

## Diseño y simulación de un invernadero asistido con energía renovable para Durango

GONZÁLEZ, Mario Humberto<sup>†</sup>, RODRÍGUEZ-MUÑOZ, Norma Alejandra\*, ESCOBEDO-BRETADO, Jorge y MARTÍN-DOMÍNGUEZ, Ignacio

*Cátedras CONACYT en Centro de Investigación en Materiales Avanzados, Calle CIMAV # 110 Ejido Arroyo Seco. Durango, Dgo. 34147, México*

*'Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. - Departamento de Ingeniería sustentable. Calle CIMAV # 110 Ejido Arroyo Seco. CP. 34147. Durango, Dgo. México*

Recibido 7 de Enero, 2017; Aceptado 16 de Marzo, 2017

### Resumen

La agricultura protegida ha tenido un gran avance en México y el mundo debido a las ventajas que presenta en comparación al cultivo tradicional. Algunos beneficios que se obtienen con este tipo de cultivo son uso eficiente del agua, mayor rendimiento por unidad de área y control ambiental. Dependiendo del cultivo y región climática, se puede llegar a requerir una gran cantidad de energía para mantener las condiciones internas. El uso adicional de energía es consecuencia de la incorporación de sistemas de climatización requeridos para mantener los rangos de temperatura óptimos. La región norte de México recibe una gran cantidad de irradiación solar (Durango, Dgo. 2049 kWh/m<sup>2</sup> anual, Meteororm V7.1.11.24422) que puede llegar a satisfacer las necesidades energéticas de un invernadero. El presente trabajo propone un diseño de invernadero asistido con energía solar para el cultivo de tomate en la ciudad de Durango, México. Se presentan resultados de simulaciones por medio del software de simulación dinámica TRNSYS, con el cual se cuantifica el requerimiento energético de un invernadero que utiliza sistemas de bajo consumo energético y solares. A partir de esta simulación se pretende tener un modelo de invernadero solar que sirva de guía para futuros proyectos en la región.

**Invernadero, Simulación dinámica, Energía Renovable, TRNSYS, Energía Solar Térmica**

### Abstract

Protected agriculture has had an important breakthrough worldwide and in Mexico, this due to the advantages that offers in comparison to the traditional methods. Some of its benefits are the efficient use of water resources, better yield per unit area and environmental control. Depending on the crop and the climatic zone, a large amount of energy could be required to maintain the internal optimum conditions. The additional use of energy is due to the incorporation of heating and air conditioning systems in order to maintain the optimum temperature range. The northern region of Mexico receives a great amount of solar irradiation (Durango City, MX. 2049 kWh/m<sup>2</sup> annually, Meteororm V7.1.11.24422) that can satisfy the energetic needs of a greenhouse. In the present work a design of a greenhouse assisted with solar energy is proposed. The greenhouse grows tomatoes in the City of Durango, MX. The software TRNSYS was used to perform the dynamic simulations. The results are used to quantify the energy requirement of a greenhouse that incorporates solar and low energy consumption equipment. The intention of this simulation is to have a solar greenhouse model that can be used as a guideline for future projects within the region.

**Greenhouse, Dynamic Simulation, Renewable Energy, TRNSYS, Solar Heating**

**Citación:** GONZÁLEZ, Mario Humberto, RODRÍGUEZ-MUÑOZ, Norma Alejandra, ESCOBEDO-BRETADO, Jorge y MARTÍN-DOMÍNGUEZ, Ignacio. Diseño y simulación de un invernadero asistido con energía renovable para Durango. Revista de Innovación Sistemática 2017. 1-1:33-45

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: norma.rodriguez@cimav.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

La agricultura protegida (AP) se entiende como el cultivo de plantas, para distintos fines, bajo alguna estructura con el fin de proteger el cultivo de condiciones ambientales adversas, aumentar el rendimiento, hacer uso eficiente del agua y/o obtener productos de mayor calidad (Castilla, 2007).

El sector de la AP ha tenido un gran crecimiento en los últimos años. A nivel mundial, Ponce et al. menciona que a final del siglo pasado había más de 315 mil ha de invernaderos (Ponce, Molina, Cepeda, Lugo, & MacCleery, 2014), mientras que la FAO indica un estimado de 405 mil ha (Papasolomontos et al., 2013).

En 1999, en México, se reporta un total 750 ha (Nieves Garcia, Van der Valk, & Elings, 2011), y para 2016, el Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) reporta un total de 25 mil ha (SIAP, 2016).

Estos datos hacen evidente un crecimiento notable en el sector de la AP, en especial en los invernaderos, con los cuales se obtienen mayores rendimientos, en comparación al cultivo tradicional a cielo abierto. Esta información se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

El invernadero es definido por la NMX-E-255-CNCP-2013 como una construcción agrícola de estructura metálica, usada para el cultivo y/o protección de plantas, con cubierta de película plástica traslúcida que no permite el paso de la lluvia al interior y que tiene por objetivo reproducir o simular las condiciones climáticas más adecuadas para el crecimiento y desarrollo de las plantas cultivadas establecidas en su interior, con cierta independencia del medio exterior y cuyas dimensiones posibilitan el trabajo de las personas en el interior (CNCP, 2013).

