. DIVERGENCIA DE LA RADIACIÓN DESDE EL SOL HASTA LA TIERRA.

### 2.1.2 La constante solar.

La intensidad de radiación en la superficie del Sol es aproximadamente  $6.33 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$ . Dado que la radiación se extiende como la distancia al cuadrado, en el momento en que viaja a la Tierra ( $1496 \cdot 10^{11} \text{ m}$  o  $1 \text{ AU}$  es la distancia

promedio Tierra-Sol), la energía radiante que cae sobre  $1 \text{ m}^2$  de superficie se reduce a  $1367 \text{ W/m}^2$  como se muestra en la figura 1. La intensidad de la radiación que sale del Sol es relativamente constante. Por lo tanto, la intensidad de la radiación solar a una distancia de  $1 \text{ UA}$  se llama constante solar  $E_c$  y tiene un valor actualmente aceptado de  $1367 \text{ W/m}^2$ .

La órbita de la Tierra es elíptica, por ello la intensidad de la radiación solar recibida fuera de la atmósfera de la Tierra varía por el cuadrado de la distancia  $D$  de la Tierra al Sol. (Teke, 2015). La variación de la irradiancia solar [ $\text{W/m}^2$ ] puede aproximarse por la siguiente expresión:

$$E_{ext} = E_c \left[ 1 + 0.034 \cos \left( \frac{360N_d}{365.25} \right) \right] \quad \text{Ec. 1}$$

donde  $E_{ext}$  es la irradiancia solar incidente fuera de la atmósfera de la Tierra y  $N_d$  es el número del día del año (a partir del 1 de enero). La irradiancia solar extraterrestre que cae sobre una superficie paralela al suelo (figura 2).

$$E_{ext,h} = E_{ext} \cos(\theta_z) \quad \text{Ec. 2}$$

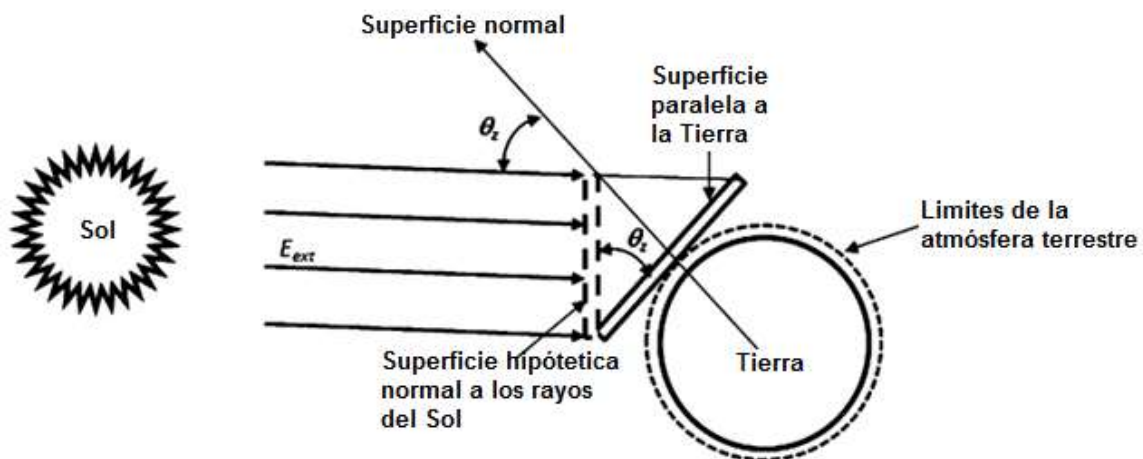


FIGURA 2. EL EFECTO COSENO SE RELACIONA CON EL CONCEPTO DE IRRADIANCIA HORIZONTAL EXTRATERRESTRE.

Donde  $\theta_z$  es el ángulo entre las dos superficies, que es el ángulo del cenit solar. La reducción de la radiación por el coseno del ángulo entre la radiación solar y una superficie normal se denomina efecto coseno. Debido al efecto coseno, la

irradiancia solar extraterrestre en un plano horizontal varía cíclicamente a medida que la Tierra gira sobre su eje. La cantidad de radiación solar recibida en una superficie horizontal fuera de la atmósfera forma un límite superior a la cantidad de radiación que caerá en una superficie horizontal debajo de la atmósfera de la Tierra. También describe el efecto coseno sin la complicación de la masa de aire y la capa de nubes.

### **2.1.3 Medición de la radiación solar**

Los piranómetros son los sensores utilizados para medir la irradiancia solar global, es decir, la energía del Sol que viene de todas las direcciones en el hemisferio por encima del plano del instrumento. La medida es la suma de la irradiancia solar directa y difusa (Khatib, 2012). Para medir el componente normal directo de la irradiancia solar solamente, se usa un instrumento llamado pirheliómetro de incidencia normal (NIP) o simplemente pirheliómetro.



**FIGURA 3. PIRANÓMETRO PARA MEDICIÓN DE RADIACIÓN SOLAR.**

La irradiancia difusa puede medirse modificando un piranómetro usando un dispositivo de sombra lo suficientemente grande como para bloquear la irradiancia directa en este sensor.

### **2.2 Instalaciones solares fotovoltaicas.**

Para aprovechar la radiación solar descrita en el apartado anterior se utilizan las instalaciones solares fotovoltaicas, están compuestas por tres subsistemas principales: 1) Generación. Donde los paneles fotovoltaicos convierten la radiación solar en corriente eléctrica y son configurados en arreglos para sumar la potencia



unitaria de ellos, según las necesidades energéticas de la aplicación seleccionada. 2) Acondicionamiento. La corriente generada por los paneles fotovoltaicos es de tipo directa y debe ser convertida a alterna para suministrarla a las cargas, se realiza mediante inversores de corriente. 3) Acumulación: se utilizan baterías para acumular la energía producida y esta puede estar disponible cuando no hay radiación solar disponible. (Lacerda, 2016).



FIGURA 4. COMPONENTES PRINCIPALES DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS: (DE IZQUIERDA A DERECHA) PANEL SOLAR, CONTROLADOR DE CARGA, BATERÍA E INVERSOR.

Las instalaciones fotovoltaicas pueden tener diferentes configuraciones según la aplicación requerida, los principales tipos de instalaciones se describen a continuación:

### 2.2.1 Interconectadas a la red eléctrica.

Tienen como objetivo principal maximizar anualmente la producción de energía eléctrica que es inyectada a la red de suministro local y se utilizan donde existe disponibilidad de la misma (Ferroni, 2016). La potencia nominal de las instalaciones interconectadas está relacionada con la superficie útil disponible para la instalación del arreglo de paneles fotovoltaicos, aproximadamente de  $6 m^2$  por cada  $kWp$  instalado en función del rendimiento del generador fotovoltaico. La potencia típica de la mayor parte de este tipo de instalaciones se sitúa cercana a los  $5 kWp$  en aplicaciones residenciales y hasta los  $100 kWp$  en otras instalaciones en edificios e integración urbana. La conexión a la red de estas instalaciones se puede realizar

directamente mediante baja tensión en modo monofásico hasta 5 kW y en trifásico para el resto.

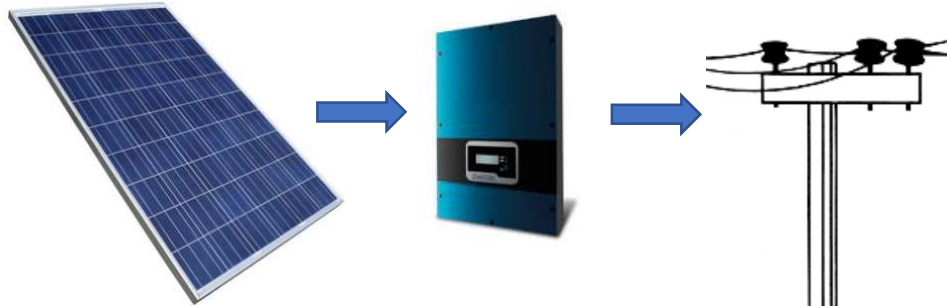


FIGURA 5. ESQUEMA BÁSICO DEL FLUJO DE ENERGÍA DE UNA INSTALACIÓN FV INTERCONECTADA A LA RED COMPUESTA POR PANELES SOLARES E INVERSORES.

### 2.2.2 Aisladas.

En aplicaciones donde no se dispone de la red eléctrica es recomendable el uso de sistemas fotovoltaicos aislados (Spataru, 2016). Además de los paneles y el inversor de corriente se requiere el uso de baterías y controladores o reguladores de carga, debido a que en sistemas fotovoltaicos es habitual trabajar con elevadas corrientes. El objetivo de estos controladores es realizar un proceso óptimo de carga de la batería, permitiendo la carga completa, pero evitando la sobre carga y sobre descarga, con esto se alarga la vida útil del sistema de acumulación. Como es de esperarse, las instalaciones fotovoltaicas aisladas son más costosas que las interconectadas a la red cuando ambas deberían producir la misma cantidad de energía eléctrica.

### 2.2.3 Híbridas.

En lugares donde se dispone de red eléctrica, pero se desea ahorrar energía, se pueden utilizar sistemas fotovoltaicos que son alimentados por la red eléctrica y los paneles fotovoltaicos para suministrar simultáneamente o de forma alternada la energía a las cargas (Solano, 2017). Además, de funcionar como un sistema de ahorro de energía, estos sistemas proporcionan funciones de SAI (Sistema de

Alimentación Ininterrumpido), obteniendo un subsistema de CA (Corriente alterna) aislado.

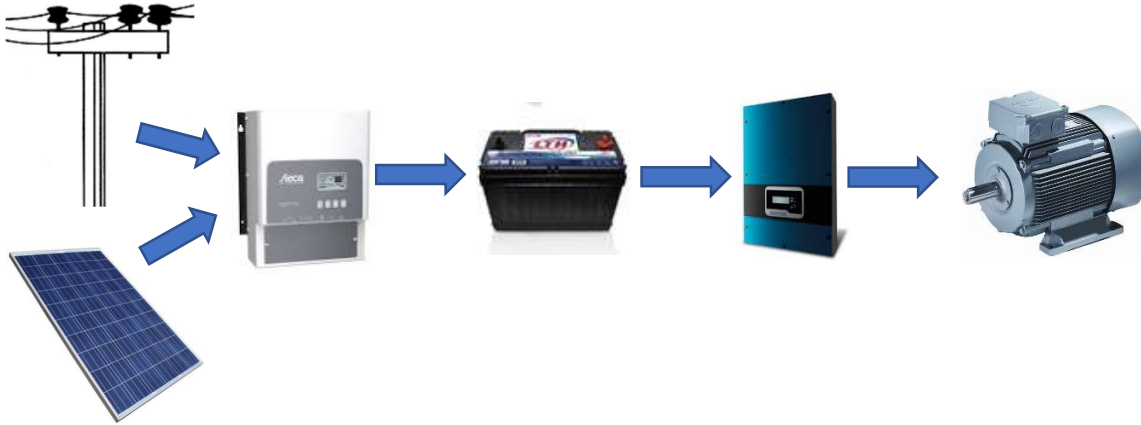


FIGURA 6. ESQUEMA BÁSICO DEL FLUJO DE ENERGÍA DE UNA INSTALACIÓN FV HÍBRIDA.

### 2.3 Parámetros principales de diseño de sistemas fotovoltaicos.

Para diseñar los sistemas fotovoltaicos en cualquier aplicación y seleccionar el número y potencia eléctrica de los paneles solares, reguladores de carga, baterías e inversores, es indispensable conocer como parámetros iniciales: 1) La cantidad de energía que es consumida por las cargas y 2) La cantidad de energía solar disponible en el lugar geográfico de la instalación. (Siecker, 2017).

### 2.4 Aplicaciones de fuentes de energía solar en invernaderos.

Las aplicaciones de sistemas fotovoltaicos en invernaderos han sido desarrolladas extensamente (Campiotti 2008, Martínez 2012), sin embargo, no cumplen con el requisito de diseño mencionado en el apartado 2.3, a saber, determinación de los consumos de energía eléctrica por las cargas. Este es un dato indispensable para elevar la confiabilidad de los sistemas fotovoltaicos. Cuando no se determina el consumo de energía, no es posible realizar el cálculo de los componentes del mismo. Durante esta investigación se encontró el problema de que los sistemas fotovoltaicos en los invernaderos no han sido implementados en funciones de las necesidades energéticas. La variable de control más importante de un invernadero es la temperatura del aire al interior del mismo, la cual determina las

demás propiedades termodinámicas como entalpía, entropía, humedad relativa, volumen específico, por ejemplo. La influencia de los equipos tecnológicos en el invernadero y su consumo energético se relaciona directamente sobre la temperatura del aire. En esta investigación no se encontraron aplicaciones de sistemas fotovoltaicos en invernaderos que cumplan su propósito en función de la temperatura. En el cuadro 2 se muestra un resumen de estas investigaciones y sus principales desventajas en el dimensionamiento del sistema fotovoltaico.

**CUADRO 2. TRABAJOS SOBRE TÉCNICAS DE DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA INVERNADEROS.**

Autor	Tipo de SFV	Técnica de dimensionamiento y diseño	Principales desventajas.
Al-Shamiry (2007)	Sistema fotovoltaico híbrido	La energía requerida por el invernadero se obtuvo de datos técnicos. Multiplicando la potencia eléctrica por las horas de uso.	El resultado no se relaciona con el comportamiento del invernadero.
Carlini (2012)	Módulos FV semi transparentes	El autor propone un arreglo del SFV y después mide la energía producida por él y la compara con la energía utilizada por los extractores.	No satisface la energía de los invernaderos, esta aplicación no es reproducible en ningún invernadero.
Ganguly (2010)	Sistema híbrido de celdas de combustible y fotovoltaico.	La energía se calcula para diversos procesos en conjunto, no solo para enfriamiento.	La construcción del sistema es extremadamente complejo. No es viable técnicamente.
Al-Ibrahim (2006)	Sistema fotovoltaico aislado	Se midió el recurso solar en el sitio para dimensionar el sistema fotovoltaico para el invernadero.	No satisface la energía del invernadero.

## 2.1 Modelación matemática de invernaderos.

La modelación matemática de la temperatura en invernaderos ha sido desarrollada con objetos de estudio diferentes a la aplicación de los sistemas fotovoltaicos (Baxevanou 2010, Jain 2007). La metodología general para el desarrollo de modelos matemáticos predictivos de crecimiento de cultivos ha sido ampliamente documentada. Los sistemas de ventosas son extremadamente efectivos en invernaderos con cultivos en las primeras etapas de desarrollo, alcanzando gradientes térmicos de 8-12 °C (Landsberg et al, 1979).

En cuanto a la modelización climática, López et al. (2005) optimizaron modelos dinámicos basados en redes neuronales para predecir el clima de los invernaderos con ventilación natural. Ruiz et al. (2015) utilizaron un modelo de estado estacionario basado en un balance de energía para predecir la tasa de ventilación del invernadero, sus resultados mostraron que la ventilación natural no es suficiente para obtener una temperatura óptima, por lo que se requiere ventilación forzada. La energía solar térmica se ha implementado para el proceso de calentamiento de invernaderos, por ejemplo, un estudio exhaustivo realizado por Esen y Yuksel (2013) en Turquía reveló que la energía solar térmica es capaz de hacer que el proceso de calentamiento sea sostenible en los invernaderos. Sin embargo, el enfriamiento también representa un proceso con una gran demanda de energía. Teniendo en cuenta que Turquía tiene un recurso solar promedio de 1400 *kWh* por año, mientras que la Región Central de México tiene 2000 *kWh*, se espera que un sistema solar pueda tener un mejor rendimiento en México que Turquía, pero ahora se aplica a la refrigeración.

La implementación de tecnología fotovoltaica en invernaderos es reciente y se han desarrollado diseños de sistemas fotovoltaicos para iluminación, bombeo de agua, control y ventilación forzada para enfriamiento (Al Helal, 2004).

Los invernaderos deben observarse como sistemas físicos que interactúan con el medio ambiente basados en principios y leyes físicas definidas. El sistema de un invernadero se modela usando un conjunto de ecuaciones que proporcionan una visión general del interior dependencias de temperatura. Basado en esto, los

requisitos de energía de los controladores climáticos se pueden definir y un equilibrio energético en el tiempo de todo el sistema se puede calcular. Hay diversas investigaciones sobre invernaderos que intentan disminuir las demandas de calefacción, refrigeración, ventilación e iluminación de invernaderos convencionales. Para ello recurren a los modelos matemáticos para llevar a cabo simulación matemática (Cuce, 2016). Sin embargo, diversos autores evalúan los modelos y balances de energía en los subsistemas del invernadero de forma independiente, y no consideran de forma global el comportamiento energético de la temperatura.

### CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE LOS BALANCES DE ENERGÍA DE INVERNADERO CON PARED HÚMEDA.

Los balances de energía que conforman el invernadero con pared húmeda son desarrollados en los siguientes apartados, lo anterior con la finalidad de describir el comportamiento energético del aire y agua en la pared húmeda, en el invernadero y en el extractor de aire (figura 7). La pared húmeda enfriará el aire exterior, sin embargo, por efectos de la radiación solar, su temperatura aumentará conforme recorra el invernadero hasta su salida por los extractores de aire en la cara opuesta a la pared húmeda. Se analizan los tres balances de energía aplicados en: 1) la pared húmeda, 2) en el invernadero durante el recorrido del flujo de aire y 3) en los extractores de aire.

