

Determinación del requerimiento energético para calefacción en un invernadero agrícola y dimensionamiento del sistema Termosolar-Gas L.P. requerido para su suministro óptimo

Determination of the energy requirement for heating in an agricultural greenhouse and sizing of the Thermosolar-Gas L.P. system required for optimal supply

ESCOBEDO-BRETADO, Jorge^{†*} & MARTÍN-DOMINGUEZ, Ignacio

Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. - Unidad Durango (CIMAV-Dgo) Victoria 147 Norte. Zona Centro Histórico. 34000 Durango, Dgo. México.

ID 1^{er} Autor: *Jorge, Escobedo-Bretado*

ID 1^{er} Coautor: *Ignacio, Martín-Domínguez*

DOI: 10.35429/JCS.2020.12.4.1.8

Recibido: 10 de Julio, 2020; Aceptado 30 de Diciembre, 2020

Resumen

Se presenta el análisis térmico por simulación de un invernadero agrícola para tomate Saladette, existente en Chihuahua, mediante la plataforma computacional TRNSYS, para el dimensionamiento requerido del sistema de calefacción. Se presentan las características constructivas del invernadero y su situación geográfica así como las características de desarrollo óptimas del cultivo de tomate Saladette para sus diferentes etapas. Se presenta el comportamiento térmico estimado del invernadero, para su operación sin calefacción. Se hace una propuesta de equipamiento requerido para la calefacción del invernadero, considerando sus características físicas actuales y su localización geográfica. Se realiza la proyección financiera del sistema de calentamiento híbrido solar-gas, para el sistema funcional con una fracción solar del 72%, utilizando colectores solares de tubos evacuados.

Abstract

A thermal analysis for the simulation of an agricultural greenhouse tomato Saladette, existing in Chihuahua, by computing platform TRNSYS, for the required sizing of the heating system is presented. The construction characteristics of the greenhouse and its geographical location and the characteristics of optimal development of growing tomato Saladette different stages are presented. The estimated greenhouse thermal behavior, for operation without heating is presented. A proposal for equipment required for heating the greenhouse is made, considering his current physical characteristics and geographic location. The financial projection of the heating system solar-gas hybrid, for functional system with a solar fraction of 72% is made, using evacuated tube solar collectors.

Invernadero Agrícola, Calefacción Solar, Simulación TRNSYS, Proyección Financiera

Agricultural Greenhouse, Solar Heating, TRNSYS Simulation, Financial Projection

Citación: ESCOBEDO-BRETADO, Jorge & MARTÍN-DOMINGUEZ, Ignacio. Determinación del requerimiento energético para calefacción en un invernadero agrícola y dimensionamiento del sistema Termosolar-Gas L.P. requerido para su suministro óptimo. 2020. 4-12:1-8.

* Correspondencia al autor (Correo electrónico: jorge.escobedo@cimav.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor

Introducción

La industria agrícola puede utilizar energía solar para la climatización de un invernadero incrementando así su producción. Existe actualmente en el mercado una gran variedad de tipo de tecnología para captar, almacenar y poner a disposición energía térmica solar para la climatización de un invernadero. Determinar el diseño integral del sistema óptimo de esta tecnología resulta complicado debido a la variación intrínseca de las variables ambientales como temperatura, humedad, radiación solar entre otras, además del perfil de carga en la demanda energética (Souliotis M. et al., 2009). El software TRNSYS puede mostrar diferentes escenarios para poder comparar el comportamiento de las diferentes configuraciones y dimensiones de tecnología para aprovechamiento de energía solar con un error menor del 5% (Almeida P, et al., 2014). Los autores coinciden en la profunda complejidad de las variables que intervienen en un invernadero y su interdependencia, variables como tamaño, diseño y material constructivo del invernadero, variables propias del cultivo como temperatura, humedad relativa, dióxido de carbono, transpiración y variables ambientales como temperatura, humedad relativa, radiación solar entre muchas otras (Attar et al., 2013), (Kolokotsa et al., 2010), (Chargui y Sammouda, 2014), (Amir Vadiie y Viktoria Martin, 2013), (Tsoutsos et al., 2010), (Kamel y Fung, 2014), (Aye et al., 2010), (Candy et al., 2012). En la revisión de la literatura no se encontró algún modelo genérico en TRNSYS o cualquier otro tipo de software que se alimente de coordenadas geográficas, condiciones ambientales y características constructivas de un invernadero para el análisis energético técnico y económico completo de un invernadero. Una simulación dinámica puede ayudar a entender el comportamiento térmico a lo largo periodos extendidos de tiempo de un invernadero localizado en el norte de México.