Entre las múltiples ventajas de usar invernaderos para producción de cultivos, en comparación al cultivo convencional, se acortan: producción de cultivo fuera de temporada, eficiencia del uso de agua, mayor rendimiento por unidad de área, protección del cultivo ante las condiciones ambientales (viento, lluvia, temperaturas extremas), mayor calidad de productos, control de plagas y enfermedades del cultivo, entre otras (Nieves Garcia et al., 2011; Reddy, 2016; von Zabeltitz, 2011).

Entre sus desventajas se encuentran el alto costo de inversión inicial, los altos costos de operación y el requerir capacitación o conocimiento de su uso para que el proyecto tenga buenos resultados (Nieves Garcia et al., 2011; PESA México, 2007; SIAP, 2016).

Nivel de tecnología	Rendimiento (ton/ha)
Cielo abierto	40
Campo abierto con fertirrigación	120
Casa sombra	160
Invernadero de mediana tecnología	350
Invernadero con alta tecnología	500

**Tabla 1** Rendimientos por hectárea de tomate

*Fuente: Gaxiola Carrasco, 2010*

El alto costo de operación se debe principalmente al uso adicional de energía para climatizar el interior del invernadero, en comparación al cultivo a cielo abierto tradicional (Moreno Reséndez, Aguilar Durón, & Luévano González, 2011). En lugares como la Ciudad de Durango, con un clima Bs en la clasificación Köppen, se presentan temperaturas altas como bajas a lo largo del año, tal como se muestra en la

Gráfico 1. Es por esto que es necesario desarrollar alternativas a los sistemas de climatización tradicionales.

En el presente trabajo se propone la utilización de un sistema de calefacción incorporando energía solar para reducir el consumo de energía, esquematizado en el

Gráfico 1.

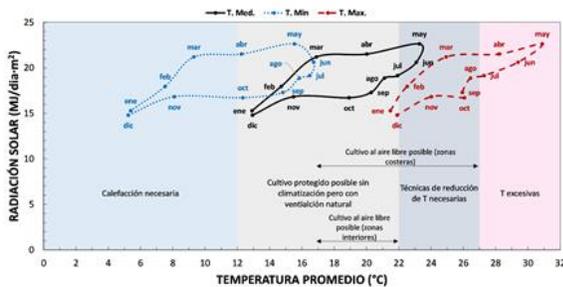


Gráfico 1 Radiación solar contra temperatura del aire para la ciudad de Durango

Fuente: Meteonorm V7.1.11.24422. Adaptada de Nisen et al., 1988

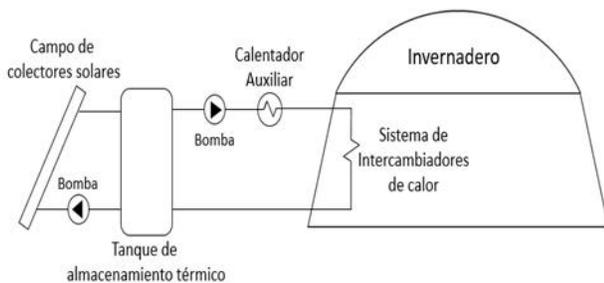


Figura 1 Sistema de calefacción solar asistido propuesto

La simulación se realizó con el software de simulación dinámica TRNSYS 17.

Este software permite la utilización de sistemas de una manera modular, incluyendo la información climática del lugar indicado, por medio del uso del Año Típico Meteorológico (TMY por sus siglas en inglés) y modelando de manera paramétrica, lo cual permite evaluar el comportamiento de sistemas en diferentes escenarios.

En la sección de metodología se muestran a detalle los componentes utilizados en la simulación. En la sección de resultados se presentan y discuten los mismos, los cuales fueron obtenidos de las simulaciones. Por último se muestran las conclusiones y recomendaciones.

### Metodología

### Localización

La simulación se realizó con datos de la ciudad de Durango, Durango (24° 1' 22" N, 104° 39' 16" W) la cual se encuentra a 1890 msnm (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Los datos climáticos se obtuvieron de Meteonorm V7.1.11.24422 en el formato de TMY.

### Invernadero

El invernadero simulado es de tipo túnel sencillo de 180 m<sup>2</sup> de área total, con orientación E-O, altura total de 3.2 m, altura a la canaleta de 2.5 m y 10 m de ancho. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra el modelo en tercera dimensión, el cual se realizó con el software de diseño Sketchup 8, que incluye el complemento Trnsys3d. Este complemento permite exportar el modelo en un formato que pueda ser usado en TRNBuild. TRNBuild es un subprograma de TRNSYS donde se definen las propiedades estructurales y térmicas del invernadero. Las características principales del invernadero se presentan.

GONZÁLEZ, Mario Humberto, RODRÍGUEZ-MUÑOZ, Norma Alejandra, ESCOBEDO-BRETADO, Jorge y MARTÍN-DOMÍNGUEZ, Ignacio. Diseño y simulación de un invernadero asistido con energía renovable para Durango. Revista de Innovación Sistemática 2017

La capacitancia térmica indica la cantidad de energía térmica que puede ser almacenada dentro de la edificación (Antonopoulos & Koronaki, 1998), se calcula mediante la ecuación 1.