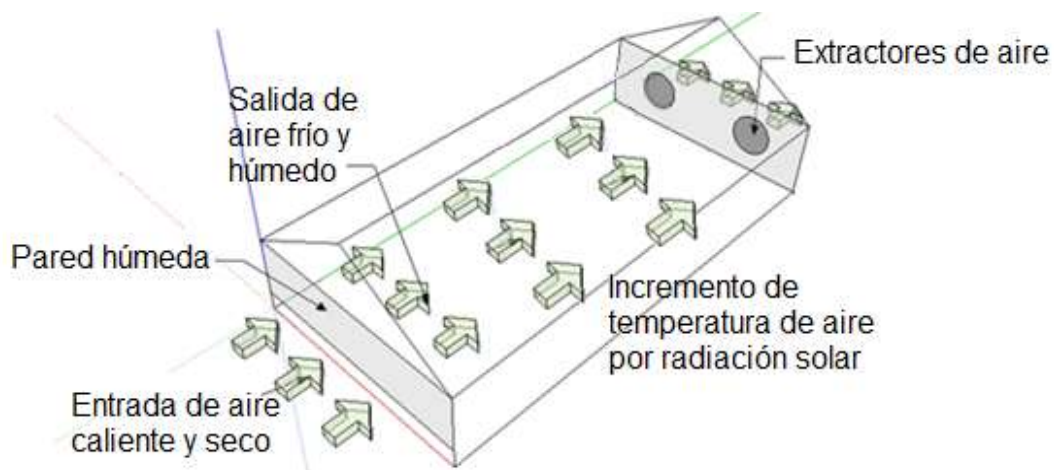


FIGURA 7. ESQUEMA DE FLUJO DE AIRE EN INVERNADERO CON PARED HÚMEDA.

#### **3.1 Balance de energía en la pared húmeda.**

La temperatura del aire al salir de la pared húmeda,  $T_2$ , puede ser analizada mediante la ecuación termodinámica del proceso de saturación adiabática, ecuación 3 (Franco 2014, Malli 2011). Cuando ambos fluidos, aire y agua, entran en contacto en los paneles de celulosa corrugada de la pared húmeda, sufren una interacción energética en donde el calor del aire se utiliza para evaporar el agua, aumentando

la humedad relativa del aire, figura 8. En términos de las propiedades del aire seco, vapor de agua y agua de suministro a la pared húmeda, donde el material de celulosa es considerado como medio poroso y húmedo a través del cual fluye agua y aire.

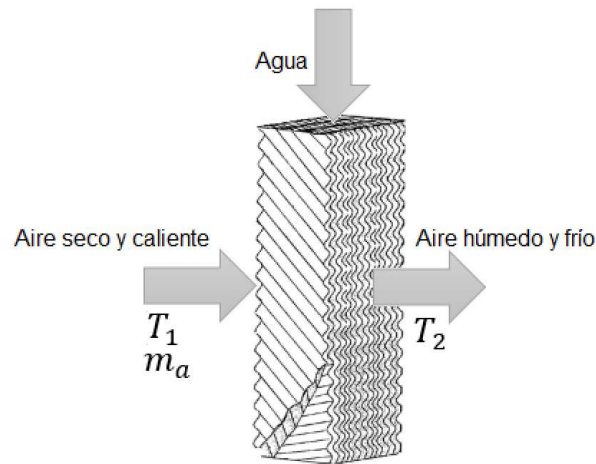


FIGURA 8. FLUJOS DE AIRE Y AGUA EN LOS PANELES DE CELULOSA CORRUGADA QUE CONFORMAN LA PARED HÚMEDA.

$$q = m_a c_p (T_1 - T_2) + m_a [W_1 (h_{v1} - h_{wb}) - W_2 (h_{v2} - h_{wb})] \quad \text{Ec. 3}$$

$$m_e = m_a (W_2 - W_1) \quad \text{Ec. 4}$$

Donde  $q$ : flujo de calor transferido en  $W$ ,  $m_e$ : el flujo de agua evaporada en  $kg/h$ ,  $c_p$ : calor específico de aire seco en  $kJ/kg^\circ C$ ,  $T_1$ : temperatura de aire entrante en  $^\circ C$ ,  $T_2$ : temperatura de aire saliente de la pared húmeda en  $^\circ C$ ,  $h_{v1}$  y  $h_{v2}$ : entalpías de vapor saturado en la entrada y salida de la pared húmeda, respectivamente en  $kJ/kg$ ,  $h_{wb}$ : entalpía de vapor de saturación de agua a la temperatura de bulbo húmedo del aire entrante ( $T_{wb}$ ) en  $kJ/kg$ ,  $m_a$ : flujo másico de aire entrante en  $kg/h$  el cual puede expresarse como  $m_a = \rho_a Q_a$ , donde  $\rho_a$  es la densidad del aire en  $kg/m^3$  y  $Q_a$  es el flujo de aire a través de la pared en  $m^3/h$ ,  $W_1$  y  $W_2$  son las humedades absolutas del aire a la entrada y salida de la pared, respectivamente en  $kg_w/kg_a$ .



La temperatura de salida,  $T_2$ , puede ser calculada en función de los parámetros que describen el aire húmedo, ecuación 5, en este análisis del balance de energía en la pared húmeda es importante identificar que  $T_2$  es la temperatura inicial del aire al recorrer el invernadero.

$$T_2 = T_1 - \frac{q - m_a[W_1(h_{v1} - h_{wb}) + W_2(h_{v2} - h_{wb})]}{m_a c_p} \quad \text{Ec. 5}$$

Una forma alternativa de expresar el flujo de calor transferido,  $q$ , y el flujo de agua evaporada,  $m_e$ , respectivamente, es usar el producto del coeficiente de transferencia de calor y la diferencia logarítmica media de temperatura ( $\Delta T$ ), y el producto del coeficiente de transferencia de masa y la diferencia logarítmica media en la densidad del vapor de agua ( $\Delta \rho_v$ ), en  $kg/m^3$ . Considerando lo anterior, las ecuaciones 3 y 4 se pueden expresar como:

$$q = h_H A_S \Delta T \quad \text{Ec. 6}$$

$$m_e = h_M A_S \Delta \rho_v \quad \text{Ec. 7}$$

Donde  $h_H$ : coeficiente de transferencia de calor en  $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ,  $h_M$ : coeficiente de transferencia de masa en  $m/s$ ,  $A_S$ : superficie de contacto del material en  $m^2$ . La diferencia media logarítmica de temperatura,  $\Delta T$ , y la densidad de vapor de agua,  $\Delta \rho_v$ , pueden expresarse como:

$$\Delta T = \frac{(T_2 - T_1)}{\ln\left(\frac{T_2 - T_{wb}}{T_1 - T_{wb}}\right)} \quad \text{Ec. 8}$$

$$\Delta \rho_v = \frac{(\rho_{v2} - \rho_{v1})}{\ln\left(\frac{\rho_{v1} - \rho_{wb}}{\rho_{v2} - \rho_{wb}}\right)} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde  $\rho_{v1}$  y  $\rho_{v2}$  son las densidades de vapor de agua de entrada y salida en la pared en  $kg/m^3$ , y  $\rho_{wb}$  es la densidad de vapor de agua en saturación a temperatura de bulbo húmedo en  $kg/m^3$ .

### 3.1.1 Eficiencia de saturación de aire en la pared húmeda.

Para determinar el rendimiento de una pared húmeda se utiliza la eficiencia de saturación, ecuación 10, esta ecuación se utiliza para medir la capacidad de saturación de aire de la pared húmeda. Está definida como la relación entre la diferencia de temperaturas de bulbo seco a la entrada y salida de la pared húmeda y la diferencia máxima de temperaturas que puede ocurrir cuando el aire estuviera completamente saturado:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_{wb}} \quad \text{Ec. 10}$$

El consumo específico de agua,  $C_w$ , de los materiales puede expresarse como el flujo másico de agua evaporada,  $m_e$ , por unidad de superficie expuesta,  $A_f$ , multiplicada por la diferencia de temperaturas que pueden lograrse para condiciones de aire dadas en la pared húmeda:

$$C_w = \frac{m_e}{A_f(T_1 - T_2)} \quad \text{Ec. 11}$$

Al sustituir la ecuación 10 en la 11, el consumo de agua del material depende de la velocidad de aire al atravesarlo, de la eficiencia de saturación del material y la temperatura de entrada.

$$C_w = \frac{m_e}{A_f \eta (T_1 - T_{wb})}$$

### 3.2 Balance de energía en el invernadero durante la acumulación de calor en el aire.

La radiación solar incrementa la temperatura del flujo de aire después de salir de la pared húmeda,  $T_2$ , hasta su salida por los extractores de aire en la cara opuesta del invernadero. En el balance básico de un invernadero, ecuación 12, se

debe considerar la acumulación de calor,  $\dot{Q}_{acum}$ , y la única ganancia de calor será la radiación solar.

$$\dot{Q}_{acum} = \dot{Q}_{ganado} - \dot{Q}_{perdido} \quad \text{Ec. 12}$$

$$\dot{Q}_{accum} = \dot{m}C_p\Delta T \quad \text{Ec. 13}$$

Así mismo, el calor acumulado en el aire dentro del invernadero se determina por medio de la ecuación 13, (Kittas et al 2001). Las pérdidas de calor se presentan como 1) pérdida de calor sensible a través de la cubierta plástica, 2) pérdida de calor por radiación a través del suelo y 3) pérdida de calor por transpiración de las plantas. Considerando lo anterior, la tasa de calor acumulado puede analizarse como un incremento diferencial de temperatura en la dirección del flujo de aire a lo largo el invernadero desde la pared húmeda hasta los extractores mediante la expresión:

$$\frac{dT_{in}}{dx} = \frac{1}{\dot{m}C_p} [\tau(1 - \alpha)R_o w_{inv} - K_c [T_{in} - T_{amb}] L_{cub}] \quad \text{Ec. 14}$$

Donde  $dT_{in}$ : incremento diferencial de temperatura de aire en  $^{\circ}\text{C}$ ;  $dx$ : incremento diferencial de la distancia recorrida por el flujo de aire en  $m$ ;  $\dot{m}$ : flujo másico de aire generado durante la operación de los extractores en  $kg/s$ ;  $C_p$ : capacidad calorífica de aire en  $J/kg^{\circ}\text{C}$ ;  $R_o$ : radiación solar exterior en  $W/m^2$ ;  $\tau$ : coeficiente de transmisividad de la cubierta;  $\alpha$ : coeficiente de pérdidas por transpiración de las plantas y radiación hacia el suelo,  $w_{inv}$ : ancho de invernadero en  $m$ ,  $K_c$ : coeficiente global de transferencia de calor en la cubierta en  $W/m^2^{\circ}\text{C}$ ;  $[T_{in} - T_{amb}]$ : diferencia de temperatura entre el aire interior y el ambiente en  $^{\circ}\text{C}$ ;  $L_{cub}$ : longitud de la cubierta proporcional al ancho del invernadero para obtener el área diferencial de transferencia de calor.

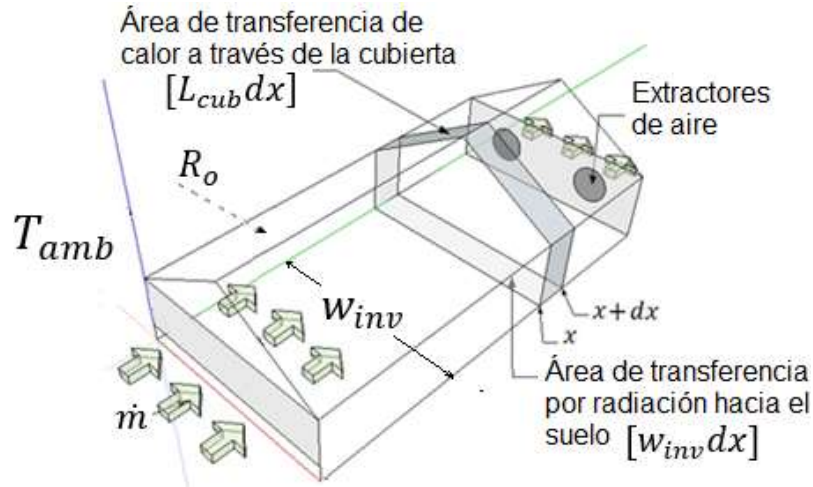


FIGURA 9. ESQUEMA ISOMÉTRICO DE INVERNADERO UTILIZADO EN LA MODELACIÓN MATEMÁTICA.

La ecuación 14 es de tipo diferencial ordinaria cuya forma general se expresa como:

$$\frac{dT_{in}}{dx} + C_2 T_{in} - C_1 = 0 \quad \text{Ec. 15}$$

Donde;

$$C_1 = \frac{\tau(1-\alpha)R_o w_{gh} + K_c L_{cov} T_o}{\dot{m} C_p}, \quad C_2 = \frac{K_c L_{cov}}{\dot{m} C_p}$$

Se resuelve utilizando el factor de integración exponencial  $e^{C_2 x}$ . La solución es:

$$T_{in}(x) = \frac{C_1}{C_2} + C_3 e^{-C_2 x} \quad \text{Ec. 16}$$

La temperatura inicial de aire corresponde a la temperatura de enfriamiento de la pared húmeda,  $T_2$ , en  $^{\circ}\text{C}$ , pero se incrementa en su trayectoria debido a la radiación solar (esta temperatura puede ser calculada con la ecuación 5). Por ello, la condición de frontera es  $T_{in}|_{x=0} = T_2$ . Por lo tanto, la constante  $C_3$  será:

$$C_3 = T_2 - \frac{C_1}{C_2}$$

El flujo de aire,  $\dot{m}$ , está dado por  $\dot{m} = \dot{V}\rho$ , donde la tasa de ventilación  $\dot{V}$  está en  $m^3/s$  y la densidad de aire  $\rho$  en  $kg/m^3$ , por todo lo anterior el perfil de temperatura de aire está dado por:

$$T_{in}(x) = \left[ T_{amb} + \frac{\tau(1-\alpha)R_o w_{inv}}{K_c L_{cub}} \right] \left[ 1 - e^{-\left(\frac{K_c L_{cub}}{\dot{V}\rho C_p}\right)[x]} \right] + T_2 e^{-\left(\frac{K_c L_{cub}}{\dot{V}\rho C_p}\right)[x]} \quad \text{Ec. 17}$$

El modelo de estado estacionario obtenido en la ecuación anterior describe, además de los perfiles de temperatura, las tasas de ventilación del invernadero. De acuerdo con la solución obtenida, cuando el valor de la tasa de ventilación ( $\dot{V}$ ) se aproxima a cero, el valor de la función exponencial, evaluada en  $-C_2x$ , es cero. y el modelo se simplifica a la expresión siguiente:

$$T = T_{amb} + \frac{\tau(1-\alpha)R_o w_{inv}}{K_c L_{cub}} \quad \text{Ec. 18}$$

En esta expresión no existe una distribución espacial de la temperatura del aire, debido a que no tiene movimiento porque  $\dot{V}$  tiende a cero, esta es una simulación de que los extractores están apagados y no hay enfriamiento. Por lo tanto,  $T$  es la temperatura en todos los puntos del espacio al interior del invernadero. Con la ecuación 18 se puede obtener la temperatura máxima de un invernadero cerrado sin ventilación y la solución del modelo es físicamente correcta.

El término  $x$  de la ecuación 17, representa la posición del flujo de aire respecto a la pared húmeda, sin embargo, debido a que la función exponencial  $e^{-\left(\frac{K_c L_{cub}}{\dot{V}\rho C_p}\right)[x]}$  genera una asíntota, se espera que el modelo matemático no sea aplicable a invernaderos de grandes longitudes donde la temperatura sería constante.

### 3.3 Balance de energía en el extractor de aire.

La tasa de ventilación,  $\dot{V}$ , es un resultado del modelo matemático de la ecuación 17, y corresponde al caudal de aire de los extractores de aire del invernadero. El modelo energético de los extractores de aire debe ser desarrollado para relacionarlo con los modelos energéticos del invernadero y pared húmeda.

A partir de la ecuación generalizada de Bernoulli, la energía mecánica del aire en un punto p se presenta en forma de presión y energía cinética (en el aire se desprecia la energía potencial) (Wan, 2009). En flujos de aire, la energía mecánica empleada habitualmente es la presión total en  $P_a$ , ecuación 19. A su vez la potencia (energía por unidad de tiempo, en  $W$ ) del flujo en un punto p viene dada por la ecuación 20, donde la presión total está relacionada con la potencia específica como  $p_T = \rho\omega_{esp}$ .

$$p_T = p_E + \frac{1}{2}\rho v_p^2 = p_E + p_D \quad \text{Ec. 19}$$

$$P = \dot{m}\omega_{esp} = Qp_T \quad \text{Ec. 20}$$

El incremento de energía específica útil en  $m^2/s^2$  que el extractor produce sobre el aire es igual al incremento de la presión total:

$$\omega_{esp} = \frac{p_{T,s} - p_{T,e}}{\rho} \quad \text{Ec. 21}$$

Por lo tanto, la potencia (en  $W$ ) suministrada al flujo de aire, se muestra en la ecuación 22 y el diagrama de energías del extractor se representa en la figura 10.

$$P_{aire} = \dot{m}\omega_{esp} = p_{T,s} - p_{T,e} \quad \text{Ec. 22}$$

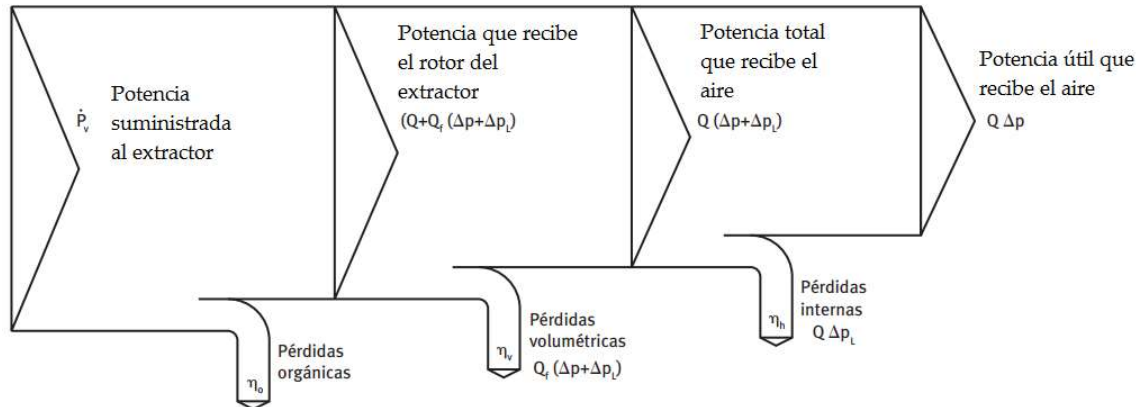


FIGURA 10. DIAGRAMA DE ENERGÍAS DEL EXTRACTOR.