Objetivo

Diseñar el sistema de calefacción de un invernadero agrícola para tomate Saladette, mediante la plataforma computacional TRNSYS. Seleccionar el equipamiento que satisfaga técnica y económicamente los requerimientos necesarios para el óptimo desarrollo del tomate en temporada de invierno con una fracción solar mayor al 60%.

Metodología

Se desarrolló un modelo de un sistema solar térmico para satisfacer las demandas de calefacción de un invernadero de ambiente controlado altamente tecnificado. En el invernadero en estudio se produce Tomate Saladette en sus variedades Moctezuma y Cuauhtémoc.

Problemática

El invernadero debe satisfacer los requerimientos de temperatura, humedad y concentración de CO₂ en sus valores óptimos propuestos por la comisión veracruzana de comercialización agropecuaria.

- Temperatura: 15°C y 30°C (durante todas sus etapas productivas).
- Humedad: 60% y 80%.
- Concentración de CO₂: 700-800 ppm.

Para lograr las condiciones anteriores simultáneamente el invernadero debe estar cerrado creando un ambiente controlado. Con estas medidas mejora el manejo de la humedad y de la concentración del CO₂, sin embargo, la temperatura debe ser tratada con mayor cuidado.

Características del Invernadero

Localización geográfica

El invernadero está ubicado dentro del Parque Agroindustrial Naica, Municipio de Saucillo, Chihuahua. Sus coordenadas geográficas son 28.06 N y -105.53 W y se encuentra en una altitud media de 1,415 metros sobre el nivel del mar.



Figura 1 Localización de la ciudad de Delicias, Chihuahua, México

Tipo de Tecnología

El invernadero en estudio es un invernadero multi-capilla producto de una empresa canadiense. Estos invernaderos son ideales para las operaciones mediana y fuertemente automatizadas. El invernadero cuenta con 9 capillas distribuidas en un área superficial de 1.6 hectáreas y un volumen aproximado de 100,000 m³.

La envoltura de doble pared de Polietileno es sostenida por estructuras metálicas.



Figura 2 Tipo de tecnología de invernadero utilizada

Control climático actual

Actualmente el invernadero no cuenta con sistemas activos de climatización, únicamente con una envoltura de plástico de doble pared y ventilación natural que se induce abriendo los sistemas de ventilas situados en las paredes laterales y en la parte superior de la estructura, mediante la apertura mecanizada.

Sistema de calefacción propuesto

En la figura 3 se muestran los componentes principales del sistema de calefacción propuesto.



Figura 3 Esquema del sistema de calefacción solar asistido por gas propuesto

Modelos TRNSYS utilizados

Edificio con zonas térmicas

Para modelar el invernadero se utilizó el Type 56 de TRNSYS. Este componente modela el comportamiento térmico de un edificio, así como la energía necesaria para su climatización.

El modelo del invernadero se desarrolla en el paquete SketchUp creando una zona térmica con la figura constructiva del invernadero real. El Type 56 de TRNSYS es capaz de leer los datos del invernadero desarrollado en SketchUp y permite analizar los balances de energía en cada superficie de la construcción.