$$C = m \cdot c_p \tag{1}$$

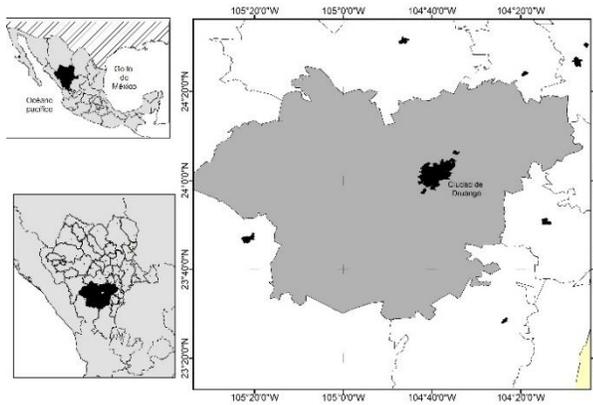


Figura 2 Localización de la ciudad de Durango

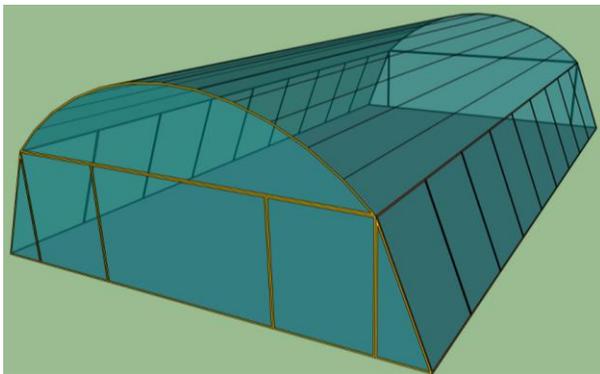


Figura 3 Modelo 3D del invernadero simulado

Superficie de suelo cubierta (m <sup>2</sup> )	180
Superficie de cubierta plástica (m <sup>2</sup> )	321.19
Volumen total de invernadero (m <sup>3</sup> )	572.62
Capacitancia térmica (kJ/K)	27824

Tabla 2 Características del invernadero simulado

Donde  $C$  es la capacitancia térmica,  $m$  es la masa de la sustancia, y  $c_p$  es el calor específico de la misma. Para el cálculo se contabiliza la masa de la estructura del invernadero, del aire contenido dentro del mismo y del cultivo de tomate, el cual se espera tenga un rendimiento de 40 kg/m<sup>2</sup>.

Se realizaron las simulaciones usando dos tipos de cubiertas plásticas, policarbonato (PC) y polietileno de baja densidad (PEBD), las propiedades de estos materiales se encuentran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Propiedades del material	Unidades	PC	PEBD
Conductividad térmica, $k$	W/m·K	0.19	0.45
Espesor	mm	4	0.18
Densidad, $\rho$	kg/m <sup>3</sup>	0.18	0.91
Transmisividad solar, $\tau_{sol}$	-	0.78	0.88
Reflectividad solar, $\rho_{sol}$	-	0.14	0.09
Transmisividad visible, $\tau_{vis}$	-	0.75	0.89
Reflectividad visible, $\rho_{vis}$	-	0.15	0.1
Transmisividad IR, $\tau_{ir}$	-	0.02	0.53
Reflectividad IR, $\rho_{ir}$	-	0.09	0.07
Coef. de pérdidas de calor, $U$	W/m <sup>2</sup> ·°C	5.38	6.831
SHGC	-	0.802	0.884

Tabla 3 Propiedades de las cubiertas plásticas simuladas. Fuente: Valera, Molina, & Álvarez, 2008;  $U$  y  $SHGC$  calculados con Window 7.4

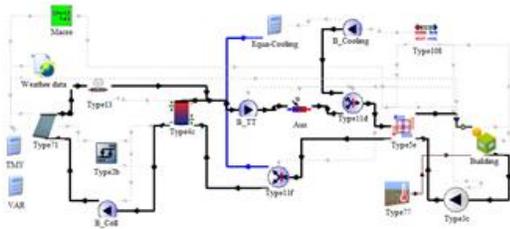
### Simulación

Como se indicó anteriormente, para la simulación se empleó el software TRNSYS 17, el cual ha sido muy utilizado para simular el desempeño de sistemas térmicos.

El programa fue desarrollado por la Universidad de Wisconsin en Estados Unidos, y por su sistema modular, permite construir sistemas a gran detalle y con buena precisión (Almeida, Carvalho, Amorim, Mendes, & Lopes, 2014; Sibbitt et al., 2012). Dichos módulos, dentro del entorno de TRNSYS son llamados “types” en los cuales el usuario alimenta información que luego es utilizada por el programa para realizar la simulación.

### Types de TRNSYS

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra el sistema simulado en TRNSYS, en el que cada ícono representa un “type” en el que se carga información y se generan conexiones con otros types. A continuación se describen los principales.



**Figura 4** Simulación en TRNSYS del sistema de climatización para el invernadero

### Invernadero (Type 56)

Este componente modela el comportamiento de una edificación de múltiples zonas térmicas, en este caso, el invernadero comprende una sola zona térmica. El type lee la descripción del invernadero de distintos archivos externos generados por TRNBuild, donde se describen las características del invernadero.

### Temperatura del suelo (Type 77)

Calcula el cambio de temperatura del suelo a lo largo del periodo de simulación a partir de las características del mismo, previamente indicadas en el componente. Esta temperatura es enviada al type 56 del invernadero

### Datos climáticos (Type 15-2)

A partir de los datos del archivo TMY obtenido de Meteonorm, este type es capaz de generar el clima de la zona seleccionada a pasos de tiempo establecidos, incluyendo, entre otras variables, la temperatura ambiente, la humedad y radiación solar. En el caso del presente trabajo, el clima se generó cada hora.