### 3.4 Cálculos del diseño y evaluación de sistemas fotovoltaicos.

Los resultados de las tasas de ventilación de la ecuación 17 representan los caudales de los extractores de aire, la energía eléctrica utilizada por ellos está dada por la multiplicación de su potencia eléctrica por las horas de funcionamiento. Después de definir esta cantidad de energía requerida,  $E_{tot}$ , se procede al diseño del sistema fotovoltaico, se utiliza la ecuación 23 para calcular el número de paneles solares (Romantchick, 2014). Donde  $F_s$ : factor de sobredimensionamiento,  $P_{panel}$ : potencia eléctrica del panel solar en  $W$ ,  $R_T$ : rendimiento térmico (85 - 90%), HSP: horas solar pico,  $\eta_{ec}$ : eficiencia de los conductores eléctricos,  $\eta_{cc}$ : eficiencia del controlador de carga,  $\eta_i$ : eficiencia del inversor y  $\eta_b$ : eficiencia de las baterías.

$$N_{sp} = \frac{(1+F_s) E_{tot}}{P_{panel} R_T PSH \eta_{ec} \eta_{cc} \eta_i \eta_b} \quad \text{Ec. 23}$$

$$E_{prod} = N_{sp} P_{sp} R_T PSH \quad \text{Ec. 24}$$

$$E_{accu} = \frac{F_s [N_D E_{tot}]}{D_d} \quad \text{Ec. 25}$$

$$N_{cc} = \frac{F_{cc} I_{sc} N_{sp}}{I_{reg}} \quad \text{Ec. 26}$$

$$I_{inv} \geq 1.25 * \left( \frac{P_{inv}}{V_{min} * \eta_{inv}} \right) \quad \text{Ec. 27}$$

La energía producida por el conjunto de paneles solares,  $E_{prod}$  (en  $kWh$ ), se obtiene con la ecuación 24. La ecuación 25 calcula la energía,  $E_{accu}$ , que será almacenada en las baterías, donde  $F_s$ : factor de seguridad,  $N_D$ : días de autonomía,  $D_d$ : profundidad de descarga. Con la ecuación 26 se calcula el número de los controladores de carga,  $N_{cc}$ , donde  $F_{cc}$ : factor de seguridad,  $I_{sc}$ : corriente de corto circuito de cada panel en *amperes A*,  $I_{reg}$ : corriente del controlador de carga. La potencia del inversor será proporcional a la potencia instalada de paneles fotovoltaicos. La ecuación 27 es utilizada para el cálculo de la corriente de los paneles solares al inversor,  $I_{inv}$  en *A*, donde  $P_{inv}$ : potencia de inversor en *kW*,  $V_{min}$ : voltaje de operación del inversor en *V* (volts) y  $\eta_{inv}$ : eficiencia del inversor.

Después de realizar la selección de los componentes del sistema fotovoltaico y de llevar a cabo la instalación fotovoltaica en el sitio, se procede a realizar la evaluación energética de la instalación durante el funcionamiento de los paneles fotovoltaicos. Para ello se utilizan los indicadores de eficiencia energética y eficiencia exérgica mostrados a continuación:

### 3.4.1 Eficiencia energética.

La eficiencia energética (Peng, 2017) del sistema fotovoltaico es la relación entre la energía eléctrica producida por el arreglo de paneles fotovoltaicos y la energía en forma de radiación que incide sobre ellos en el mismo momento:

$$\eta_{SFV} = \frac{I_{max} * V_{max}}{R_o A} \quad \text{Ec. 28}$$

Donde  $I_{max}$ : es la corriente eléctrica producida por el arreglo fotovoltaico y medida durante su funcionamiento en *A*,  $V_{max}$ : es el voltaje del arreglo fotovoltaico en *V*,  $S_T$ :



es la radiación solar instantánea en  $W/m^2$ ,  $A$ : área de captación de los paneles solares en  $m^2$ .

### 3.4.2 Eficiencia exergética.

Los métodos de cálculo de exergía (Akyus, 2012 y Joshi, 2009) se basan también en la expresión de eficiencia fundamental, la cual es la relación entre los parámetros de entrada y salida de cualquier sistema. En este caso, la eficiencia exergética en su forma general del sistema fotovoltaico, está dada por la ecuación 29.

$$\Psi = \frac{\dot{E}x_{sal}}{\dot{E}x_{ent}} = \frac{\dot{E}x_{SFV}}{\dot{E}x_{solar}} \quad \text{Ec. 29}$$

Donde  $\dot{E}x_{SFV}$ , es la exergía total del sistema fotovoltaico, principalmente de la potencia de salida de este sistema, considerando la exergía destruida. Por ello, la exergía de la energía eléctrica se define como:

$$\dot{E}x_{elect} = V_{max}I_{max} \quad \text{Ec. 30}$$

Donde  $V_{max}$  e  $I_{max}$  representan el voltaje y la corriente de operación del sistema fotovoltaico. Para el cálculo de  $\dot{E}x_{SFV}$ , se considera que ocurre exergía térmica debido al calor ganado durante la producción de electricidad en los paneles solares. Esta exergía térmica del sistema,  $\dot{E}x_{term}$ , consiste en las pérdidas de calor en la superficie del panel solar hacia el ambiente y se define como:

$$\dot{E}x_{term} = \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{celda}}\right) \dot{Q} \quad \text{Ec. 31}$$

Donde  $T_{amb}$ : temperatura ambiental de aire,  $T_{celda}$ : temperatura de la celda en el panel solar en  $^{\circ}C$ ,  $\dot{Q}$ : energía térmica disponible (en  $W$ ) y está definida como:  $\dot{Q} = h_{ca}A(T_{celda} - T_{amb})$ . Donde  $A$  representa la superficie efectiva de captación de radiación solar en los paneles fotovoltaicos en  $m^2$ ,  $h_{ca}$ : es el coeficiente de transferencia de calor y radiación desde la celda hacia el ambiente, el cual puede

calcularse considerando la velocidad de viento ( $v$ ), densidad del aire y condiciones ambientales,  $h_{ca} = 5.7 + 3.8v$ . Se debe considerar que parte térmica se resta de la tasa de exergía eléctrica mientras se calcula la exergía total del SFV, debido a que no es deseable la ganancia de calor en las celdas solares ya que disminuyen la eficiencia del panel fotovoltaico. Por ello,  $\dot{E}x_{SFV}$  puede obtenerse mediante:  $\dot{E}x_{SFV} = \dot{E}x_{elec} - \dot{E}x_{term}$

$$\dot{E}x_{SFV} = V_{max}I_{max} - \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{celda}}\right) h_{ca}A(T_{celda} - T_{amb}) \quad \text{Ec. 32}$$

En la ecuación 29,  $\dot{E}x_{solar}$  representa la fuente de exergía a partir de la radiación solar. La radiación solar determina las intensidades de corriente y voltaje del sistema fotovoltaico. Por lo tanto  $\dot{E}x_{solar}$ , depende directamente de la intensidad de la radiación solar y la superficie de captación de los paneles fotovoltaicos, se determina por la ecuación siguiente:

$$\dot{E}x_{solar} = \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{sol}}\right) R_o A \quad \text{Ec. 33}$$

Donde  $T_{sol}$ : temperatura efectiva del Sol (5777 K, según Holmberg 2006),  $R_o$ : irradiancia solar medida por hora durante el día en  $W/m^2$ . La expresión desarrollada que integra las ecuaciones de este modelo exergético es:

$$\Psi_{SFV} = \frac{V_{max}I_{max} - \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{celda}}\right) h_{ca}A(T_{celda} - T_{amb})}{\left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{sol}}\right) R_o A} \quad \text{Ec. 34}$$

## **CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.**

Para realizar la evaluación metodológica de la selección de los sistemas fotovoltaicos se debe estudiar experimentalmente los modelos de balances de energía teóricos analizados en el capítulo 3, para ello se realizaron tres instrumentaciones en un invernadero (la pared húmeda, el invernadero en su dirección longitudinal del flujo de aire y el extractor de aire). Posteriormente a los estudios teóricos y experimentales en un invernadero, se utilizó un secador solar de productos agrícolas, que cumple con características de operación similares a un invernadero con la finalidad de validar los resultados de los estudios en los invernaderos.

### **4.1 Instrumentación y adquisición de variables climáticas reales.**

Se desarrolló la instrumentación de un invernadero experimental (figura 11) con las siguientes características:

**CUADRO 3. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL INVERNADERO EXPERIMENTAL.**

Ubicación	Texcoco, México. 19.30°N, 98.53°W
Superficie	300 m <sup>2</sup>
Volumen	1125 m <sup>3</sup>
Dimensiones	Ancho 10 m, longitud: 30 m Altura máxima: 5 m.
Material de Cubierta	Polietileno con 8 meses de uso.
Material de pared húm.	Paneles de celulosa corrugada
Superficie	16 m <sup>2</sup>
Extractores	2
Potencia	1.5 hp



FIGURA 11. INVERNADERO EXPERIMENTAL USADO PARA INSTRUMENTACIÓN CON SENSORES DE VARIABLES CLIMÁTICAS.

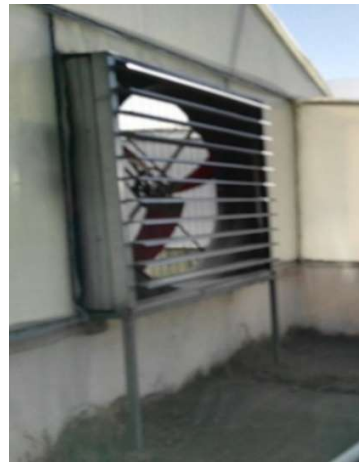


FIGURA 12. PARED HÚMEDA. (IZQUIERDA) Y EXTRACTOR DE AIRE (DERECHA).

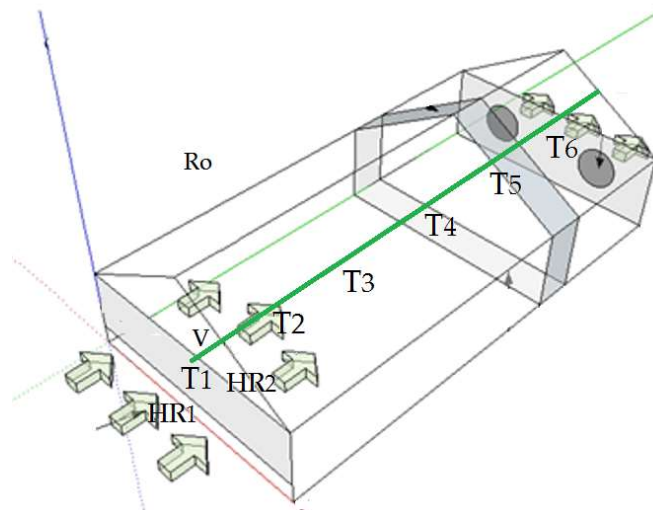


FIGURA 13. UBICACIÓN EN INVERNADERO DE SENSORES PARA EL REGISTRO DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS

Las variables medidas fueron: 1) Temperaturas de aire interior y exterior, 2) Humedad relativa, 3) Radiación solar exterior, 4) Velocidad de aire. Se utilizó un Datalogger marca Campbell Scientific Modelo CR1000. El periodo de medición fue del 7 a 27 junio de 2014. Se instalaron los siguientes sensores: cinco sensores de temperatura *T108 Betatherm* ( $\pm 0.1$  °C), dos sensores de temperatura y humedad relativa *HMP50 Vaisala* ( $\pm 0.4$  °C,  $\pm 0.1\%$  respectivamente), un anemómetro *03101-L Wind Sentry* ( $\pm 0.5$  m/s) un piranómetro *CMP3 Kipp & Zonen* (sensibilidad  $10 \mu\text{V/W/m}^2$ ). Los sensores fueron protegidos de la radiación directa. Se obtuvieron seis temperaturas a lo largo del invernadero a 2.5m de altura sobre el nivel del suelo con un espaciamiento de seis metros, figura 13. Velocidad de aire y temperatura a 0.5 m de la pared húmeda. Se programó el registro de los datos mediante el software *LoggerNet Campbell Scientific* cada 5 minutos.

#### **4.2 Estudio experimental en la pared húmeda.**

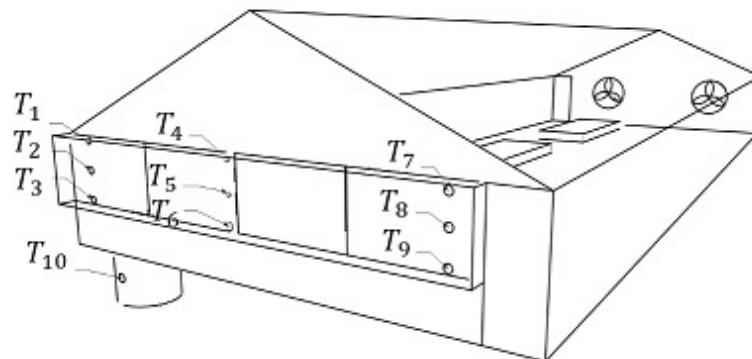
Con el objetivo de caracterizar el comportamiento térmico del aire en la pared húmeda y determinar experimentalmente las temperaturas de enfriamiento del proceso de saturación adiabática, se desarrolló el estudio experimental siguiente, para analizar experimentalmente y teóricamente la distribución de temperaturas de fluidos en la pared húmeda.

Descripción general del sistema de enfriamiento: La pared húmeda del invernadero experimental funciona con un sistema de presión negativa, donde los ventiladores funcionan como extractores y se sitúan en la cara opuesta a la pared húmeda, succionando el aire a través de ésta y del invernadero. La pared húmeda está compuesta por paneles de celulosa corrugada de 0.15 m de espesor, tiene una superficie total perpendicular al paso del aire de  $16 \text{ m}^2$ . El criterio previo a la experimentación fue conseguir la uniformidad de humedad en la pared, para ello se sustituyó la tubería de distribución de agua de suministro ya que la anterior presentaba zonas obstruidas por suciedad. Así mismo se aseguró el correcto funcionamiento eléctrico de los ventiladores de extracción de aire, los cuales

constan de 3 álabes con un diámetro de 1m y tienen una potencia de 1.125 kW. Se utilizó una bomba para la recirculación del agua en el circuito hidráulico de 0.375 kW y 120 V para bombear el agua hacia la pared a través de la tubería de distribución, el flujo másico de la bomba es de 20 l/min.

La velocidad del aire en la parte frontal de la pared húmeda es constante de 1.52 m/s. El volumen del tanque de agua de suministro es de 450 l. Los ventiladores operan de forma intermitente y están regulados por la temperatura de los termostatos fijada en 25 °C, es decir, cuando la temperatura del aire en el invernadero sobrepasa ese nivel, se accionan los ventiladores para renovar el aire interior.

Medición de temperaturas de agua en la pared húmeda: Se realizó una instrumentación específica para este análisis. Se instalaron nueve termómetros en la pared y uno en el tanque de suministro. En la figura 14 se muestran las tres posiciones a lo largo de la pared y tres posiciones con diferencia de altura:



**FIGURA 14. UBICACIÓN DE LOS SENSORES PARA DETERMINAR LOS GRADIENTES DE TEMPERATURA DE AGUA EN LA PARED HÚMEDA.**

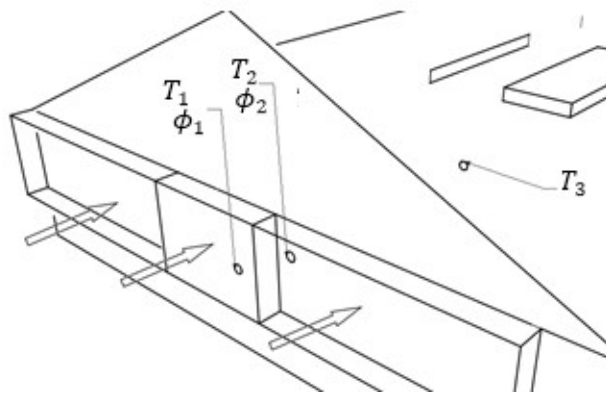


FIGURA 15. UBICACIÓN DE LOS SENSORES PARA MEDICIÓN DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA DE AIRE.

#### 4.2.1 Gradientes de temperatura de agua en el tanque de suministro por superficie de pared húmeda y por unidad de tiempo.

