



MEMORIAS DEL XXXI CONGRESO NACIONAL DE TERMODINÁMICA

Durango, Dgo.
5-9 de septiembre de 2016



Trabajo en extenso

DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN PARA UN INVERNADERO

Barragán-Medrano, Juan Carlos¹; Ríos-Orozco, Carlos Omar¹; Rodríguez-Muñoz, Norma Alejandra², Escobedo-Bretado Jorge Alberto³, Nájera-Trejo, Mario³; Martín-Domínguez Ignacio Ramiro³

¹ Departamento de Metal – Mecánica, Instituto Tecnológico de Durango
Felipe Pescador 1803 Ote, Nueva Vizcaya, 34080, Durango, Dgo., México.
Teléfono +52 (618) 829 0900

jcbm31@gmail.com, c.omar.rios@gmail.com

² Cátedras CONACYT en Centro de Investigación en Materiales Avanzados
Insurgentes Sur 1582, Ciudad de México, 03940, México,
Teléfono +52 (618) 8110774

norma.rodriguez@cimav.edu.mx

³ Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C. Unidad Durango
Victoria 147 Norte Zona Centro, 34000, Durango, Dgo., México.
Teléfono +52 (618) 811 3572 y +52 (618) 811 0774

jorge.escobedo@cimav.edu.mx, mario.najera@cimav.edu.mx, ignacio.martin@cimav.edu.mx

RESUMEN

En este trabajo se presenta el análisis de climatización de un invernadero de 180 m² de superficie. En el análisis se consideran los siguientes tipos de invernadero: túnel doble triangular, túnel doble semi-circular, túnel diente de sierra y túnel completo doble, así como los siguientes materiales de recubrimiento: polietileno de baja densidad, policarbonato, policloruro de vinilo y vidrio hortícola. Se realiza la modelación mediante simulaciones dinámicas con el Software TRNSYS (Transient System Simulation Program), el cual es utilizado para modelar el sistema completo durante un año típico. Los datos climáticos considerados en el software son de manera horaria, lo cual permite generar resultados para cada hora del año típico evaluado. Se lleva a cabo un análisis paramétrico para optimizar la forma y material de recubrimiento de la estructura para posteriormente determinar el consumo energético de cada caso evaluado. Se obtienen las necesidades energéticas de cada invernadero para mantener un rango operativo (15 y 30°C). Se llevó a cabo el análisis de los resultados de los cuales se establece la forma y material de recubrimiento, así como los sistemas de climatización que optimizarán el consumo

energético tanto para el sistema de calefacción (meses fríos) y el sistema de refrigeración (meses cálidos). Finalmente se seleccionaron los sistemas de calefacción y refrigeración, forma y material de recubrimiento para cada invernadero analizado.

INTRODUCCIÓN

Actualmente la agricultura, además de la producción a campo abierto, se practica en una amplia variedad de ambientes modificados, entre los que destacan los invernaderos con o sin control ambiental, con cultivos en sistemas hidropónicos, sustratos inertes o en suelo, mismos que representan un ejemplo de ecosistemas artificiales para desarrollar la agricultura intensiva. [1] Un invernadero es un espacio diseñado para proporcionar un microclima apropiado para el óptimo desarrollo de una planta o cultivo. Los invernaderos están destinados a proporcionar un alto rendimiento a bajo costo y alta productividad en menor tiempo sin daños al medio ambiente [2]. Por lo tanto, desde un punto de vista técnico y con el fin de satisfacer las demandas de reducción de gases del efecto invernadero es necesario cumplir con niveles adecuados de temperatura, humedad relativa, luz, concentración de dióxido de carbono y ventilación. Sin embargo, las exigencias de eficiencia energética de hoy deben tener en cuenta no sólo los requerimientos mínimos, sino también tener en cuenta la selección adecuada del material de cubierta del invernadero, el control adecuado de calefacción y frío, iluminación eficiente y la incorporación de las energías renovables [3].

La formulación de modelos climáticos permite predecir el comportamiento de las diferentes variables que integran el agro-sistema del invernadero, para condiciones climáticas específicas de cada región; y sus interacciones. Sin embargo, la modelación matemática del ambiente físico en nuestro país es muy escasa, debido a que la tecnología de producción en invernadero es relativamente nueva, por lo que hay una gran necesidad de generarla. [1].

En México existen regiones con condiciones idóneas para el establecimiento de invernaderos, lo que ha provocado un crecimiento sostenido. Sin embargo, el desconocimiento de las nuevas tecnologías y la falta de recursos para climatizar los invernaderos han llevado a la mayor parte de los productores con invernaderos de baja y media tecnología a utilizar técnicas rústicas de climatización, provocando daños a la estructura del invernadero y la producción. En el estado de Durango se tiene un clima variable donde en verano se registra un promedio de 31 °C y en invierno un promedio de 1.4 °C (INEGI), provocando que los productores empleen diversas técnicas para poder mantener todo el año una temperatura constante dentro del invernadero donde el uso de combustibles derivados del petróleo es predominante [4].