### Colector solar (Type 71)

Se utilizó un colector solar de tubos evacuados, modelado con curva de eficiencia cuadrática. Las características de este colector son las de un modelo que se comercializa en México. Cada colector tiene un área total de 4.397 m<sup>2</sup>. Los colectores fueron probados a una tasa de flujo de 0.02 kg/s·m<sup>2</sup> y se simularon con una inclinación de 24°. La ecuación 2 describe la eficiencia térmica del colector solar.

$$\eta = 0.437 - 0.9585 \frac{T_i - T_a}{G} - 0.0073 \frac{(T_i - T_a)^2}{G} \quad (2)$$

Donde  $\eta$  es la eficiencia térmica del colector solar,  $T_i$  es la temperatura del agua a la entrada del colector,  $T_a$  es la temperatura ambiente y  $G$  es la radiación solar incidente sobre el colector. Estos datos son obtenidos a partir de la ficha de certificación de la SRCC (Solar Rating & Certification Corporation, 2017).

**Válvula de alivio (Type 13)**

Este modelo monitorea la temperatura del agua en la parte superior del tanque de almacenamiento y permite la liberación de energía al superarse el punto de ebullición del fluido.

**Tanque de almacenamiento estratificado (Type 4c)**

El tanque de almacenamiento o termotanque cuenta con dos salidas y dos entradas de agua. Recibe agua caliente por la parte superior, proveniente del circuito de colectores solares, y sale agua por la parte inferior, a más baja temperatura, hacia el mismo circuito. Este funcionamiento está accionado por un controlador diferencial con histéresis que monitorea ambas temperaturas (superior e inferior) en el tanque. Este se activa cuando hay una diferencia de 10 °C y se desactiva hasta que la diferencia es menor a 1°C. Por el otro lado, el agua caliente sale por la parte superior hacia el circuito del intercambiador de calor, para aprovechar el agua más caliente en el almacenamiento, y el agua a la salida del intercambiador regresa a la parte inferior. El volumen del tanque es de 60 L por cada metro cuadrado de área total del campo de colectores solares.

**Calentamiento auxiliar (Type 6)**

El calentador auxiliar mantiene el agua del tanque de almacenamiento a 60°C, se activa cuando el agua proveniente del circuito de los colectores no alcanza esa temperatura.

**Intercambiador de calor (Type 5e)**

Es un intercambiador de calor agua-aire, de flujos cruzados sin mezclar. A este type se le proporciona el valor del producto UA de 400 W/K, obtenido de un intercambiador comercial, con el flujo de agua y aire especificados por el fabricante. De esta manera, el type calcula la efectividad del intercambiador.

**Bombas de velocidad constante (Type 3d)**

Son las bombas que hacen circular el agua en distintas partes del sistema.

**Ventilador (Type 3c)**

Se encarga de hacer fluir aire por el intercambiador de calor agua-aire, el aire es tomado del interior del invernadero.

**Termostato (Type 108)**

Es el controlador del sistema de climatización. Monitorea la temperatura del aire al interior del invernadero y activa el circuito de enfriamiento cuando la temperatura alcanza 29°C, o de calefacción cuando la temperatura es de 16°C.

**Circuito de enfriamiento**

En esta parte del sistema, no se simula algún equipo comercial en específico. Se compone de una bomba de agua, la cual tiene una temperatura de salida de 2°C. Una vez que pasa por el intercambiador, la temperatura de salida de éste es sensada y se procede a calcular la energía requerida para que alcance nuevamente los 2°C mediante la ecuación 3.

$$Q_{enf} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{i_{HX}} - T_{o_{HX}}) \quad (3)$$

Donde  $Q_{enf}$  es la energía requerida para enfriar el agua,  $\dot{m}$  es el flujo másico del agua,  $c_p$  es el calor específico del agua (4.19 kJ/kg·°C),  $T_{iHX}$  y  $T_{oHX}$  son la temperatura del agua de entrada (2°C) y salida del intercambiador de calor, respectivamente.

### Fracción Solar

La fracción solar es la proporción de energía suministrada por el campo de colectores solares en relación al total de energía demandada para el calentamiento del agua, y se calcula mediante la ecuación 4 descrita por Duffie y Beckman (Duffie & Beckman, 2013) mostrada a continuación:

$$FS = \frac{Q_{total} - Q_{aux}}{Q_{total}} \quad (4)$$

Donde  $FS$  es la fracción solar calculada,  $Q_{total}$  es el total de energía demandada (solar y auxiliar), y  $Q_{aux}$  es la energía suministrada por el calentador auxiliar.

### Procesamiento de datos

Los resultados se procesaron y analizaron por medio de Microsoft Excel, con el que se generaron las gráficas presentadas en la siguiente sección.