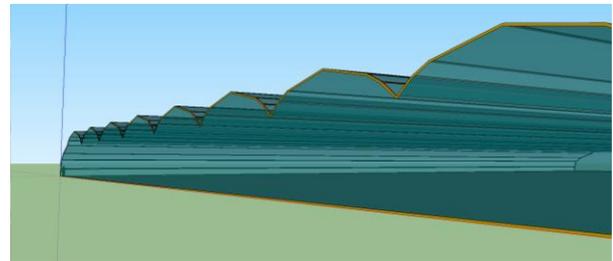


Figura 4 Implementación del invernadero en SketchUp

Generador de clima

Los datos climáticos correspondientes a la ciudad de Delicias Chihuahua y son generados por el modelo de Generador de Clima de TRNSYS. Este modelo tiene la capacidad de leer datos en intervalos regulares de tiempo a partir de un archivo de datos climáticos externo (TMY, año típico meteorológico). Este modelo interpola los datos (incluyendo la radiación solar para superficies inclinadas) y los pone a disposición para otros componentes de TRNSYS con un paso de simulación menor a una hora si así se desea.

Colectores solares

Se utilizó el modelo con curva de eficiencia térmica cuadrática. Los colectores solares de tubos evacuados a utilizarse corresponden a un modelo disponible comercialmente en México, pero con fabricación y prueba en Estados Unidos. Los colectores están dotados de un área total de 4.4 m² cada uno. La tasa de flujo de prueba del colector fue de 0.02 kg / s · m². La ecuación 1 describe el comportamiento de la eficiencia térmica del colector.

$$n = 0.442 - 0.968 \left(\frac{T_i - T_{Amb}}{I} \right) - 0.0071 \left(\frac{T_i - T_{Amb}}{I} \right)^2 \quad (1)$$

Donde n es la eficiencia térmica del colector, T_i es la temperatura de agua de entrada al colector, T_{Amb} es la temperatura ambiente e I es la radiación solar incidente sobre el colector solar (datos de la ficha técnica expedida por la Solar Rating & Certification Corporation).

Caldera auxiliar a gas

El calentador auxiliar considerado en la simulación (type 6) tiene una capacidad de 1,000 kW. El calentador mantiene la temperatura del agua del tanque a 60 °C en caso de que la energía captada por los colectores no alcance esa temperatura.

Termo tanque estratificado

El termo tanque se simula utilizando el modelo de tanque estratificado de TRNSYS (type 4a). Cuenta con dos entradas y dos salidas de agua. El agua sale del tanque estratificado hacia los colectores por la parte inferior y regresa hacia la parte superior, aprovechando así la temperatura más baja del tanque para una mayor eficiencia de los colectores solares.

El agua sale del tanque hacia los intercambiadores de calor por la parte superior y regresa por la parte inferior, aprovechando así la temperatura más elevada del agua del tanque.

Bombas de velocidad constante

Para la simulación de las bombas se utilizó el type 110, la bomba que hace circular el agua por el campo de colectores arranca cuando la diferencia de temperaturas entre el agua de la parte inferior y superior del tanque alcanza una diferencia de 10°C. El encendido de la bomba se controla con un controlador basado en histéresis. Intercambiadores de calor

El intercambiador de calor se modeló con el componente de intercambiador de calor a contra corriente (type 5b). Se basa en la aproximación de efectividad de capacitancia mínima de un intercambiador de calor. En este modelo, el usuario proporciona un coeficiente global de transferencia de calor (UA), así como los flujos propuestos de ambos fluidos. Los fluidos son agua-aire.

Ventiladores

Este modelo permite mantener una corriente de flujo constante de aire hacia el intercambiador de calor agua-aire. Las propiedades del aire se toman del aire dentro del invernadero. La corriente de flujo de aire es introducida en kg/h. En TRNSYS, el ventilador es el Type 3.

El ventilador es capaz de entregar características del aire como temperatura y flujo, además de características del ventilador como la energía eléctrica consumida.

Diversores y mezcladores de flujos

Este modelo permite dividir o mezclar flujos de agua ya sea en proporciones determinadas o ajustables. En TRNSYS este dispositivo lo representa el Type 11.

Simulación del sistema

Se simuló la operación del sistema durante periodos de un año, realizando cálculos cada 15 minutos (paso). Las condiciones climáticas son idénticas para cada corrida y corresponden a un año típico en la ciudad de Delicias, Chih. Los resultados generados por TRNSYS se muestran gráficamente en pantalla con resolución de 15 minutos. Los diversos flujos térmicos calculados fueron integrados en periodos de un día y un año, para obtener resultados diarios y anuales.