El gradiente de temperatura del agua  $dT_w$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) en el tanque de suministro al iniciar la operación del sistema de enfriamiento (9:00 hrs) y al finalizar (18:00 hrs) por cada metro cuadrado instalado de pared húmeda,  $dA$  ( $\text{m}^2$ ) perpendicular al paso del aire se representa por  $\frac{dT_w}{dA}$ .

El gradiente de temperatura de agua,  $dT_w$ , en el tanque por cada hora ( $dt$ ) de funcionamiento del sistema de enfriamiento se expresa como  $\frac{dT_w}{dt}$ .

#### 4.2.2 Gradiente de temperatura de agua por diferencia de altura en la pared húmeda.

Se refiere a la diferencia de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) de agua por cada metro lineal que desciende el flujo de agua en la pared y se representa por  $\frac{dT}{dh}$ . Donde  $dT$ : diferencia de temperatura de agua,  $dh$ : disminución en la altura del agua en la pared. El arreglo de instalación de los sensores para medir la temperatura del agua en la pared permite obtener el valor promedio de tres mediciones distintas, ecuaciones 33 a 35:

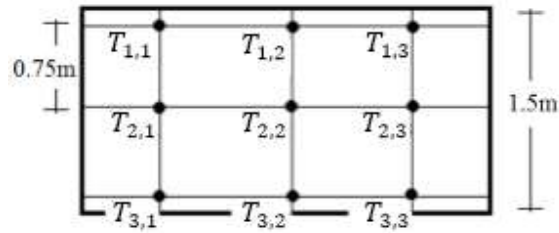


FIGURA 16. ESQUEMA DE MEDICIÓN DE TEMPERATURAS DE AGUA MEDIDAS POR DIFERENCIA DE ALTURA.

$$T_1 = 1/3 (T_{1,1} + T_{1,2} + T_{1,3}) \quad \text{Ec. 33}$$

$$T_2 = 1/3 (T_{2,1} + T_{2,2} + T_{2,3}) \quad \text{Ec. 34}$$

$$T_3 = 1/3 (T_{3,1} + T_{3,2} + T_{3,3}) \quad \text{Ec. 35}$$

Comparando las diferencias de temperaturas  $(T_3 - T_2)$ ,  $(T_2 - T_1)$  y  $(T_3 - T_1)$  se puede obtener un gradiente de temperatura por metro lineal más exacto. Dividiendo estos valores entre su diferencia de altura correspondiente se obtiene el gradiente de temperatura por metro lineal de pared húmeda:

$$(T_3 - T_2) \frac{1}{0.75} = dT_1 \quad \text{Ec. 36}$$

$$(T_2 - T_1) \frac{1}{0.75} = dT_2 \quad \text{Ec. 37}$$

$$(T_3 - T_1) \frac{1}{1.5} = dT_3 \quad \text{Ec. 38}$$

#### 4.3 Estudio experimental en el invernadero.

El modelo matemático de distribución espacial de la temperatura interior del invernadero de la ecuación 17 que fue desarrollado en el apartado 3.2 no incluye factores como nubosidad parcial, lluvia y velocidad del viento exterior y estos representan fuentes de errores aleatorios que generan incertidumbre en las



mediciones no reproducibles. Para obtener resultados más realistas, se seleccionó el día que presentó los efectos negativos más bajos por nubes y generó el mejor perfil parabólico de radiación solar para el período del 7 al 27 de junio de 2014 (corresponde al 19 de junio). De esta manera, las condiciones externas se representan mediante las variables siguientes y su incertidumbre solo se asocia a la precisión de los sensores: radiación solar (sensibilidad  $10 \mu V/Wm^2$  que varía menos del 5% de  $-10 \text{ }^\circ C$  a  $+40 \text{ }^\circ C$ , temperatura ambiente ( $\pm 0.1 \text{ }^\circ C$ ), temperatura del bulbo húmedo ( $\pm 0,4 \text{ }^\circ C$ ) y humedad relativa ( $\pm 0,1\%$ ). Estas variables determinan la temperatura de enfriamiento del aire exterior en la pared húmeda y cuyo análisis anterior fue realizado.

La medición de la variable de entrada del modelo matemático de distribución de temperaturas en el invernadero que tiene mayor índice de dificultad para su medición experimental es el coeficiente de transferencia de calor a través de la cubierta plástica, representa los factores que no están incluidos en el modelo matemático y no pueden predecirse. Su valor depende del tipo de material de cubierta, la rigidez del invernadero, la velocidad del viento externo, la cantidad de nubes que cubre el cielo y la precipitación (Feuilleley, 1996). La calibración del modelo se realiza mediante la determinación del coeficiente de transferencia de calor en la cubierta,  $K_c$ , cuando se usan los datos experimentales como variables de entrada fijas del modelo.

Una vez terminada la calibración se procede a simular las temperaturas de un invernadero hermético sin funcionamiento de pared húmeda ( $\dot{V} \rightarrow 0$ ), después las tasas de ventilación que representan el caudal de aire de los extractores y finalmente la energía requerida por los ventiladores.

#### **4.4 Estudio experimental en el extractor de aire.**

La cantidad de flujo de aire que atraviesa la pared húmeda es la misma que es extraída por los extractores en la cara opuesta. Se realizó un análisis experimental basado en la obtención de los perfiles de velocidad promedio a la entrada y salida

del flujo de aire en el extractor. Utilizando una metodología general para el cálculo del potencial energético de la energía eólica. Dicha metodología consiste en definir la velocidad de aire promedio y la densidad del mismo. Las características eléctricas de operación de los extractores de aire son: voltaje de operación de 220 V, corriente de operación de 6 A, que operan con un flujo de descarga de 24,500 m<sup>3</sup>/h.

Se realizaron mediciones de velocidad de aire en un invernadero de 300 m<sup>2</sup> empleando un anemómetro de veletas marca Cole Parmer Instrument Co. Todas las mediciones se realizaron a una distancia fija de 1.80 m de la salida o descarga del extractor de aire y se obtuvo un perfil de velocidades respecto al radio del extractor. La distancia de 1.80 m es la recomendada como distancia mínima libre de obstrucciones para extractores por los fabricantes de equipos de ventilación, según el diámetro del extractor que en este caso es de 1.2 m.

Para la obtención de la densidad de aire se utilizó la ecuación que contempla los efectos de temperatura para su corrección (ecuación 39), donde  $z$  es la altura del sitio sobre el nivel del mar en metros, y  $T$  es la temperatura ambiente promedio en grados centígrados.

$$\rho = 1.225 \exp \left\{ \frac{-z}{8435} - \frac{(T-15)}{288} \right\} \quad \text{Ec. 39}$$

#### **4.5 Modo de funcionamiento del sistema fotovoltaico híbrido en invernadero.**

El análisis experimental de la pared húmeda, el invernadero, y los extractores de aire permite obtener como resultado principal, el caudal de aire de los extractores. Después de seleccionar el número de ellos y su potencia, se procede a utilizar el parámetro inicial,  $E_{req}$ , para dimensionar y seleccionar los componentes del sistema fotovoltaico. El diagrama de bloques general del sistema fotovoltaico que se obtiene se muestra en la figura 17. La selección del número de componentes y su potencia eléctrica se obtiene de las ecuaciones de cálculo del apartado 3.4. La ventaja del sistema híbrido es que la energía solar puede ser aprovechada en el momento que se necesite o almacenarla en el banco de baterías para la conversión de la tensión de CA. El usuario ya no tiene que depender de la red eléctrica. El sol

puede proporcionar toda la electricidad necesaria. Aun cuando la corriente de la red eléctrica esté disponible, la fuente principal de energía seguirá siendo la energía solar, la corriente de la red eléctrica completará sólo cuando sea necesario. Este tipo de diseño recorta el coste en electricidad y logra llegar al objetivo de conservación de la energía. La explicación del modo del funcionamiento de las fuentes de alimentación solar y red eléctrica se describe en la figura 18.

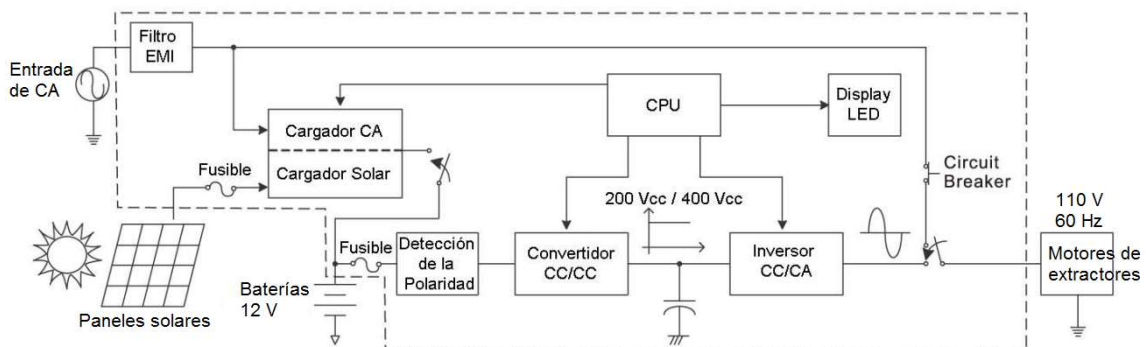


FIGURA 17. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO HÍBRIDO PARA EXTRACTORES DE INVERNADERO.

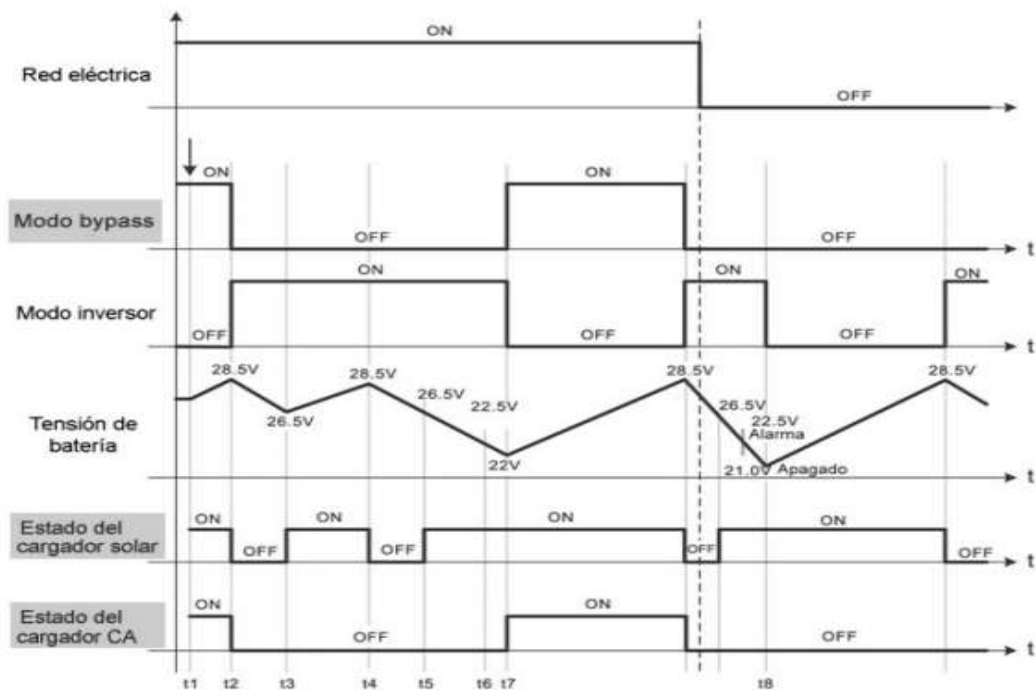


FIGURA 18. EXPLICACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SUMINISTRO DE ENERGÍA SOLAR - RED ELÉCTRICA.

En t1: Cuando el inversor se enciende, para asegurarse que las baterías están completamente cargadas, éste funciona en modo bypass, dejando pasar la CA de entrada a la salida, para alimentar las cargas conectadas. Mientras tanto activará ambos cargadores, el cargador solar y el cargador de CA para recargar las baterías.

t2: Cuando las baterías están cargadas ambos cargadores se apagan para evitar sobrecargar las baterías, lo que reduciría la vida de las mismas. Mientras tanto el sistema pasará a funcionar en modo Inversor suministrando la energía a la salida desde las baterías a través del inversor.

t3: Cuando las baterías se hayan descargado al 75 % de su capacidad se activará el cargador solar, pero no el cargador de CA. De esta forma se consigue un mayor ahorro de energía. Para que el cargador solar funcione siempre debe suministrar una intensidad superior a 3A.

t4: Si la energía suministrada por el panel solar es mayor que la que necesitan las cargas conectadas las baterías se irán recargando paulatinamente. Una vez recargadas el inversor solar se apagará para evitar sobrecargar las baterías.

t5: Cuando la capacidad de las baterías haya bajado del 75% el cargador solar se activará nuevamente.

t6: Si la energía suministrada por el panel solar es inferior a la consumida por las cargas conectadas al equipo la tensión de las baterías irá disminuyendo gradualmente hasta el 20% de su capacidad.

t7: Si la carga conectada al equipo no disminuye y está disponible la red eléctrica el equipo pasará a modo bypass. Las cargas conectadas se alimentarán de la CA de entrada. Si la corriente suministrada por el cargador solar es superior a 3A no se activará el cargador de CA, para ahorrar energía, y las baterías se recargarán con el cargador solar, alimentando las cargas desde la CA directamente.

t8: Si no hay red eléctrica de entrada y la capacidad de las baterías disminuye del 10% el sistema se apagará para evitar una descarga profunda de las baterías, lo que degradaría su capacidad.

## CAPÍTULO V. RESULTADOS

### 5.1 Resultados de la modelación del comportamiento térmico de la pared húmeda.

La experimentación al interior del invernadero se desarrolló bajo las siguientes condiciones de temperatura y humedad relativa exteriores a lo largo del día:

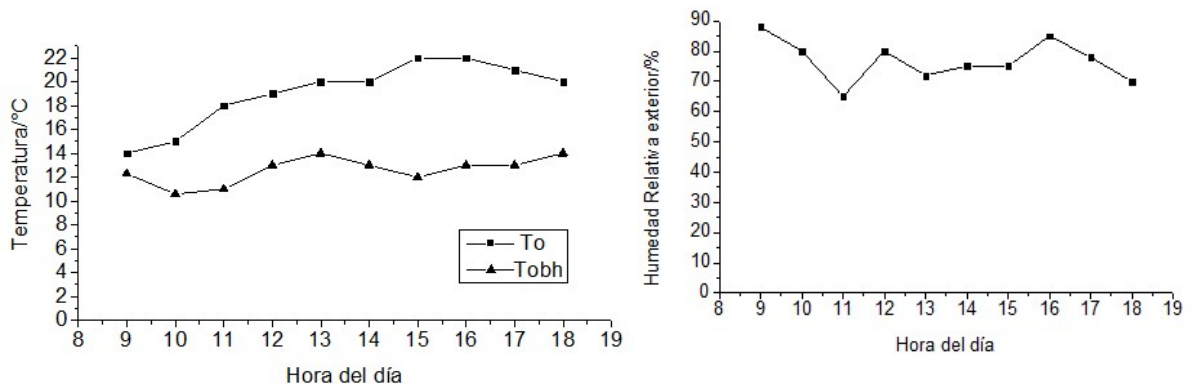


FIGURA 19. TEMPERATURAS DE BULBO SECO Y BULBO HÚMEDO (IZQUIERDA) Y HUMEDAD RELATIVA (DERECHA) DURANTE EL DÍA DE EXPERIMENTACIÓN.

#### 5.1.1 Gradientes de temperatura de agua en el tanque de suministro por superficie de pared húmeda $\frac{dT}{dA}$ y por unidad de tiempo $\frac{dT}{dt}$ .

La figura 20 muestra que el rango de la temperatura del aire enfriado por la pared húmeda es de 13-16 °C y se mantiene en promedio en 5.3 °C por debajo de la temperatura ambiente exterior. Sin embargo, la temperatura del agua en el tanque siempre continúa disminuyendo aproximadamente en 1 °C por cada hora de funcionamiento del sistema de enfriamiento en el invernadero. Lo anterior se debe a que, en la interacción energética del aire y el agua, ambos fluidos pierden calor en el proceso.

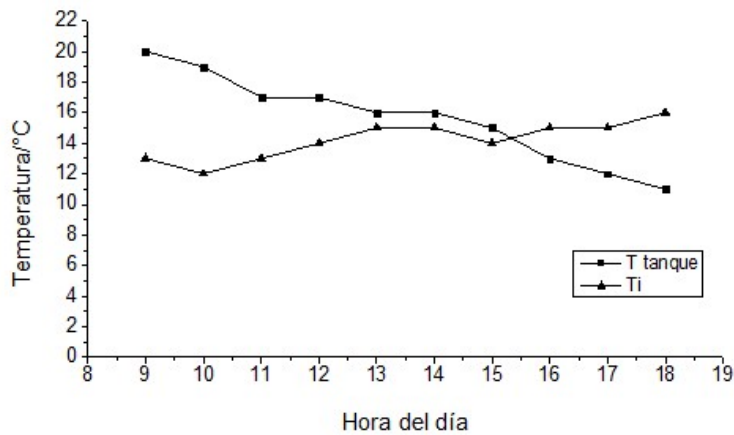


FIGURA 20. VARIACIÓN HORARIA DE LAS TEMPERATURAS DEL AGUA EN EL TANQUE Y DEL AIRE AL SALIR DE LA PARED HÚMEDA.