### Resultados

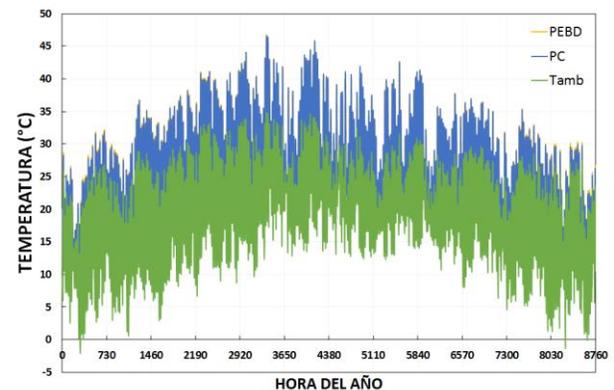
#### Comportamiento térmico del invernadero sin climatización

Se realizaron simulaciones a lo largo de un año (8760 h) con los dos tipos de cubiertas plásticas para conocer la temperatura al interior del invernadero. En el

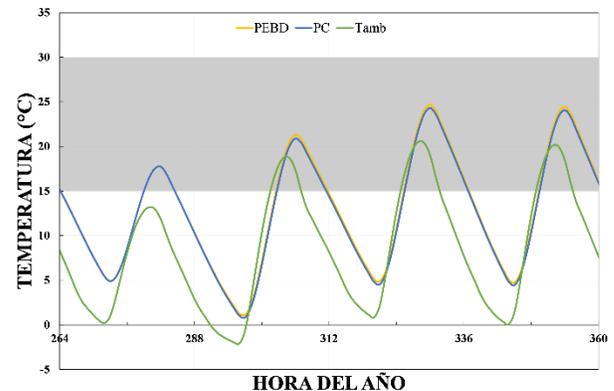
Gráfico 2 se muestran los resultados de estas simulaciones así como la temperatura ambiente a lo largo del año.

Para visualizar el comportamiento de una manera más clara, en los

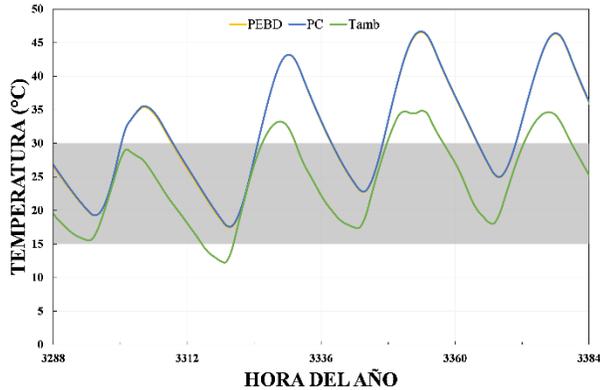
Gráfico 3 se presenta el comportamiento con ambos tipos de cubierta, para periodos del mes de enero y mayo, respectivamente. Estos períodos se eligieron por haber presentado la temperatura más baja y más alta en el año. En ambos gráficos, la franja de color gris representa el rango de temperaturas deseadas al interior del invernadero.



**Gráfico 2** Temperatura horaria a lo largo el año en el interior y exterior del invernadero sin climatizar para ambos tipos de cubierta



**Gráfico 3** Temperatura en el interior y exterior del invernadero sin climatizar, para el período del 12-15 de enero



**Gráfico 4** Temperatura en el interior y exterior del invernadero sin climatizar, para el período del 18-21 de mayo

La temperatura más baja, registrada al interior del invernadero con cubierta de PEBD, fue de 1.11 °C, mientras que con la cubierta de PC fue de 0.83°C, presentándose en ambos casos el 13 de enero a las 9:00. La temperatura más alta se presentó el día 20 de mayo a las 18:00, igualmente en ambos casos, con un valor de 46.56 °C, con cubierta de PEBD, y de 46.67 °C, con cubierta de PC.

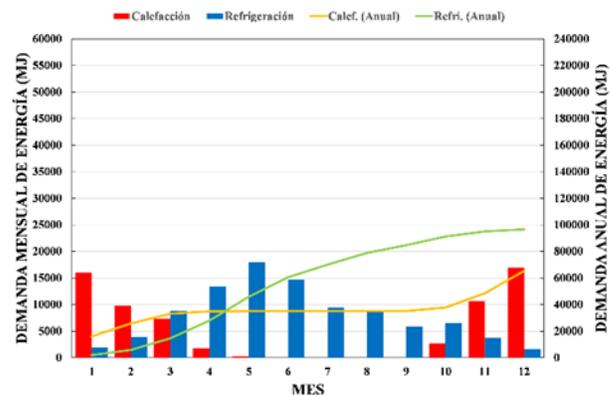
**Consumo base de energía**

Se realizó una simulación a lo largo de un año (8760 h) para conocer el consumo energético para climatizar el invernadero, sin colectores solares instalados para la calefacción. En los Gráfico 5 se muestra el consumo con ambos materiales de cubierta (PC y PEBD).

Es notable la diferencia entre el consumo de energía para calefacción con cubierta de PC Y PEBD. En ambos casos, los meses de enero y diciembre son los de mayor demanda de calefacción. Para el invernadero con PEBD, en diciembre se requirieron 1629 MJ, y con PC 58615 MJ.

El consumo anual de calefacción con PEBD es de 65,379 MJ, y con PC es de 227,609 MJ, el cual es más de tres veces el del PEBD.

En el requerimiento energético para el enfriamiento del invernadero abril, mayo y junio son los meses de mayor demanda. Para mayo fueron requeridos 17,923 y 17,600 MJ, con cubierta de PEBD y PC, respectivamente.