Resultados

Los resultados se presentan en graficas de temperaturas obtenidas del simulador y en tablas con datos procesados basados en un análisis paramétrico.

Temperatura de Invernadero sin calefacción

El comportamiento anual de temperaturas de aire ambiente dentro y fuera del invernadero puede verse en los resultados de la simulación mostrada en la figura 5. Se observan líneas punteadas paralelas indicando el intervalo de la temperatura de confort del cultivo. Se observa que la temperatura ambiente dentro del invernadero, en invierno y verano, esta generalmente fuera de dicho confort.

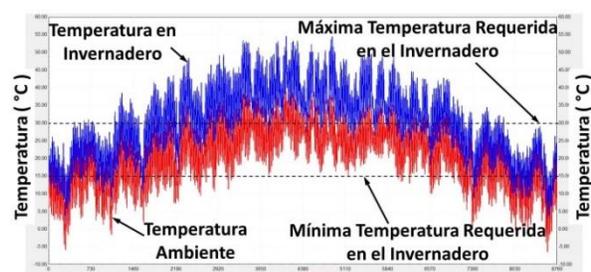


Figura 5 Temperaturas ambiente fuera y dentro del invernadero sin climatizar

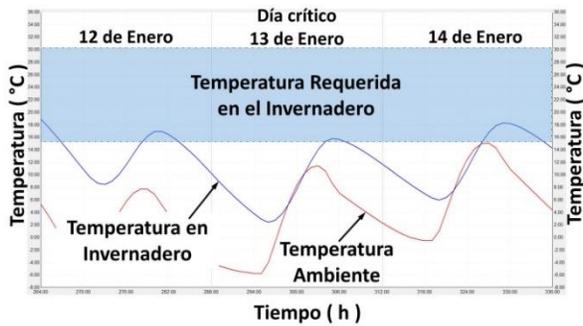


Figura 6 Temperaturas fuera del intervalo de confort

Temperatura de Invernadero con calefacción

La figura 7 muestra el comportamiento térmico del invernadero con el equipo solar propuesto. Se observa que en temporada invernal la temperatura en el invernadero se encuentra dentro del intervalo requerido cercana a la línea inferior.

El día que presenta la temperatura ambiente más baja del año es el 13 de enero con -6°C . Para ese día y con el equipo solar que se recomienda en este trabajo, la temperatura en el invernadero se encuentra dentro de la temperatura requerida.

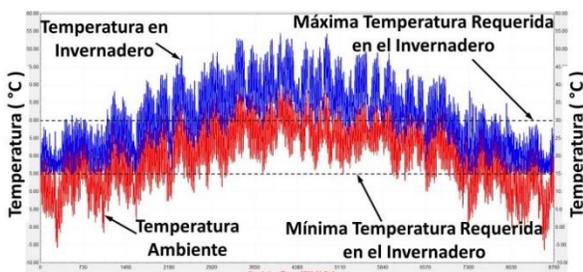


Figura 7 Temperaturas ambiente fuera y dentro del invernadero climatizado

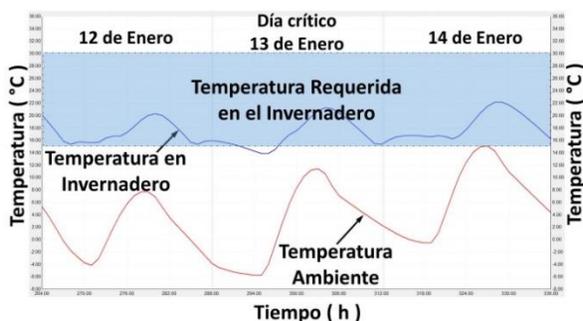


Figura 8 Temperaturas dentro del intervalo de confort

Fracción solar

La fracción solar (FS) ya sea mensual o anual, es la fracción del total de energía que es abastecida por el sistema solar y se puede calcular por medio de la ecuación de Buckles y Klein (Hobbi, 2009) la cual se muestra a continuación:

$$FS = \frac{(Q_{Carga} - Q_{Auxiliar})}{Q_{Carga}} \quad (2)$$

Donde Q_{carga} es el total de energía requerida y $Q_{auxiliar}$ es la energía aportada por el sistema auxiliar (en este caso la caldera). La importancia de conocer la fracción solar radica en que es un indicador del desempeño global del sistema y no sólo de algún componente. El código español energético para edificios recomienda una fracción solar mínima del 60%.