La superficie total instalada de pared húmeda perpendicular al paso del aire en esta experimentación fue de  $12 \text{ m}^2$ , y la disminución en la temperatura registrada del agua en el ciclo de trabajo fue de  $9 \text{ }^\circ\text{C}$ . Con ello se determinó que por cada metro cuadrado perpendicular al paso de aire en la pared húmeda se presenta una disminución de temperatura de  $0.75 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 5.1.2 Gradiente de temperatura de agua por diferencia de altura, $\frac{dT}{dh}$ , en la pared húmeda.

El arreglo de instalación de los sensores para medir la temperatura del agua en la pared permite obtener el valor promedio de tres mediciones distintas. Comparando las diferencias de temperaturas  $(T_3 - T_2)$ ,  $(T_2 - T_1)$  y  $(T_3 - T_1)$ , se puede obtener un gradiente de temperatura por metro lineal más exacto. Dividiendo estos valores entre su diferencia de altura correspondiente se obtiene el gradiente de temperatura por metro lineal de pared húmeda. Al promediar  $dT_1$ ,  $dT_2$  y  $dT_3$ , se determinó que la disminución de temperatura promedio del agua en la pared se presenta a razón de  $1.3 \text{ }^\circ\text{C}$  por metro de altura, es decir,  $\frac{dT}{dh} = -1.3 \frac{^\circ\text{C}}{\text{m}}$ .

### 5.1.3 Eficiencia de saturación de aire en la pared húmeda.

La temperatura mínima y límite que puede alcanzar el aire exterior al pasar a través de la pared húmeda es la temperatura de bulbo húmedo exterior, por lo tanto, la eficiencia de enfriamiento es la relación entre las diferencias de temperaturas  $(T_o - T_i)$  y  $(T_o - T_{obh})$ . Donde,  $T_o$  y  $T_i$  corresponden a las temperaturas de bulbo seco exterior e interior respectivamente y  $T_{obh}$  es la temperatura de bulbo húmedo exterior. La figura 21, muestra estos valores. Se puede observar que  $T_i$  no tiene nunca el mismo valor que  $T_{obh}$  en algún momento del día, es decir no se alcanza la temperatura de bulbo húmedo porque la eficiencia de la pared es menor al 100%.

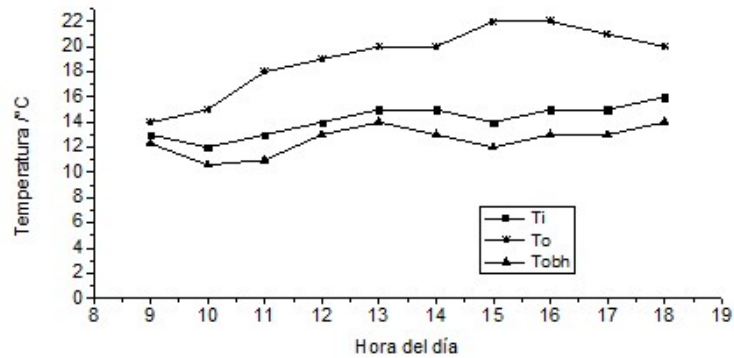
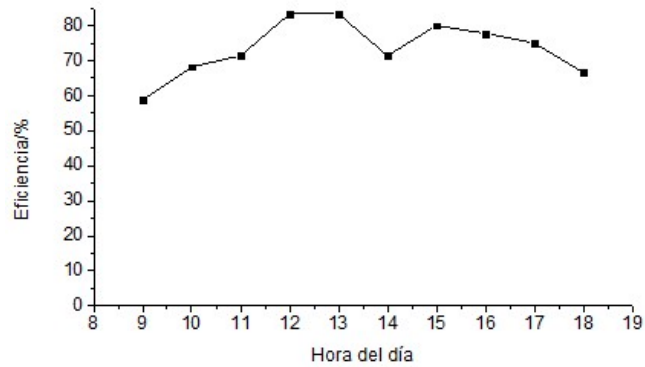


FIGURA 21. COMPARACIÓN DE TEMPERATURAS DE BULBO SECO ANTES Y DESPUÉS DE LA PARED HÚMEDA Y TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO EXTERIOR.

De la figura 22 se observa que los valores de eficiencia se encuentran en un rango de 67 a 83%, y el valor promedio a lo largo del día fue de 77%, con este parámetro de desempeño se resumen los gradientes de temperatura de agua obtenidos con datos experimentales de una pared húmeda en el cuadro 4:





**FIGURA 22. VARIACIÓN HORARIA DE LA EFICIENCIA DE LA PARED HÚMEDA.**

**CUADRO 4. RESUMEN DE RESULTADOS DE LOS GRADIENTES DE TEMPERATURA DE FLUIDOS EN LA PARED HÚMEDA.**

Gradiente de temperatura de agua en el tanque por superficie de pared húmeda	Gradiente de temperatura de agua en el tanque respecto al tiempo	Gradiente de temperatura de agua por diferencia de altura	Eficiencia promedio de la pared húmeda
$\frac{dT}{dA} = -0.75 \frac{^{\circ}C}{m^2}$	$\frac{dT}{dt} = -1 \frac{^{\circ}C}{hr}$	$\frac{dT}{dh} = -1.3 \frac{^{\circ}C}{m}$	77%

## 5.2 Resultados de la modelación del comportamiento térmico de aire en invernadero.

Las condiciones climáticas del día de experimentación seleccionado para desarrollar la modelación con datos experimentales se muestran en las figuras 23, 24 y 25.

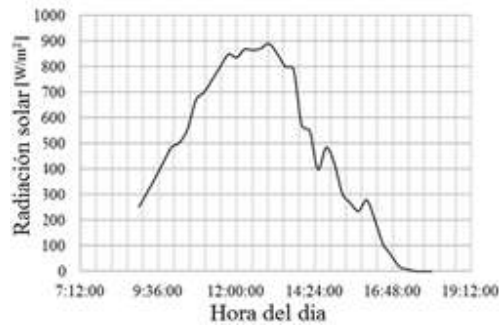


FIGURA 23. VARIACIÓN HORARIA DE LA RADIACIÓN SOLAR EL 19 DE JUNIO DE 2014.

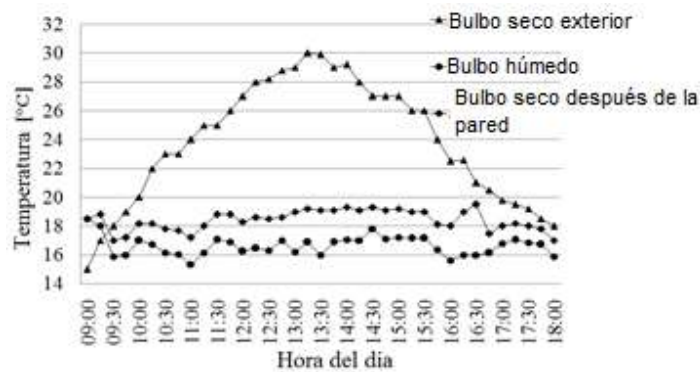


FIGURA 24. TEMPERATURAS DE OPERACIÓN DE PARED HÚMEDA PARA EXPERIMENTACIÓN EN INVERNADERO.



FIGURA 25. VARIACIÓN DE LA HUMEDAD RELATIVA EXTERIOR.

### 5.2.1 Coeficiente global de transferencia de calor en la cubierta.

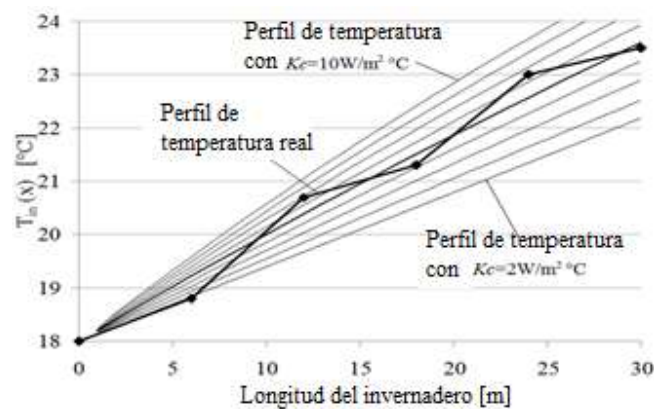
El modelo matemático se calibró usando datos experimentales de temperatura interior, valores máximos de radiación solar exterior, temperatura exterior, temperatura del aire enfriado por la pared húmeda y la tasa de ventilación actual de

los ventiladores instalados en el invernadero experimental. Los valores de  $\alpha$  y  $\tau$  utilizados en este estudio se establecieron de acuerdo con Baille (1994), cuadro 5.

**CUADRO 5. DATOS EXPERIMENTALES UTILIZADOS PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO DE TEMPERATURA.**

$R_o$	$890 \text{ W/m}^2$
$T_{ext}$	$30 \text{ }^\circ\text{C}$
$T_2$	$18 \text{ }^\circ\text{C}$
$\alpha, \tau$	0.50, 0.60
$\dot{V}$	$18 \text{ m/s}$

Roy et al (2002) demostraron que el coeficiente  $K_c$  puede variar de 2 a  $10 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$  para una cubierta con polietileno de doble capa dependiendo de las condiciones climáticas. Para determinarlo en esta experimentación, el perfil de temperatura del invernadero obtenido a partir de los datos experimentales se debe ajustar a una curva lineal, y comparar con los perfiles de temperatura generados por el modelo matemático con diferentes valores de  $K_c$ , figura 26.



**FIGURA 26. PERFIL LONGITUDINAL DE TEMPERATURA DE AIRE DE DATOS EXPERIMENTALES COMPARADO CON PERFILES DE TEMPERATURA DEL MODELO CUANDO VARÍA  $K_c$ .**

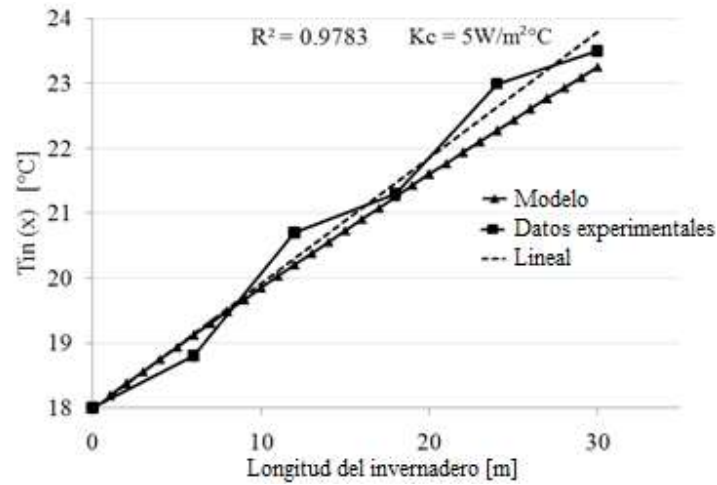


FIGURA 27. PERFIL LINEAL DE TEMPERATURA LONGITUDINAL COMPARADO CON TEMPERATURA DEL MODELO CUANDO  $K_c = 5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{°C})$ .

El aumento de la temperatura a lo largo del invernadero no es uniforme, por el contrario, sufre variaciones debido al flujo turbulento de aire. Una comparación de los perfiles de temperatura muestra que el coeficiente de determinación más alto fue  $R^2 = 0.9783$  y corresponde a  $K_c = 5 \text{ W}/\text{m}^2\text{°C}$ , de la figura 27. El manual técnico de ASABE (2008) sugiere que debido a la complejidad del cálculo del coeficiente  $K_c$ , se recomienda utilizar  $4 \text{ W}/\text{m}^2\text{°C}$  como valor de referencia para cubiertas con polietileno de doble capa. Por ello se considera que el valor obtenido de 5 con el modelo matemático es un nivel aceptable para la calibración.

### 5.2.2 Temperatura de invernadero hermético sin funcionamiento de pared húmeda.

El modelo matemático calibrado se simplificó para realizar una simulación de un invernadero hermético sin flujo de aire, de la ecuación 18:

$$T = T_{amb} + \frac{\tau(1 - \alpha)R_o w_{inv}}{K_c L_{cub}}$$

La temperatura máxima que se puede alcanzar dentro de un invernadero se logra bajo dos condiciones: 1) El invernadero está completamente cerrado y sellado.

2) El valor de la radiación solar es máximo. Para simular este escenario, el valor de la tasa de ventilación se aproximó a cero en el modelo matemático ( $V \rightarrow 0$ ) mientras la radiación solar variaba. Los resultados se muestran en la figura 28, donde se observa que la temperatura máxima es de  $49\text{ }^{\circ}\text{C}$  con un valor de radiación solar igual a  $890\text{ W/m}^2$ . Fernández (1994) estudió el efecto de los ventiladores sobre el clima de los invernaderos e informó que un invernadero sin flujo de aire y bajo radiación de  $445\text{ W/m}^2$  alcanzó  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  como temperatura interior. Como se muestra, la temperatura máxima calculada por el modelo para la misma radiación es de  $29\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Este es el único resultado del modelo matemático donde la temperatura del invernadero se considera uniforme en todos los puntos espaciales del mismo.

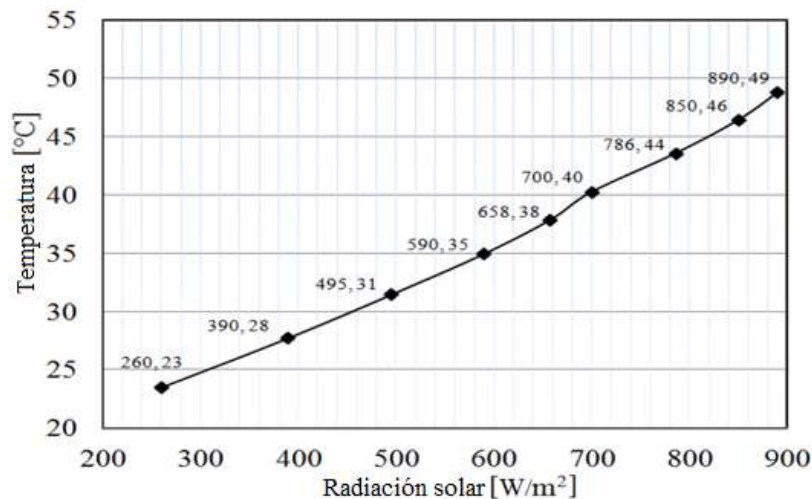


FIGURA 28. TEMPERATURAS DE INVERNADERO SIN PARED HÚMEDA ( $V \rightarrow 0$ ) EN FUNCIÓN LA RADIACIÓN SOLAR.

### 5.2.3 Tasas de ventilación de invernadero para diferentes temperaturas máximas de operación.

Se utiliza un valor de alta radiación solar  $890\text{ W/m}^2$  para calcular las tasas de ventilación que generan distintas temperaturas en el invernadero. Con estos resultados se puede seleccionar el valor adecuado para tener una temperatura interior máxima de  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , figura 29, en este caso es con una tasa de ventilación de  $14\text{ m}^3/\text{s}$ . Esta es la temperatura promedio requerida para los cultivos de invernadero más comunes, por ejemplo, jitomate (*lycopersicum esculentum*) (Pilatti, 2002).

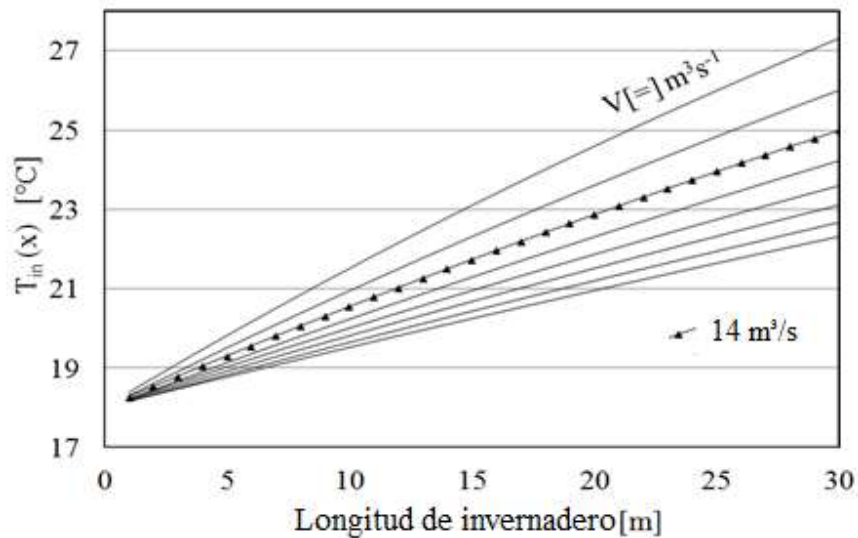


FIGURA 29. VARIACIÓN DE LA TASA DE VENTILACIÓN PARA OBTENER DISTINTOS PERFILES DE TEMPERATURA MÁXIMA, CUANDO  $V = 14 \text{ m}^3/\text{s}$ , SE OBTIENE UNA TEMPERATURA MÁXIMA DE  $25^\circ\text{C}$ .

#### 5.2.4 Energía eléctrica requerida por los extractores.

Para determinar la energía eléctrica requerida, es necesario seleccionar el ventilador que cumple con la tasa de ventilación calculada, y multiplicar su potencia por horas de operación y cantidad de ventiladores. Se propusieron tres modelos de ventiladores más comúnmente utilizados para su aplicación en la ventilación de invernaderos. (Modelo A: HGT-1000-3 / 4, Modelo B: HGT-1000-1, Modelo C: HGT-1000-1 ½, de la marca comercial Soler & Palau®) (Cuadro 6):

CUADRO 6. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE ALGUNOS VENTILADORES COMERCIALES.