**Gráfico 5** Consumo de energía para climatización del invernadero, para PEBD. Las líneas indican el consumo acumulado de energía a lo largo del año

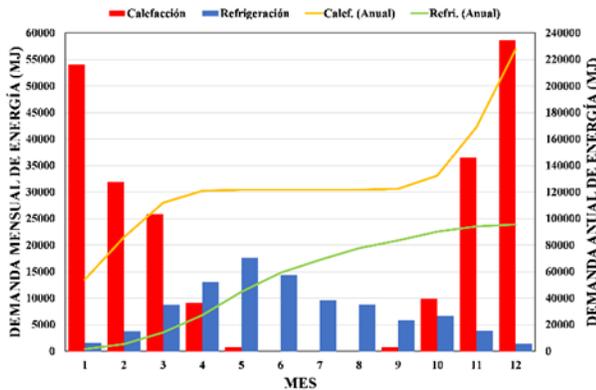
Se observa que a pesar de que la temperatura ambiente está cercana o debajo de los 0°C, el invernadero se mantiene por encima de los 15°C para el período del 12 al 15 enero, mientras que en el período del 18 al 21 de mayo, la temperatura ambiente supera los 34°C, y el interior del invernadero se mantiene por debajo de los 30°C la mayor parte del período, presentando algunos picos que no superan los 31°C.

El consumo anual es similar para ambas cubiertas. Con PEBD es de 96,626 MJ, y con PC es de 95,643 MJ.

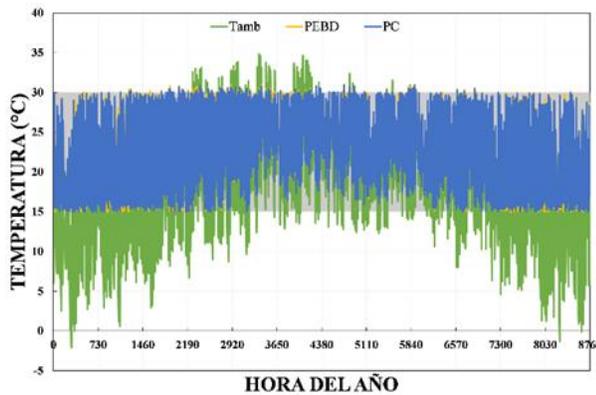
**Comportamiento térmico del invernadero con climatización**

Al incorporar el sistema de climatización, la temperatura al interior del invernadero permanece dentro del rango deseado la mayor parte del año.

En el Gráfico 7 se muestra la temperatura ambiente y al interior del invernadero con ambos tipos de cubiertas, y en los Gráfico 8 se grafican los períodos críticos del año con el invernadero climatizado.



**Gráfico 6** Consumo de energía para climatización del invernadero para PC. Las líneas indican el consumo acumulado de energía a lo largo del año



**Gráfico 7** Temperatura horaria a lo largo el año en el interior y exterior del invernadero climatizado para ambos tipos de cubierta

**Fracción solar**

Generalmente los sistemas solares son diseñados para obtener una fracción solar mínima (Escobedo Bretado & Martín-Domínguez, 2016), en el sistema propuesto se busca obtener una FS de al menos 0.60, la cual se alcanza con 8 colectores (FS=0.632), ya que con 7 colectores, aún no se cumple con este valor mínimo propuesto (FS=0.589). El comportamiento de la FS es muy similar sin importar el tipo de cubierta, lo cual se ilustra en el Gráfico 10.

**Energía consumida para climatización de invernadero**

Una vez definido el número de colectores, se comparó el consumo base de energía con el consumo después de incorporar el sistema de colectores solares, lo cual se puede observar en el

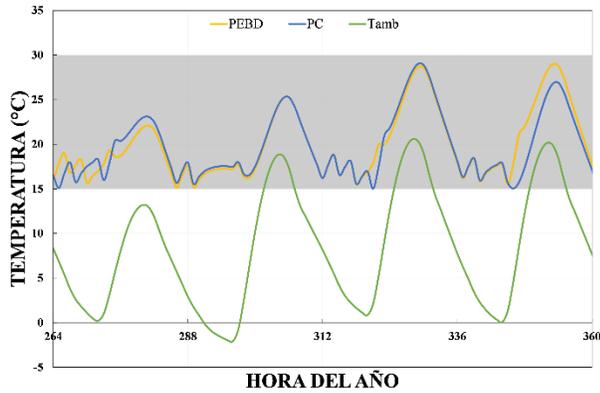
Gráfico 11. El requerimiento energético para enfriar el agua en el circuito de enfriamiento es de 95.64 GJ y 96.63 GJ, para PC y PEBD, respectivamente, sin importar si está o no instalado el sistema solar. Para la calefacción, con la cubierta de PC es muy notoria la disminución del consumo. Cuando no hay colectores instalados, se requieren 227.6 GJ en el año, y con el sistema solar en funcionamiento, el consumo anual se reduce a 52.35 GJ. Para el invernadero con cubierta de PEBD, cuando no hay colectores solares en funcionamiento, el consumo es de 65.38 GJ, y de 51.94 GJ con los colectores funcionando.

**Energía liberada por la válvula de alivio**

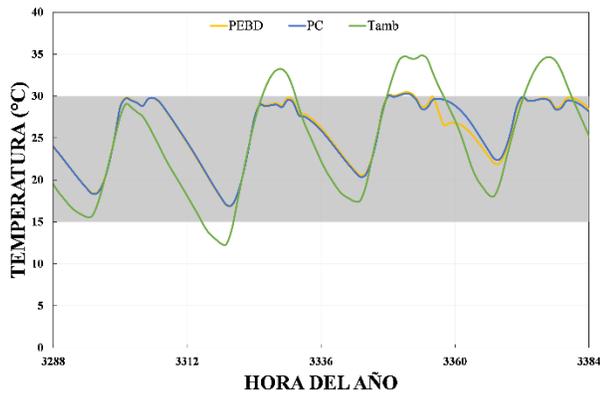
Se contabilizó la energía liberada por la válvula de alivio a lo largo del año, esta energía se puede considerar como no aprovechada. En el Gráfico 12 se muestra la energía liberada por

mes y acumulada a lo largo del año, para el invernadero con cubierta de PC y PEBD.