Número de colectores

Frecuentemente los sistemas solares son diseñados para obtener una fracción solar en particular, es decir, para obtener un cierto nivel deseado en la sustitución de energía convencional (Domínguez et al., 2012).

La simulación se configuró manera que se obtuviera un valor alrededor del recomendado, obteniendo con ello que 300 colectores solares de tubos evacuados son necesarios para obtener el 72%.

Volumen de almacenamiento térmico

De acuerdo con los resultados obtenidos en la simulación para las diferentes relaciones: volumen de almacenamiento / área de captación, se observó que el comportamiento térmico más favorable, se tiene cuando la relación se fija en 50 litros por cada metro cuadrado de área de colección.

Diseño recomendado para calentamiento

El equipo requerido para satisfacer la demanda de calefacción con fracción solar de 72% se presenta en la siguiente tabla.

Equipo	Recomendado FS = 72%	Precio Unitario
Colectores solares de tubos evacuados, heat pipe con cabezal	300	\$10,000
Almacenamiento térmico @ 50 L/m ²	75 m ³	\$80,000 / 25 m ³
Intercambiadores de calor	140	\$9,000
Caldera Auxiliar de 1000 kW	1	\$750,000

Tabla 1 Características del equipo que conforma el sistema solar asistido por gas propuesto

En los casos de colectores, intercambiadores y caldera, los modelos y cantidades recomendadas están basados en la disponibilidad actual de información técnica y precios.

Proyección financiera para calentamiento

Se realizó la proyección financiera de los costos de operación del invernadero, para comparar el costo de calentamiento, climatizándolo con gas, contra el costo que resulta al incluir equipamiento solar.

Los costos que se consideran para el análisis preliminar son:

- Consumo de gas sin apoyo solar.
- Consumo de gas cuando se tiene apoyo solar, con las dos diferentes fracciones solares reportadas.
- Costo de adquisición estimado de colectores solares

Los costos que no se toman en cuenta en este análisis son:

- Adquisición de la caldera.
- Almacenamiento térmico.
- Intercambiadores de calor

Debido a que dichos equipos se requieren en ambas opciones.

Para este análisis se obtienen los consumos de gas incurridos por calefacción durante un año completo de operación, para dos configuraciones analizadas.

- Sistema basado solo en gas L.P. FS = 0.
- Sistema con 300 colectores solares FS = 72%.

Dado que la vida útil de los equipos se estima en 25 años, se tiene que el consumo energético de cada configuración se mantendrá igual durante toda la vida útil, pero el costo del gas sufre un aumento de precio anual conocido del 9%, y la inflación en México es del 4%. Con lo anterior se tienen flujos de efectivo al inicio del periodo de tiempo analizado, originados por la inversión requerida para la adquisición de los colectores solares. Los costos de operación resultantes del consumo de gas en cada opción, se considera que ocurren al final de cada año, y van en aumento debido al aumento constante del precio del gas. Se tienen 25 años de operación, y para poder analizar el valor financiero de las diferentes opciones se trasladan los costos anuales a valor presente, sumándose con los costos de adquisición de los colectores solares. Con ello se obtiene el monto total, el valor financiero de cada opción de diseño analizada, que ya pueden compararse entre sí para evaluar las opciones de diseño.

	FS = 0	FS = 72%
Consumo de gas (\$)	11,870,054	3,561,304
Colectores solares (\$)	0	3,000,000
Valor financiero @ 25 años (\$)	11,870,054	6,561,304

Tabla 2 Resumen de proyección financiera

Conclusiones

Se diseñó el sistema de calefacción de un invernadero agrícola para tomate Saladette, mediante la plataforma computacional TRNSYS.

Se determinó el equipamiento que satisface técnica y económicamente los requerimientos necesarios para el óptimo desarrollo del tomate en temporada de invierno con una fracción solar del 72%.