Modelo	Potencia eléctrica $W$	Caudal de aire $\text{m}^3/\text{h} - \text{m}^3/\text{s}$
A	563	24666 - 6.9
B	746	27630 - 7.7
C	1119	31663 - 8.9

ASABE (2008) y Nelson (1998) sugieren que los ventiladores instalados en un invernadero deben tener la misma capacidad de flujo de aire y características

técnicas, es decir, son que sean el mismo modelo. Además, las horas de funcionamiento de los ventiladores corresponden a las mismas horas que la pared húmeda debe funcionar al día.

La figura 28 muestra que cuando la radiación solar es igual o superior a  $450 \text{ W/m}^2$ , la temperatura del invernadero supera los  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Además, la figura 23 muestra que la radiación solar es igual o mayor a este valor aproximadamente de 10:00 a 14:00 hrs. Por lo tanto, deben ser cuatro horas de funcionamiento por día de los ventiladores de extracción. Esta forma de determinar el tiempo de operación es estrictamente para reducir las temperaturas máximas durante el día, sin embargo, el tiempo de operación puede variar de acuerdo con la temperatura deseada dentro del invernadero.

La figura 30 muestra las tasas de ventilación en función de la superficie de los invernaderos equipados con pared húmeda. Considerando lo anterior, las energías requeridas se muestran en el cuadro 7.

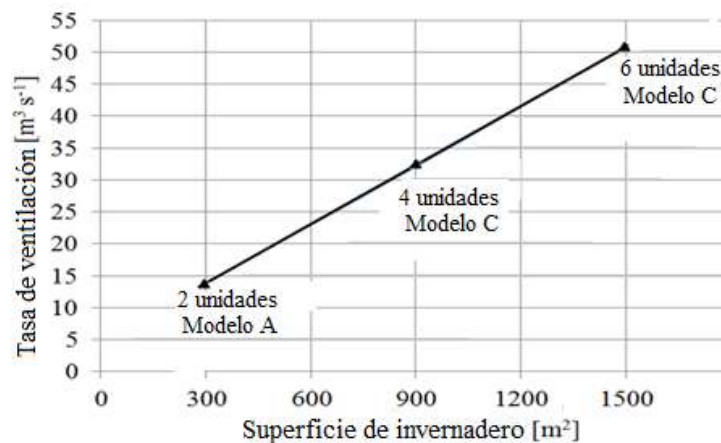


FIGURA 30. TASAS DE VENTILACIÓN EN FUNCIÓN DE LA SUPERFICIE DEL INVERNADERO.

**CUADRO 7. ENERGÍA ELÉCTRICA REQUERIDA POR LOS EXTRACTORES DE AIRE PARA INVERNADEROS DE DIFERENTES SUPERFICIES.**

Superficie de invernadero [ $m^2$ ]	Tasa de ventilación requerida [ $m^3/s$ ]	Cantidad y modelo de extractor	Potencia [W]	Horas de operación por día	Energía requerida por día [kWh]
300	14	2, Modelo A	563	4	4.50
900	32.5	4, Modelo C	746	4	11.94
1500	51	6, Modelo C	1119	4	26.86

En el cuadro 7 se puede observar que para un invernadero de  $300 m^2$  con la temperatura máxima deseada de  $25 ^\circ C$ , la energía requerida es igual a  $4.5 kWh$  por día. Sin embargo, si la temperatura deseada fuera de  $23 ^\circ C$ , la tasa de ventilación sería de  $20 m^3/s$  y la energía requerida sería de  $6.8 kWh$  por día. Eso significa que se necesita un 30% más de energía eléctrica para disminuir tan solo  $2 ^\circ C$ . Seleccionar la cantidad de ventiladores y la energía eléctrica antes de instalar los sistemas fotovoltaicos representa una forma de mejorar el uso de la energía eléctrica en los invernaderos.

Al Helal (2007) midió la cantidad de energía eléctrica consumida por un invernadero de  $351 m^2$  con dos ventiladores de  $10 m^3/s$  que operan 13 horas por día, durante 29 días y una radiación máxima de  $980 W/m^2$ . La energía requerida en el peor día fue  $69 Wh/m^2$ . Si esos extractores trabajaran 4 horas al día como en este estudio, su consumo de energía sería de  $21.3 W/m^2$ . El modelo matemático utilizado en este estudio mostró que para un invernadero de  $300 m^2$  se requieren  $4.5 kWh$  por día, es decir,  $15 W/m^2$ .

### **5.3 Resultados del análisis del balance de energía en el extractor de aire.**

Para analizar el flujo de aire de salida del extractor se utilizó la ecuación general del potencial eólico, ecuación 40. En ella se requiere definir el área superficial del paso de aire, por ello, se propuso como solución innovadora la instalación de un eje rotatorio de tres aspas. El área corresponde al círculo que



delimita el recorrido de sus aspas.

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 \pi r^2 \quad \text{Ec. 40}$$

$$\rho = 1.225 \exp \left\{ \frac{-z}{8435} - \frac{(T - 15)}{288} \right\} \quad \text{Ec. 41}$$

Donde  $\rho$  es la densidad de aire corregida de la ecuación 41,  $v$  es la velocidad promedio de aire de los extractores del invernadero,  $\pi$  es el signo que equivale al número 3.1416 y que resulta de la relación entre la longitud de una circunferencia y su diámetro,  $r$  es radio del rotor del eje rotatorio de tres aspas.

La ecuación 40 fue resuelta para la obtención de la densidad de aire utilizando una temperatura  $T$ , promedio de 25 °C, este dato fue obtenido de la estación meteorológica Chapingo del Sistema Meteorológico Nacional, SMN. La altura del sitio sobre el nivel del mar corresponde, según la misma fuente es de 2246 m.

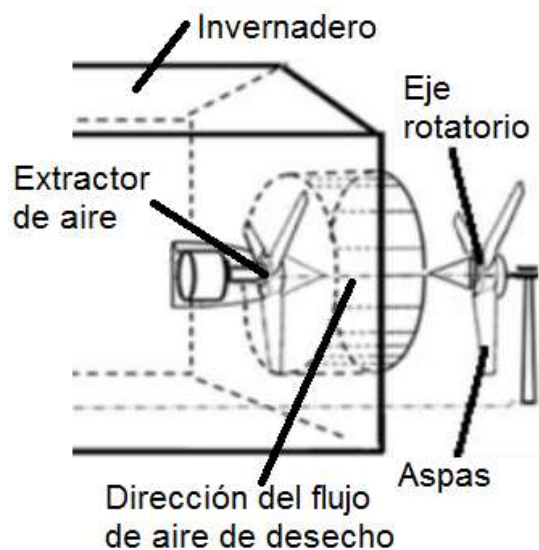


FIGURA 31. ESQUEMA DE INSTALACIÓN DE SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA RESIDUAL DE INVERNADERO

La velocidad de aire promedio a la distancia recomendada fue de 10.2 m/s. Los datos utilizados dieron el resultado para la densidad del aire corregido de 0.9717 kg/m<sup>3</sup>. Se obtuvo un potencial energético de 583 W. Es decir, está es la

potencia mínima que puede ser aprovechada por el eje rotatorio de un generador eléctrico de tres aspas con un diámetro de giro de 1.2 m que es igual al diámetro de giro de los extractores en este invernadero, para otros datos de flujo de aire se puede duplicar, hasta triplicar la potencia producida. Cabe señalar que los motores eléctricos instalados en los extractores tienen 1.5 hp y de 0.5 hp instalados en las bombas hidráulicas. Esto significa que se puede suministrar hasta 50% de energía de los motores eléctricos de extractores o 100% para motores de las bombas hidráulicas o aprovechar para otras necesidades.

La cantidad de energía disponible del eje rotatorio de tres aspas estará en función de las horas de funcionamiento de los extractores, la cual es variable dependiendo de las características específicas de cada invernadero, a saber, superficie, tipo de invernadero, temperatura óptima del cultivo y tipo de material de fabricación de la pared húmeda. En el cuadro 8 se muestran los valores de esta cantidad de energía en el rango de utilización que comúnmente trabajan estos extractores por día, mes y año y que resulta de la multiplicación del potencial energético en Watts por las horas de funcionamiento. Esta energía generada puede ser transformada a energía eléctrica o transmitida a otro proceso de energía mecánica.

**CUADRO 8. RESULTADOS DE ENERGÍA PRODUCIDA POR UN EJE ROTATORIO DE TRES ASPAS UTILIZANDO EL FLUJO DE AIRE DE UN EXTRACTOR DE 1.2 M DE DIÁMETRO.**

Horas de trabajo por día	Energía producida en kWh por:		
	Día	Mes	Año
2	1.16	34.98	425.59
4	2.33	69.96	851.18
6	3.49	104.94	1276.77

Los procesos de transformación de energía eólica a energía mecánica y eléctrica sufren pérdidas de acuerdo a la construcción y disposición de los

dispositivos elegidos en cada caso. La utilización de un alternador para generación de electricidad o de una bomba para recirculación de agua pueden ser de características diversas y los detalles de las mismos quedan fuera del alcance de esta investigación.

#### 5.4 Componentes e instalación del sistema fotovoltaico híbrido en invernadero.

Se muestran a continuación en el cuadro 9 los resultados de cálculo utilizando las ecuaciones del apartado 3.4. En la figura 32 se muestra el esquema de la instalación realizada de los principales componentes del SFV híbrido para invernadero. El tiempo total de la instalación fue de 10 días, una vez que se tenía la disponibilidad de los materiales. Para la instalación de los paneles fotovoltaicos se realizó el diseño y construcción de una torre de soporte de 4.5 m de altura con inclinación de ángulo variable de 15 a 30°. La evaluación energética y exergética de la instalación fotovoltaica se desarrolló durante el funcionamiento de los paneles fotovoltaicos, cuando se generaba corriente eléctrica durante las horas de radiación máxima a las 12:45 hrs.

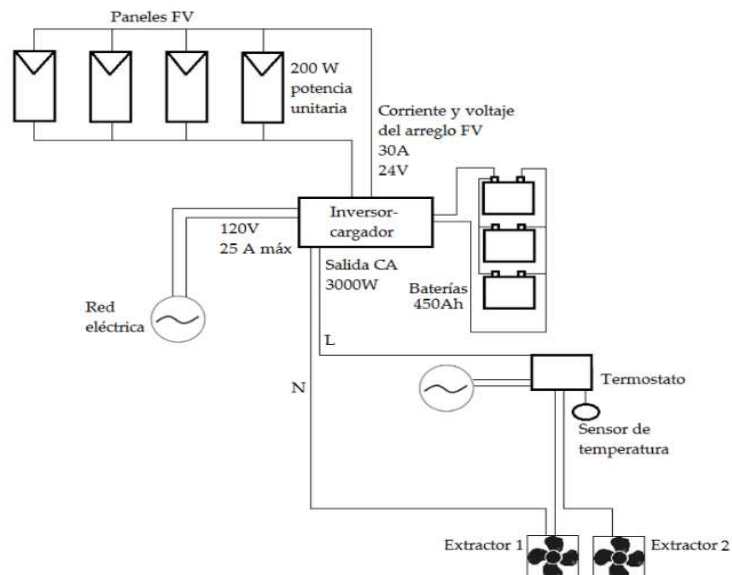


FIGURA 32. ESQUEMA DE INSTALACIÓN DE LOS PRINCIPALES COMPONENTES DEL SFV HÍBRIDO PARA INVERNADERO.

**CUADRO 9. PRINCIPALES COMPONENTES DEL SFV HÍBRIDO PARA INVERNADERO.**

Componente	Cantidad	Características eléctricas
Paneles solares	4	200 W unitarios
Inversor- Cargador	1	3000 W unitarios
Baterías	4	150 Ah unitario
Arreglos fotovoltaicos	1	Conexión en paralelo



**FIGURA 33. INSTALACIÓN DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS Y CONEXIÓN DE INVERSOR Y BATERÍAS EN GABINETE ELÉCTRICO.**



**FIGURA 34. INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA CONCLUIDA.**

## 5.5 Modelación matemática de un secador solar de productos agrícolas.

Un secador solar de productos agrícolas de tipo invernadero puede considerarse como un sistema similar pero más simple que un invernadero con pared húmeda (Prakash 2013), por esta razón se seleccionó este sistema que es utilizado para deshidratar productos y alargar su vida de conservación para validar la metodología desarrollada de aplicación de sistemas fotovoltaicos. Ambos sistemas, invernadero y secador, comparten la técnica de ventilación por convección forzada con extractores de aire (Mustayen, 2014). La diferencia fundamental es el propósito del secador solar con respecto al invernadero con pared húmeda.

En el secador se busca deshidratar productos agrícolas mediante temperaturas de aire elevadas ( $60 - 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (Sharma, 2009) mientras que con la pared húmeda se busca controlar la temperatura de cultivos ( $20 - 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) en los invernaderos. Esta diferencia en las temperaturas de operación se logra mediante el uso de materiales de cubierta con diferente nivel de transmitividad de radiación,  $\tau$ .

El policarbonato utilizado en las cubiertas de secadores solares tiene valores promedio de  $\tau = .91$  (Brouwer, 2015) mientras que, para el polietileno utilizado en los invernaderos,  $\tau = .60$ . El análisis de balance de energía del invernadero con pared húmeda es simplificado y aplicado en un secador solar tipo invernadero. Se consideró que el aire de entrada al secador no es sometido a un sistema de enfriamiento evaporativo, la temperatura interior inicial del aire es la temperatura ambiental.

La aplicación del modelo de distribución de temperaturas permitirá obtener la energía requerida por sus extractores para mantener una temperatura máxima definida. Las consideraciones necesarias para aplicar el modelo matemático de temperatura al secador solar tipo invernadero son las siguientes:

**CUADRO 10. MODIFICACIÓN DE PARÁMETROS DE MODELO MATEMÁTICO PARA APLICARSE A SECADOR SOLAR.**

Parámetros	Consideraciones
$T_o = T_{pad} = T _{x=0}$	La temperatura de entrada de aire en el secador solar es igual a la temperatura ambiental.
$\rho$	Las altas temperaturas dentro del secador propician una disminución del valor de la densidad del aire. Y su valor debe ser ajustado.

La variación de la densidad del aire por efectos de temperatura se obtiene mediante la siguiente expresión, donde  $z$  es la altura del sitio sobre el nivel del mar en  $m$ , y  $T$  es la temperatura en  $^{\circ}C$  (Perrin, 2006):

$$\rho = 1.225 e^{\left[ \frac{-z}{8435} - \frac{(T-15)}{288} \right]} \quad \text{Ec. 42}$$

Considerando lo anterior, el modelo matemático para predecir la temperatura del secador solar tipo invernadero se expresa mediante la ecuación 43, la cual representa físicamente el comportamiento del secador solar. Una vez que los extractores de aire son accionados, en  $x=0$ , el valor de la temperatura al interior del secador es el mismo que el aire ambiental exterior, conforme el aire se desplaza a lo largo del secador su temperatura aumentará por efectos de la radiación solar.

$$T(x) = T|_{x=0} + \frac{\tau(1-\alpha)R_o W_{sd}}{K_c L_{cov}} \left[ 1 - e^{-\left[ \frac{K_c L_{cov}}{\dot{V} 1.225 e^{\left[ \frac{-z}{8435} - \frac{(T-15)}{288} \right]} C_p} \right] (x)} \right] \quad \text{Ec. 43}$$

### 5.5.1 Secador solar experimental tipo invernadero de productos agrícolas.

Las principales características del secador utilizado para experimentación, figura 35, perteneciente al campo experimental de energías renovables de la Universidad Autónoma Chapingo, se muestran en el cuadro 11.



FIGURA 35. SECADOR SOLAR EXPERIMENTAL CON CUBIERTA PARABÓLICA DE POLICARBONATO.

CUADRO 11. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL SECADOR EXPERIMENTAL.

Recurso solar para Texcoco, Mexico. 19.30°N, 98.53°W	5.51 kWh/m <sup>2</sup> día
Forma	Parabólica
Tipo	Invernadero
Dimensiones (Ancho, Largo, Altura máxima)	(9, 12, 3.5) m
Superficie de suelo	108 m <sup>2</sup>
Volumen	231 m <sup>3</sup>
Transmitancia del material de cubierta (policarbonato)	0.91

### 5.5.2 Tasa de ventilación, selección de extractores de aire, energía requerida y sistema fotovoltaico.

Se programó la solución de la ecuación 43 en el software MatLab. En el secador solar la tasa de ventilación necesaria para no exceder 50°C debe ser de 3 m<sup>3</sup>/s, mostrado en la figura 36. Para este valor, el modelo de estado estacionario puede también obtener la distribución espacial de la temperatura dentro del secador solar a lo largo del día cuando están operando los extractores, figura 37.