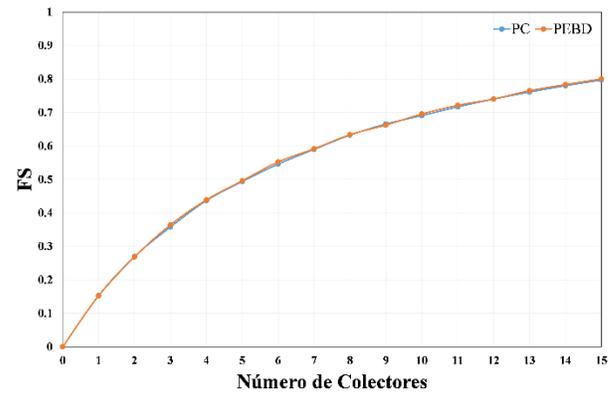
En el período de primavera y verano es cuando se observa un mayor rechazo de energía, ocasionado principalmente por el estancamiento del agua en el circuito solar.



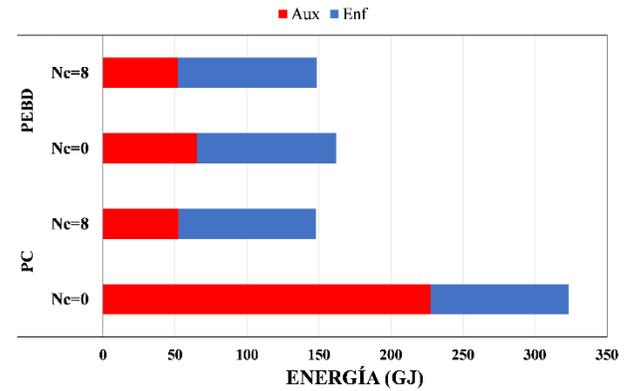
**Gráfico 8** Temperatura en el interior y exterior del invernadero con climatización, para el período del 12-15 de enero



**Gráfico 9** Temperatura en el interior y exterior del invernadero con climatización, para el período del 18-21 de mayo



**Gráfico 10** Cambio de la fracción solar (FS) con respecto al número de colectores solares instalados

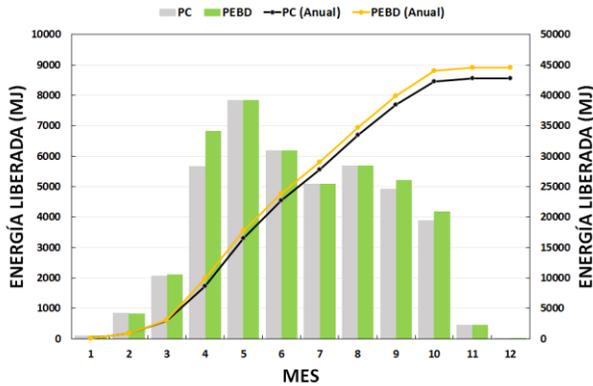


**Gráfico 11** Comparación del requerimiento energético anual para climatización del invernadero, evaluando ambas cubiertas. Nc representa el número de colectores instalados

**Sistema de climatización propuesto**

Con base a los resultados obtenidos, en la Tabla 4 se muestran las características del sistema de climatización para el invernadero.

Las capacidades mínimas del calentador auxiliar y del sistema de enfriamiento se determinaron luego de analizar los picos de demanda de la simulación con 8 colectores solares, y se comprobó con otra simulación, con estas capacidades, si se cumplían los rangos de temperatura deseados.



**Gráfico 12** Energía liberada por la válvula de alivio, de manera mensual y acumulada a lo largo del año

Característica	Cant.	Unidad
Colectores solares	8	-
Intercambiadores de calor	5	-
Capacidad min. calentador aux.	62	kW
Capacidad min. sistema de enf.	40.7	kW

**Tabla 4** Características del sistema de climatización propuesto

**Conclusiones**

Se analizó el comportamiento de un invernadero de túnel sencillo, de 180 m<sup>2</sup>, con un sistema de calefacción asistido con energía solar, evaluando dos cubiertas plásticas mediante el uso de un software de simulación dinámica en la ciudad de Durango, Durango.

El uso de estos programas de simulación, provee información valiosa para el diseño y optimización de sistemas térmicos.

La temperatura interior del invernadero sin climatizar, no se mantiene dentro del rango óptimo necesario para el cultivo, por lo que es necesario utilizar sistemas de climatización a lo largo del año. La incorporación de sistemas solares para climatizar invernaderos supone un ahorro en el consumo de energía destinada a la calefacción, en la ciudad de Durango. En el caso del invernadero con cubierta de policarbonato, el ahorro de energía para la calefacción es significativo en comparación al de polietileno de baja densidad.