Del análisis preliminar se observa que el valor financiero del proyecto resulta favorable para la utilización de energía solar, aun y cuando solo se está considerando el uso del sistema de colección solar para calefacción del invernadero.

Debe observarse que durante todo el verano el sistema es capaz de seguir colectando energía que tiene un valor superior al utilizado durante el periodo invernal. Esto es fácilmente apreciable del hecho que el periodo sin requerimiento de calefacción es más largo, y la disponibilidad de energía solar durante ese periodo también es superior al invernal.

Dicha energía requiere ser utilizada para aprovechar su valor, posiblemente para producir agua fría y usarla en la refrigeración del invernadero, o bien usarla en algún proceso adicional que pueda agregar valor a los excedentes de tomate o a los desperdicios generados durante el proceso.

Los precios mostrados en tablas no incluyen costos de instalación.

Agradecimientos

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” Perteneciente a la Convocatoria 2013-02, del: Fondo SECTORIAL CONACYT - SENER - SUSTENTABILIDAD ENERGÉTICA. Para el desarrollo y presentación de este trabajo. Jorge Alberto Escobedo Bretado

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.

Amir Vadiie, Viktoria Martin. (2013). Energy analysis and thermoeconomic assessment of the closed greenhouse – The largest commercial solar building. *Applied Energy* 102 1256–1266

Amir Vadiie, Viktoria Martin. (2013). Thermal energy storage strategies for effective closed greenhouse design. *Applied Energy* 109 337–343

Attar, I., Naili, N., Khalifa, N., Hazami, M., Farhat, A. (2013). Parametric and numerical study of a solar system for heating a greenhouse equipped with a buried exchanger. *Energy Conversion and Management*. 70 (2013) 163–173

Aye Lu, Fuller R.J., Canal A. (2010). Evaluation of a heat pump system for greenhouse heating. *International Journal of Thermal Sciences* 49 202–208

Candy Seona, Moore Graham, Freere Peter. (2012). Design and modeling of a greenhouse for a remote region in Nepal. *Procedia Engineering* 49 (2012) 152 – 160

Castellanos, Javier Z. (2004). Manual de producción hortícola en invernadero. 2da Edición. INTAGRI.

Chargui R., Sammouda H. (2014). Modeling of a residential house coupled with a dual source heat pump using TRNSYS software. *Energy Conversion and Management* 81 384–399

Domínguez F., Cejudo J., Carrillo A., Ruivo C. (2012). Design of solar thermal systems under uncertainty. *Energy and Buildings* 47, 474-484.

Hobbi Alireza, Siddiqui Kamran. (2009). Optimal design of a forced circulation solar water heating system for a residential unit in cold climate using TRNSYS. *Solar Energy* 83, 700–714.

Kamel Raghad S., Fung Alan S. (2014). Modeling, simulation and feasibility analysis of residential BIPV/T+ASHP system in cold climate—Canada. *Energy and Buildings* 82 758–770

Kolokotsa D., Saridakis G., Dalamagkidis K., Dolianitis S., Kaliakatsos I. (2010). Development of an intelligent indoor environment and energy management system for greenhouses. *Energy Conversion and Management* 51 (2010) 155–168

León Gallegos. (2006). Guía para el cultivo de tomate en invernadero. 2da Edición.

Marshall L. Sweet, James T. McLeskey Jr. (2012). Numerical simulation of underground Seasonal Solar Thermal Energy Storage (SSTES) for a single family dwelling using TRNSYS. *Solar Energy* 86, 289-300.

Mashonjowa, E., Ronsse, F., Milford, J.R., Pieters, J. G. (2013) Modelling the thermal performance of a naturally ventilated greenhouse in Zimbabwe using a dynamic greenhouse climate model. *Solar Energy* 91 381–393.

Souliotis M., Kalogirou S., Tripanagnostopoulos Y. (2009). Modelling of an ICS solar water heater using artificial neural networks and TRNSYS. *Renewable Energy* 34, 1333–1339

Tsoutsos T, Aloumpi E, Gkouskos Z, Karagiorgas M. (2010). Design of a solar absorption cooling system in a Greek hospital. *Energy and Buildings* 42 265–272.