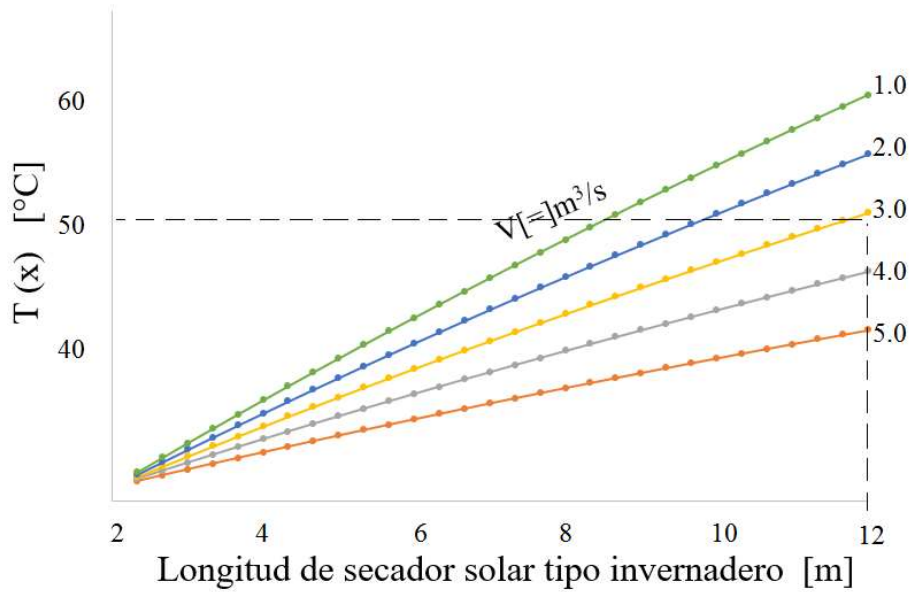


FIGURA 36. TEMPERATURAS DE SECADOR SOLAR OPERANDO CON DIFERENTES TASAS DE VENTILACIÓN.

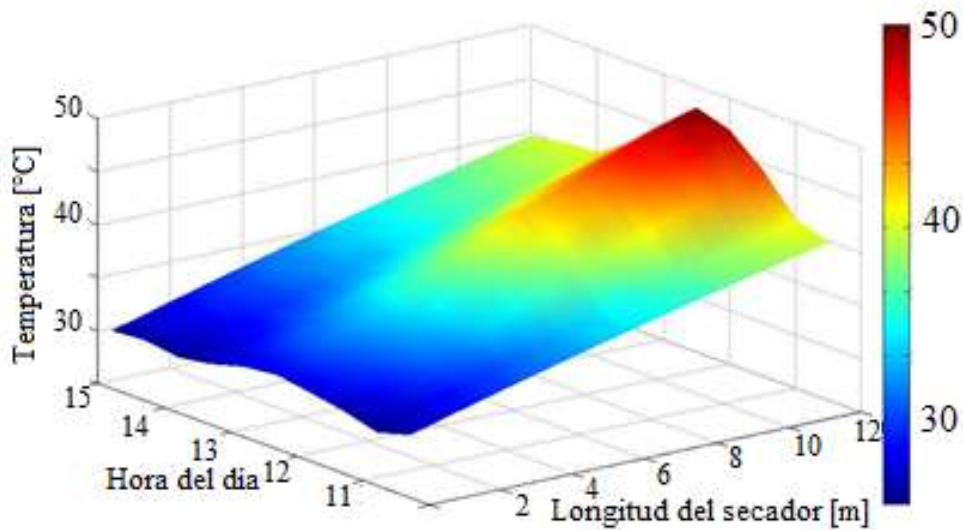


FIGURA 37. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA TEMPERATURA EN EL SECADOR CON  $V=3\text{m}^3/\text{s}$ .

Las tasas de ventilación de la figura 36 representan los caudales de aire que los ventiladores deberán remover del secador solar para mantener diferentes temperaturas de operación, según el tipo de producto que se debe deshidratar (Bal, 2010). Existen diferentes formas de obtener distintos caudales de aire dentro de un



secador, a saber, utilizando un variador de velocidad o bien, utilizando motores de diferentes potencias eléctricas.

En este caso de estudio, el caudal de aire de  $3 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $10,800 \text{ m}^3/\text{s}$ ) está calculado para el secador solar experimental de estudio. Se han seleccionado 2 extractores de  $5500 \text{ m}^3/\text{s}$  cada uno para producir  $11,000 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Prashant et al 2017, realizaron una síntesis de modelos matemáticos de secadores con convección forzada, donde se encontró que los resultados de los modelos tampoco tienen ninguna relación con la energía utilizada por los extractores de aire. En este caso, para el cálculo de la energía requerida se ha contemplado sumar también las cargas por el sistema automático de control de temperatura e iluminación, la suma total está determinada en el cuadro 12:

**CUADRO 12. DETERMINACIÓN DE LA ENERGÍA REQUERIDA POR EL SECADOR SOLAR.**

Carga eléctrica	No.	Potencia eléctrica unitaria [W]	Tiempo promedio de operación [horas]	Energía demandada [kWh/día] $E_i$
Motor eléctrico para extractor de aire	2	375	5	3.750
Sistema de control automático	1	20	24	0.480
Luminarias	4	25	2	0.200
				$\sum E_i = 4.43 \text{ kWh}$

Los componentes del sistema fotovoltaico híbrido diseñado para el secador solar son:

**CUADRO 13. COMPONENTES PRINCIPALES DEL SFV HÍBRIDO PARA EL SECADOR SOLAR.**

Componente	Cantidad	Características eléctricas
Paneles solares	8	200 W unitarios
Inversor- Cargador	2	3000 W unitarios
Baterías	6	150 Ah unitario
Arreglos fotovoltaicos	2	Conexión en paralelo



**FIGURA 38. INSTALACIÓN DE PANELES Y CONEXIÓN ELÉCTRICA DE INVERSORES.**



**FIGURA 39. INSTALACIÓN COMPLETA DE SISTEMA FOTOVOLTAICO EN SECADOR SOLAR.**

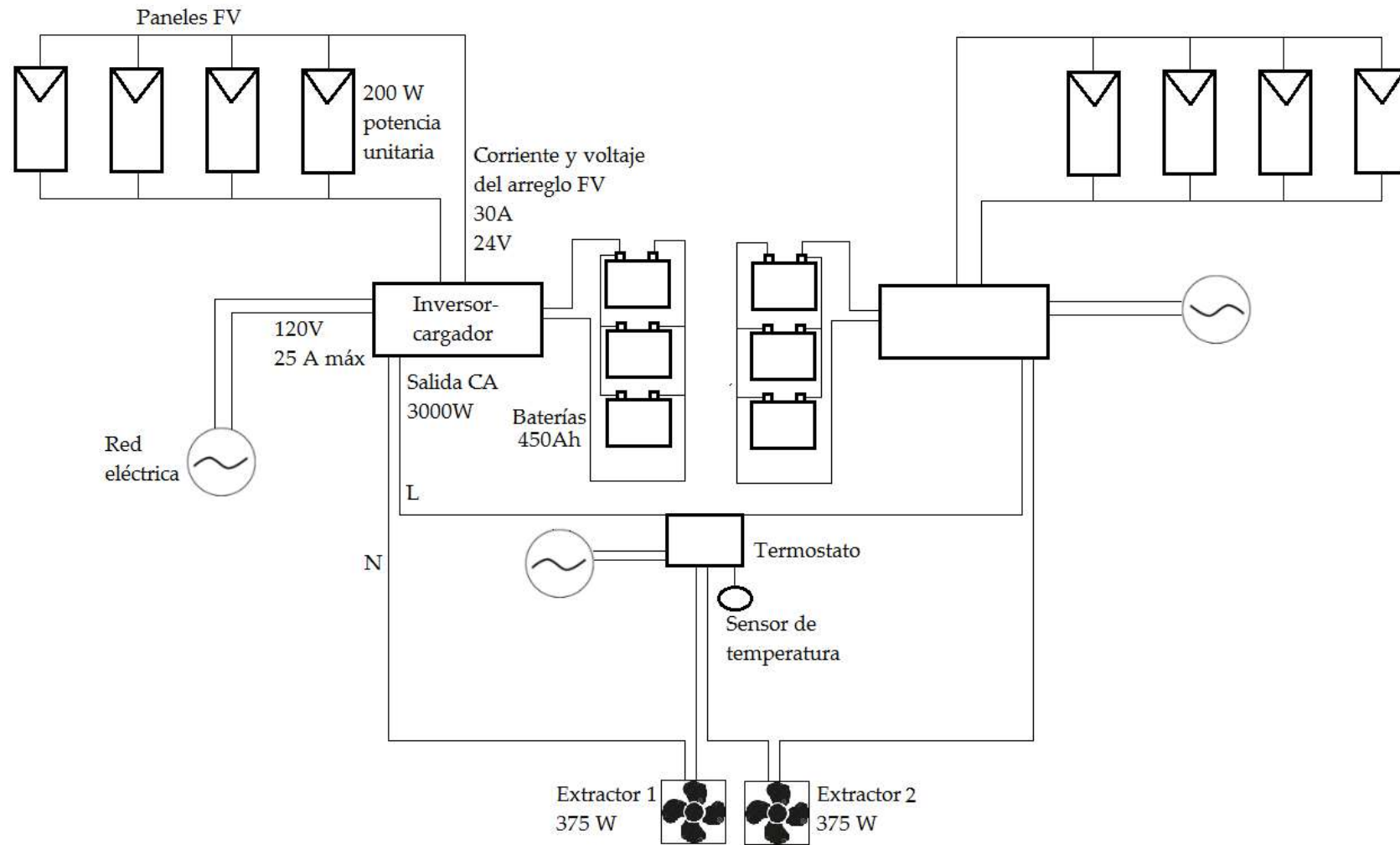


FIGURA 40. ESQUEMA DE INSTALACIÓN ELÉCTRICA DE SISTEMA FOTOVOLTAICO EN SECADOR SOLAR.

### 5.6 Resultados de la evaluación energética de sistemas fotovoltaicos.

CUADRO 14. INDICADORES ENERGÉTICOS DEL RENDIMIENTO DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.

Aplicación	Temp deseada [°C]	Energía diaria [kWh]	Potencia fotovoltaica instalada [W]	Parámetros de producción Corriente [A] y voltaje [V]	Eficiencia energética de la instalación	Eficiencia exergética de la instalación	Nivel de sustentabilidad energética	Costo \$ MXN
Invernadero con pared húmeda de 300 m <sup>2</sup>	25° C	4.5	800	30, 21.3	0.142	0.096	33 -100%	57,800
Secador solar parabólico de 110 m <sup>2</sup>	50°C	3.2	1560 W	28, 20.9	0.139	0.108	72 – 100 %	118,500

## **CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y DISCUSIONES.**

Los gradientes de temperatura de fluidos en la pared húmeda obtenidos son de utilidad para realizar la caracterización dinámica del enfriamiento evaporativo de paneles de celulosa corrugada en paredes húmedas con datos experimentales, ya que se aumenta el nivel de exactitud de los modelos dinámicos. La metodología utilizada en este trabajo para determinar tres gradientes distintos de temperatura de agua en una pared húmeda es adaptable a paredes húmedas fabricadas con distintos materiales a la celulosa corrugada, o bien con distintas medidas geométricas. Los resultados muestran que el cambio en la temperatura de agua al descender por la pared húmeda es directamente proporcional a la diferencia de altura. El parámetro principal que determina el nivel de desempeño en la pared húmeda es su eficiencia de enfriamiento y en el día de experimentación el valor promedio fue de 77%, la variación de condiciones ambientales y del tipo de material en la pared influyen el valor de la eficiencia y los gradientes de temperatura obtenidos. Los resultados indican que la eficiencia de enfriamiento de la pared húmeda es menor con valores altos de humedad relativa por las mañanas cuando el sistema no está aún estabilizado.

Se analizó la influencia de la radiación solar sobre las temperaturas del invernadero. En la primera parte se disminuye esa influencia, determinando una tasa de ventilación adecuada para que el aire no exceda los 25 ° C de temperatura. En la segunda parte, se proponen sistemas fotovoltaicos para producir la energía consumida por los extractores de aire. El modelo matemático de temperatura ha sido validado por muchos investigadores dedicados al clima de los invernaderos. Sin embargo, no se encontró un registro del uso de este modelo para resolver un problema relacionado con el diseño de sistemas fotovoltaicos. El problema principal durante el diseño de un sistema fotovoltaico es determinar la energía que se generará, con los datos experimentales se calibró el modelo con una aproximación aceptable del coeficiente de pérdidas de calor sensibles a través de la cubierta de plástico. Por lo tanto, el modelo describe de manera confiable la temperatura de un

invernadero con pared húmeda. Los resultados muestran la necesidad de seleccionar correctamente el caudal de los extractores porque existe el riesgo de consumir más energía de la necesaria. Además, si la tasa de ventilación aumenta, disminuyen los gradientes de temperatura generados por la pared húmeda, la importancia de una selección adecuada en la fase de diseño representa ahorros energéticos y económicos y mejora la productividad mientras se mantienen las temperaturas óptimas.

Con los resultados de modelación de la temperatura interior del invernadero es posible aumentar la eficiencia energética en los sistemas de extracción de aire, el efecto de enfriamiento no es proporcional a la potencia de los extractores de aire. Si aumenta la tasa de ventilación, los gradientes de temperatura disminuyen, por lo tanto, el efecto de enfriamiento también. Con el modelo matemático y los datos experimentales se obtuvieron aproximaciones aceptables del comportamiento térmico de un invernadero hermético y por consiguiente de sus necesidades energéticas.

Si la pared húmeda funciona con la máxima eficiencia, no se puede garantizar que el consumo de energía eléctrica de los extractores sea mínimo. Por el contrario, la búsqueda de la mayor eficiencia posible de la pared húmeda, podría causar un consumo innecesario de energía, esto se debe a que la temperatura óptima dentro de un invernadero puede obtenerse con una tasa de ventilación inferior a la que corresponde a la eficiencia de la pared evaporativa. En consecuencia, la potencia de los ventiladores debe ser menor y el consumo de energía también.

Se obtuvieron diseños de sistemas fotovoltaicos para el enfriamiento de invernaderos y secadores solares. La instrumentación del invernadero y la medición de la energía requerida, así como de las temperaturas adversas justificaron la necesidad de instalación del sistema de suministro alternativo de energía. El resultado arrojado por la metodología de selección de componentes requiere además un criterio para toma de decisiones por parte del usuario, ya sea que priorice el bajo costo o tecnología reciente de inversores y módulos fotovoltaicos principalmente.

Derivado del análisis del balance de energía en el extractor de aire, fue posible determinar el potencial de la energía de recuperación del flujo de aire que sale por los extractores del invernadero, se desarrolló un método de recuperación mediante rotor giratorio de tres aspas. Actualmente, se encuentra en trámite de solicitud de patente esta invención.

Se analizó la dependencia entre las variables termodinámicas de los subsistemas que en conjunto componen el sistema invernadero/pared húmeda/sistema fotovoltaico. Los resultados de relación de variables permiten mejorar la utilidad práctica de los modelos matemáticos, en este trabajo se desarrolló una metodología de análisis de energía donde los principales indicadores del rendimiento de un sistema fotovoltaico en invernadero son la eficiencia energética y la eficiencia exergética. El método obtenido fue validado mediante los resultados de evaluación de un sistema fotovoltaico instalado en invernadero durante su funcionamiento.

El resultado principal para llevar a cabo la evaluación de eficiencia exergética es la corriente máxima del sistema fotovoltaico, para calcular este resultado en este trabajo, se consideraron las magnitudes de las variables termodinámicas que definen la operación de la pared húmeda, la distribución de aire en el invernadero, y el caudal de los extractores de aire. Es decir, la corriente máxima del sistema fotovoltaico es una dependencia de todos los subsistemas mencionados.

De acuerdo con los resultados de modelación matemática, la corriente máxima cambiará dependiendo de la temperatura máxima de operación del invernadero, esto se debe a que se deberá calcular un sistema fotovoltaico de diferente capacidad para cada arreglo de potencia y voltaje de los extractores. Por ello, la importancia del modelo de evaluación radica en su disponibilidad de reproducirse para invernaderos de diferentes superficies y con distinto recurso solar que ya dispongan de sistemas fotovoltaicos que requieran ser energéticamente evaluados y representa una herramienta de diseño de sistemas de pared húmeda, de donde se obtienen los criterios de selección de extractores de aire para diferentes temperaturas. Es una herramienta de dimensionamiento y diseño de sistemas

fotovoltaicos en invernaderos, utilizando como parámetro de diseño inicial, la energía requerida por el invernadero.

Utilizando la evaluación experimental de los balances de energía teóricos del invernadero, se logró demostrar que un sistema fotovoltaico para invernadero con pared húmeda puede ser diseñado en función de las tasas de ventilación y de la temperatura de aire del invernadero. Esto aumenta el nivel de confiabilidad en la energía fotovoltaica y aumenta la sustentabilidad del sector agrícola.



## REFERENCIAS

- Duffie J., Beckman W. (2013) Solar Engineering of Thermal Processes. Fourth Edition. Wiley. ISBN 978-1-118-67160-3.
- Li D., Cheung K., Lam T., Chan W. (2012). A study of grid-connected photovoltaic (PV) system in Hong Kong. Applied Energy 2012;90(1):122-127.
- Yang L., Lam JC. (2013). Zero energy buildings and sustainable development implications – A review. Energy 54: 1-10.
- ASABE (2008). Heating, ventilating and cooling greenhouses. ASABE standards. ANSI /ASAE EP406.4 JAN2003. St. Joseph, American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Bucklin R., Henley R. (1993). Fan and pad greenhouse evaporative cooling systems. Institute of food and agriculture science, Cir. 1135. University of Florida, Gainesville, FL.
- Arbel A., Yekutieli O., Barak M. (1999). Performance of a fog system for cooling greenhouses. Journal of Agricultural Engineering Research,72: 129-136.
- Nelson V.P. (1998). Greenhouse operation and management. 5<sup>th</sup> ed. Prentice Hall, pp. 144 154.
- Abdel G., Kozai T. (2006). Cooling efficiency of fogging systems for greenhouses. Biosystems Engineering, 94 (1): 97-109.