La diferencia en el requerimiento energético anual debido al cambio de cubiertas plásticas es muy poca, menor al 1%, de ambas cubiertas, la que menor energía requiere es la de PC, la cubierta de PEBD es la que menor cantidad de energía requiere para calefacción, caso contrario en la energía requerida para enfriamiento. Por lo que es necesario realizar un análisis económico para elegir la cubierta apropiada y la configuración del sistema completo de climatización que mejores beneficios económicos otorgue.

La energía requerida para el enfriamiento del invernadero es solo un parámetro que indica la cantidad de energía que es necesaria extraer al agua utilizada en el circuito de enfriamiento, para evaluar algún equipo comercial, es necesario tomar en cuenta la eficiencia del mismo, entre otras características.

La energía liberada por la válvula de alivio podría ser utilizada en algún otro proceso, o se podría almacenar sobre todo en los periodos donde el calentador auxiliar no es requerido para su posterior uso en meses de alta carga por calefacción.

GONZÁLEZ, Mario Humberto, RODRÍGUEZ-MUÑOZ, Norma Alejandra, ESCOBEDO-BRETADO, Jorge y MARTÍN-DOMÍNGUEZ, Ignacio. Diseño y simulación de un invernadero asistido con energía renovable para Durango. Revista de Innovación Sistemática 2017

## Agradecimiento

Se agradece el apoyo económico recibido por parte del Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CeMIE-Sol), a través del Proyecto:

P13 “Laboratorios de pruebas para baja y media temperatura, laboratorio para el diseño e integración de sistemas termo solares asistido por computadora”

Pertenece a la Convocatoria 2013-02, del:  
Fondo SECTORIAL CONACYT - SENER - SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA.

Para el desarrollo y presentación de éste trabajo.

## Referencias

Almeida, P., Carvalho, M. J., Amorim, R., Mendes, J. F., & Lopes, V. (2014). Dynamic testing of systems - Use of TRNSYS as an approach for parameter identification. *Solar Energy*, 104, 60–70. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.02.010>

Antonopoulos, K. A., & Koronaki, E. (1998). Apparent and effective thermal capacitance of buildings. *Energy*, 23(3), 183–192. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(97\)00088-1](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(97)00088-1)

Castilla, N. (2007). *Invernaderos de plástico: tecnología y manejo*. Mundi-Prensa Libros.  
CNCP. (2013). NORMA MEXICANA INVERNADEROS DE CUBIERTAS PLÁSTICAS - DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN - ESPECIFICACIONES. Naucalpan de Juárez, México: Diario Oficial de la Federación.

Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley.

Escobedo Bretado, J., & Martín-Domínguez, I. (2016). Determinación del requerimiento energético para calefacción en un invernadero agrícola y dimensionamiento del sistema Termosolar-Gas L . P . requerido para su suministro óptimo. *Revista de Aplicaciones de La Ingeniería*, 3(9), 150–159.

Gaxiola Carrasco, H. (2010). Importancia de Sinaloa y México en la agricultura protegida. *Revista Ciencia Y Universidad*, 29, 69.

Moreno Reséndez, A., Aguilar Durón, J., & Luévano González, A. (2011). Características de la agricultura protegida y su entorno en México. *Revista Mexicana de Agronegocios*, XV(29), 763–774.

Nieves Garcia, V., Van der Valk, O., & Elings, A. (2011). Mexican protected horticulture Production and market of Mexican protected horticulture described and analysed. *Wageningen UR Greenhouse Horticulture*, 31, 108.

Nisen, A., Grafiadellis, M., Jiménez, R., La Malfa, G., Martínez-García, P. F., Monteiro, A., ... Baudoin, W. (1988). *Cultures protégées en climat méditerranéen*. Rome: FAO. Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?id=b7bcRyV2E1gC>

Papasolomontos, A., Baudoin, W., Litaladio, N., Castilla, N., Baeza, E., Montero, J. I., ... Abou Hadid, A. F. (2013). *Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops: : principles for mediterranean climate areas*. *FAO Plant Production and Protection Paper*. Rome.

PESA México. (2007). Producción de hortalizas a cielo abierto y bajo condiciones protegidas Contenido.

Ponce, P., Molina, A., Cepeda, P., Lugo, E., & MacCleery, B. (2014). *Greenhouse Design and Control*. CRC Press.

<https://doi.org/10.1201/b17391>

Reddy, P. P. (2016). *Sustainable Crop Protection under Protected Cultivation*. Springer Science + Business Media. Singapore: Springer

<https://doi.org/10.1007/978-981-287-952-3>

SIAP. (2016). Atlas Agroalimentario 2016. México: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Retrieved from [http://nube.siap.gob.mx/gobmx\\_publicaciones\\_siap/pag/2016/Atlas-Agroalimentario-2016](http://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2016/Atlas-Agroalimentario-2016)

Sibbitt, B., McClenahan, D., Djebbar, R., Thornton, J., Wong, B., Carriere, J., & Kokko, J. (2012). The performance of a high solar fraction seasonal storage district heating system - Five years of operation. *Energy Procedia*, 30, 856–865.

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.097>

Solar Rating & Certification Corporation. (2017). SRCC. Retrieved July 29, 2017, from <http://www.solar-rating.org/>

Valera, D., Molina, F., & Álvarez, A. (2008). *Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos*.

von Zabeltitz, C. (2011). *Integrated Greenhouse Systems for Mild Climates*. *Integrated Greenhouse Systems for Mild Climates: Climate Conditions, Design, Construction, Maintenance, Climate Control*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-14582-7>