- Wahab S. (1994). Energy and water management in evaporative cooling systems in Saudi Arabia. *Resources, Conservation and Recycling*, 12 (3-4): 135-146.
- Willits D., Li S. (2008). Modelling thermal stratification in fan-ventilated greenhouses. *Transactions of the ASABE*. 51(5): 1735-1746. (doi: 10.13031/2013. 25307)
- Franco A., Valera D., Peña A. (2014) Energy Efficiency in Greenhouse Evaporative Cooling Techniques: Cooling Boxes versus Cellulose Pads, *2014 Energies*, 7, 1427-1447; doi:10.3390/en7031427.
- Al-Helal I., N. Al-Abbadi. (2004). A study of fan-pad performance for a photovoltaic powered greenhouse in Saudi Arabian summer. *International Agricultural Engineering Journal*, 00:1-14.
- Ahmed N., Farghally H. (2011) A Modified Cooling System for Stand Alone PV Greenhouse in Remote Areas. *International Conf. on Renewable E. and Power Quality*.
- Slimani M., Amirat M., Bahria S., Kurucz I., Aouli M., Sellami R. (2016). Study and modeling of energy performance of a hybrid photovoltaic/thermal solar collector: Configuration suitable for an indirect solar dryer, In *Energy Conversion and Management*, Volume 125, Pages 209-221, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.059>.
- Ahmed E., Abaas O., Ahmed M. (2011) Performance evaluation of three different types of local evaporative cooling pads in greenhouses in Sudan, *Saudi Journal of Biological Sciences*, Volume 18, Issue 1, Pages 45-51.

- Vidaña E., Méndez L., Rodríguez J. (2013). Efficiency of a hybrid solar–gas dryer, *Solar Energy*, Volume 93, Pages 23-31, ISSN 0038-092X, <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2013.01.027>.
- Janjai S., Keawprasert T. (2006) Design and performance evaluation of a solar tunnel dryer with polycarbonate cover, *International Energy Journal*, 7, 187-194
- Janjai S., Lamlert N., Intawee P., Mahayothee B., Bala B., M. Nagle, J. Müller, (2009). Experimental and simulated performance of a PV-ventilated solar greenhouse dryer for drying of peeled longan and banana, In *Solar Energy*, Volume 83, Issue 9, Pages 1550-1565, ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.05.003>.
- Parida B., Iniyani S., Goic R. (2011). A review of solar photovoltaic technologies, In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 15, Issue 3, Pages 1625-1636, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.032>
- Zhang J., Zhao L., Deng S., Xu W., Zhang Y. (2017). A critical review of the models used to estimate solar radiation, In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 70, Pages 314-329, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.124>.
- Bakirci K. (2009) Models of solar radiation with hours of bright sunshine: a review *Renewable Sustainable Energy Rev*, 13, pp. 2580-2588.
- Teke A., H.B. Yıldırım, Ö. Çelik. (2015). Evaluation and performance comparison of different models for the estimation of solar radiation. *Renew Sustain Energy Rev*, 50, pp. 1097-1107.

- Khatib T., A. Mohamed, K. Sopian. (2012). A review of solar energy modeling techniques. *Renew Sustain Energy Rev*, 16, pp. 2864-2869.
- Lacerda J., Bergh V. (2016). Diversity in solar photovoltaic energy: implications for innovation and policy. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;54:331–40.
- Ferroni F., Hopkirk R. (2016). Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation. *Energy Policy* 2016;94:36–344.
- Spataru C. Bouffaron P., (2016). Chapter 22 - Off-Grid Energy Storage, In *Storing Energy*, edited by Trevor M. Letcher, Elsevier, Oxford, Pages 477-497, ISBN 9780128034408, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803440-8.00022-1>.
- Solano J., Olivieri L., Camaño M., (2017). Assessing the potential of PV hybrid systems to cover HVAC loads in a grid-connected residential building through intelligent control, In *Applied Energy*, Volume 206, Pages 249-266, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.188>.
- Siecker J., Kusakana K., Numbi B. (2017). A review of solar photovoltaic systems cooling technologies, In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 79, Pages 192-203, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.053>.
- Campiotti C., Bibbiani C., (2008). Photovoltaic as sustainable energy for greenhouse and closed plant production system. *Acta Hort.* 797.

- Martínez T., Romantchik E., Betanzos F. (2012). Metodología para la selección de sistemas fotovoltaicos a invernaderos y su aplicación. Ingeniería agrícola y biosistemas. Vol. 6, p.315
- Al-Shamiry F., Ahmad D., Mohamed S., Aris I. (2007). Design and development of a photovoltaic power system for tropical greenhouse cooling. American Journal of Applied Sciences 4 (6): 386-389.
- Carlini M., Castellucci S. (2012). Photovoltaic greenhouses: Comparison of optical and thermal behaviour for energy savings. Math Probl Eng 2012:1–10.
- Ganguly A., Misra D., Ghosh S. (2010). Modeling and analysis of solar photovoltaic-electrolyzer-fuel cell hybrid power system integrated with a floriculture greenhouse. Energy Buildings; 42:2036–43.
- Al-Ibrahim A., Al-Abbadi N., Al-Helal I. (2006). PV greenhouse system, system description, performance and lesson learned. Acta Horti (ISHS); 710:251–6.
- Baxevanou C., Fidaros D., Bartzanas T. (2010). Numerical simulation of solar radiation, air flow and temperature distribution in a naturally ventilated tunnel greenhouse. Agric Eng Int: CIGR Journal, 12(3): 48-67.
- Jain D. (2007). Development and testing of two-stage evaporative cooler. Building and Environment, 42 (7): 2549-2554.
- Landsberg J., White B. (1979). Comparative analysis of efficacy of evaporative cooling for a glasshouse in high energy environment. Journal of Agricultural Engineering Research. 24: 29-39.

- López I., Ramírez A. (2005). Modelos matemáticos de hortalizas en invernadero: trascendiendo la contemplación de la dinámica de cultivos. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 11 (2): 257-267.
- Ruiz A., López I., Ramírez A. (2015). Tasas de ventilación natural de un invernadero del centro de México estimadas mediante balance de energía. *Agrociencia*, 49(1), 87-100.
- Esen M., Yuksel T. (2013). Experimental evaluation of using various renewable energy sources for heating a greenhouse, *Energy and Buildings*, Vol. 65, 340-351.
- Cuce E., Harjunowibowo D., Pinar M. (2016). Renewable and sustainable energy saving strategies for greenhouse systems: A comprehensive review, In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 64, 2016, Pages 34-59, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.077>.
- Malli H., Seyf R., Layeghi M. (2011). Investigating the performance of cellulosic evaporative cooling pads. *Energy Conversion and Management* 52 pages 2598–2603.
- Kittas C., Bartzanas T. (2001). Greenhouse evaporative cooling: measurements and data analysis. *Transactions of the ASAE*. 44 (3), 683-689.
- Wan J., Zhang W., Zhang M. (2009). An energy-efficient air-conditioning system with an exhaust fan integrated with a supply fan, In *Energy and Buildings*, Volume 41, Issue 12, Pages 1299-1305, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.07.032>.
- Romantchick E., Betanzos F., Contreras E. (2014). Methodology for selecting and applying photovoltaic systems for greenhouses. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 6(1), 15 - 30.

- Peng Z., Mohammad R., Liu Y. (2017). Cooled solar PV panels for output energy efficiency optimisation, In *Energy Conversion and Management*, Volume 150, Pages 949-955, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.007>.
- Akyuz E., Coskun C., Oktay Z., Dincer I. (2012). A novel approach for estimation of photovoltaic exergy efficiency, In *Energy*, Volume 44, Issue 1, 2012, Pages 1059-1066, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.04.036>.
- Joshi A., I. Dincer, B.V. Reddy. Thermodynamic assessment of photovoltaic systems. *Solar Energy*, 83 (8) (2009), pp. 1139-1149.
- Holmberg J., C. Flynn, and L. Portinari. (2006). The colours of the Sun. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, vol. 367, no. 2, pp. 449–453.
- Feuilloley P., Issanchou G., (1996). Greenhouse Covering Materials Measurement and Modelling of Thermal Properties Using the Hot Box Method, and Condensation Effects. *Journal of Agricultural Engineering Research* Volume 65, Issue 2, October 1996, Pages 129–142
- Baille M., Delmon D. (1994). Microclimate and transpiration of greenhouse rose crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, 71, 83–97
- Roy J., Boulard T., Wang S. (2002). Convective and Ventilation Transfers in Greenhouses, Part 1: the Greenhouse considered as a Perfectly Stirred Tank. *Biosystems Engineering* (2002) 83 (1), 1–20doi:10.1006/bioe.2002.0107

- Fernandez J., Bailey B. (1994). The Influence of Fans on Environmental Conditions in Greenhouses. Original Research Article Journal of Agricultural Engineering Research, Volume 58, Issues 2–3, June 1994, Pages 201-210
- Pilatti R. Buyatti M. (2002). Efecto de la calefacción nocturna y de su duración sobre la producción de un cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). Invest. Agr. Prod. Prot.Veg.17(3):457-462.
- Al Helal I. (2007). Effects of ventilation rate on the environment of a fan-pad evaporatively cooled, shaded greenhouse in extreme arid climates. Applied Eng. in Agr. 23 (2): 221-230.
- Prakash O, Kumar A. (2013). Historical review and recent trends in solar drying systems. Int J Green Energy; 10:690–738.
- Mustayen A., Mekhilef S., Saidur R. (2014). Performance study of different solar dryers: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 34, Pages 463-470, ISSN 1364-0321.
- Sharma A., Chen C., Lan N. (2009). Solar-energy drying systems: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 13, Issue 6, Pages 1185-1210, ISSN 1364-0321, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.015>.
- Brouwer H., Bogerd J., Hoover J. (2015). Color stability of polycarbonate for optical applications, In European Polymer Journal, Volume 71, Pages 558-566, ISSN 0014-3057, <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2015.08.031>.
- Bal L., Satya S., Naik N. (2010). Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 14, Issue 8, Pages 2298-2314, ISSN 1364-0321, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.04.014>.



- Perrin O., Rootzen H., Taesler R. (2006). A discussion of statistical methods used to estimate wind speeds. *Theor. Appl. Climatol.* 85:203-215.
- Prashant S., Kumar A., Gupta B. (2017). A review on thermal models for greenhouse dryers, In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 75, Pages 548-558, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.023>.

## A1. PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS

( \* Artículos con arbitraje)

1. \* Ríos E., Romantchik E., Sánchez E., Del-Castillo F. (2017). Energy Efficiency and Performance Evaluation of Hybrid Photovoltaic System for Fan-Pad of Greenhouses. Proceedings of International Solar Energy Society peer review under responsibility of Scientific Committee. Pages 1318-1327 doi:10.18086/eurosun.2016.08.16. <http://proceedings.ises.org>
2. \* Romantchik E., Ríos E, Sánchez E., López I., Reyes J. (2017). Determination of energy to be supplied by photovoltaic systems for fan-pad systems in cooling process of greenhouses, In Applied Thermal Engineering, Volume 114, 2017, Pages 1161-1168, ISSN 1359-4311, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.011>.
3. \* Romantchik E., Ríos E. (2017). Selection of Photovoltaic Systems to the Greenhouses, In Athens Institute for Education and Research, Pages 1-14 No: AGR2017- 2312. ISSN: 2241-2891. <https://www.atiner.gr/papers/AGR20172312.pdf>
4. Ríos E., Romantchick E., Garduño A., Sánchez E. (2014). Gradientes de temperatura de agua en pared húmeda de invernadero. Desarrollos de ingeniería agrícola en América Latina. México, 2014. Páginas 1967-1976 ISBN: 978 - 607- 12 - 0356 – 4. [https://www.researchgate.net/publication/277331750\\_DESARROLLOS\\_DE\\_INGENIERIA\\_AGRICOLA\\_EN\\_AMERICA\\_LATINA](https://www.researchgate.net/publication/277331750_DESARROLLOS_DE_INGENIERIA_AGRICOLA_EN_AMERICA_LATINA)
5. Ríos E., Romantchick E., Sánchez E. (2016). Estudio del efecto de la ventilación sobre la temperatura de invernaderos con pared evaporativa para el suministro de energía fotovoltaica. Memorias del XII Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola. Colombia, 2016, Páginas 871-877 ISBN: 978-958-57102-6-9. [https://www.researchgate.net/publication/308144747\\_Memorias\\_-\\_XII\\_Congreso\\_Latinoamericano\\_y\\_del\\_caribe\\_de\\_Ingenieria\\_Agricola](https://www.researchgate.net/publication/308144747_Memorias_-_XII_Congreso_Latinoamericano_y_del_caribe_de_Ingenieria_Agricola)
6. Ríos E., Romantchick E., Sánchez E., Zapote J. (2015). Sistema de Enfriamiento Solar Evaporativo para Invernaderos. Publicaciones de la Asociación Nacional de Energía Solar, 2015. Páginas 532-537 [http://www.isdmex.com/PubSemNal/SNES\\_XXXIX/SNES\\_XXXIX\\_Portfolio.pdf](http://www.isdmex.com/PubSemNal/SNES_XXXIX/SNES_XXXIX_Portfolio.pdf) ISSN: 2448-5543.
7. Romantchick E., Ríos E. (2016). Memorias del XII Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola. Colombia, 2016, Páginas 906-911 ISBN: 978-958-57102-6-9. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/308144747\\_Memorias\\_-\\_XII\\_Congreso\\_Latinoamericano\\_y\\_del\\_caribe\\_de\\_Ingenieria\\_Agricola](https://www.researchgate.net/publication/308144747_Memorias_-_XII_Congreso_Latinoamericano_y_del_caribe_de_Ingenieria_Agricola)

## A2. SOLICITUD DE PATENTE DERIVADA DE LA TESIS

Título de la invención: Invernadero con Sistema de Enfriamiento de Pared Húmeda que integra un Equipo de Aprovechamiento de Energía Residual.

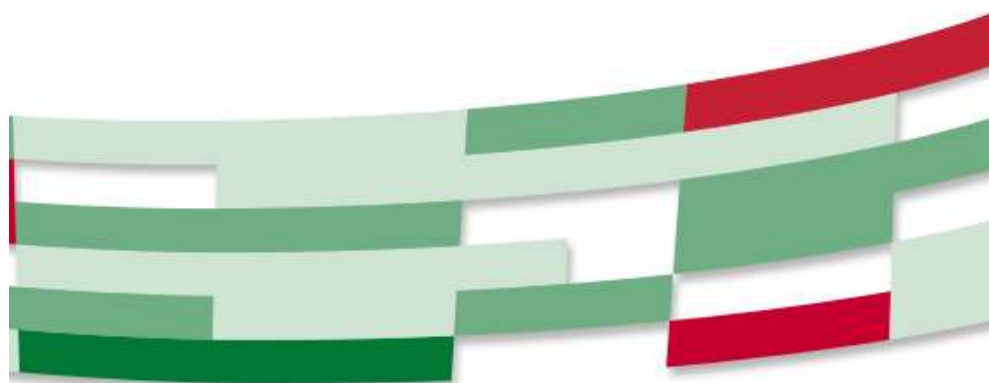
Estado de la patente al 22 de noviembre de 2017: Publicación anticipada en la Gaceta de la Propiedad Industrial de agosto de 2017, que se muestra a continuación:

Gaceta de la  
Propiedad Industrial

México

Solicitudes de Patente

Agosto, 2017



Dirección Divisinal de Patentes

Fecha de Puesta en Circulación

5 de septiembre de 2017



SE  
SECRETARÍA DE ECONOMÍA



## E

- [21] Número de solicitud: MX/a/2016/013840
- [22] Fecha de presentación: 21/10/2016
- [71] Solicitante(s): UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO [MX]; Texcoco, Estado de México, 56230, MX
- [72] Inventor(es): EUGUENI ROMANTCHICK KRIUCHKOVA [MX]; EDUARDO RÍOS URBÁN [MX]; Texcoco, Estado de México, 56230, MX
- [74] Agente: JUAN LUIS MORENO ARELLANO; Irrigación, 28, Col. Chapingo, 56230, Texcoco, Estado de México, México
- [30] Prioridad (es):
- [51] Clasificación CIP: **A01G 13/08** (2006.01)
- [52] Clasificación CPC: **A01G 13/08** (2016.08)
- [54] Título: INVERNADERO CON SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE PARED HUMEDA QUE INTEGRÁ UN EQUIPO DE APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA RESIDUAL.
- [57] Resumen: La invención se refiere a un invernadero con sistema de enfriamiento de pared húmeda que integra un equipo de aprovechamiento de energía residual, del tipo conformado por una estructura metálica de soporte con un recubrimiento translúcido hermético que genera un compartimiento interior de efecto invernadero, con sistemas y elementos de control de factores ambientales como temperatura, iluminación, humedad, ventilación, riego, entre otros, caracterizado porque comprende la asociación de una pared húmeda con un sistema recirculación de agua adaptada para permitir el paso de aire exterior y su enfriamiento para conducirse hacia el interior del invernadero; extractores de aire caliente desde el interior del invernadero dispuestos en una pared opuesta a la pared húmeda para permitir la extracción de volúmenes de aire caliente del interior del invernadero y forzar el ingreso de aire exterior a través de dicha pared húmeda, y que generan flujos de aire a altas velocidades que se descargan hacia el exterior; al menos un deflector, ducto u otro elemento de conducción, redireccionamiento o canalización de aire residual se dispone en la zona de descarga de aire de cada extractor de aire, al final del cual se dispone un eje rotatorio con tres aspas montado en una base de soporte, cuyo movimiento giratorio es transferido o transformado en energía mecánica o eléctrica.