METODOLOGÍA

Selección de tipos de invernadero y de los materiales de estructura y recubrimiento

Dentro del estado de Durango en los últimos años la agricultura protegida ha ido en un aumento, día con día se desarrolla de una manera favorable esta práctica, a raíz de esto la necesidad de nuevas tecnologías han surgido para aplicaciones que van desde la forma y tipo de estos hasta los materiales de estructura y recibimiento. Se puede encontrar una gran diversidad de materiales y tipos de invernaderos en la región, donde los productores sin hacer un análisis exhausto los han seleccionado por sus características, costos y comportamientos ante el clima del estado. Los materiales de

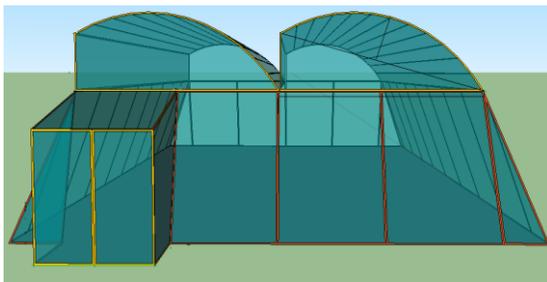
recubrimiento y estructura más comunes que se encuentran dentro del mercado con mayor accesibilidad, son con los que se trabajó y se realizan las simulaciones para ver sus comportamientos para el invernadero de 180m^2 . Como materiales de cubierta se utilizaron: polietileno de baja densidad (LDPE), policarbonato (PC), poli cloruro de vinilo (PVC) y vidrio. La estructura estuvo conformada por acero galvanizado y perfil cuadrado PTR de 2" y 3". Se seleccionaron cuatro tipos o formas de invernadero utilizados comúnmente en la región: túnel doble triangular, túnel doble semi-circular, túnel diente de sierra y túnel completo simple.

Diseño y modelación de invernaderos en el software de diseño gráfico "SketchUP".

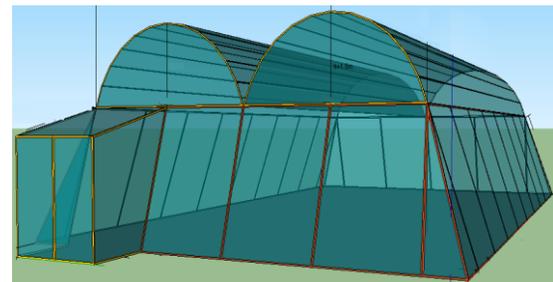
El análisis del presente trabajo se basa en el diseño cuatro invernaderos, la base de la estructura en todos es igual, únicamente cambia la forma de la parte superior o capilla, cuentan con un largo de 18m y un ancho de 10m. Las paredes como se pueden observar en las figuras (Figura 1) tienen un ángulo de 68.2° con respecto a la vertical del suelo, esto debido las características y la velocidad del viento de la ubicación donde se colocara el invernadero (Durango, México). En la Tabla 1 se presentan las dimensiones y volumen de aire de los invernaderos estudiados.

1. Invernadero dimensiones y volumen

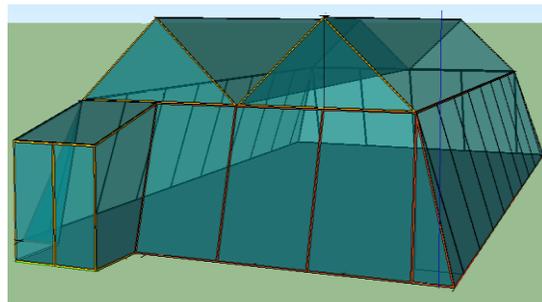
| Tipo | Dimensiones (m) | Volumen (m^3) | Area (m^2) |
|------------------|-----------------|--------------------------|-----------------------|
| Diente de sierra | 3.5 x 18 x 10 | 528 | 183 |
| Túnel triangular | 4.0 x 18 x 10 | 488 | |
| Túnel Completo | 4.2 x 18 x 10 | 541 | |
| Túnel doble | 4.0 x 18 x 10 | 532 | |



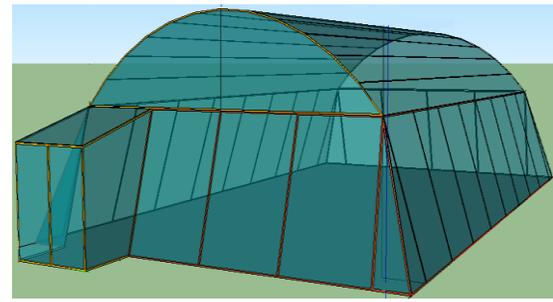
a) Túnel diente de sierra



b) Túnel doble



c) Túnel triangular



d) Túnel completo

Figura 1 Diseño Invernadero (SketchUP Pro)

Calculo de la capacitancia térmica

Para representar la capacitancia térmica de los objetos del invernadero TRNBuild brinda una opción llamada capacidad térmica (kJ/K), la cual es una propiedad extensiva que se define como la cantidad de energía calorífica que es necesaria suministrar a un sistema para aumentar su temperatura en un grado y se calcula mediante la ecuación 1.

$$Ct = m \cdot Cp \quad (1)$$

Dónde: Ct = Capacidad térmica (kJ/K), m = masa (kg) y Cp = capacidad calorífica (kJ/kg K)

La Tabla 2 muestra las capacitancias térmicas de los invernaderos, los resultados finales son un total de la suma de las capacidades de la estructura inferior, la superior (capilla) y del aire interior, este último, la capacitancia del aire interior es calculado y asignado automáticamente por la interfaz TRNBuild. El valor total de la capacitancia térmica es la suma de la capacitancia térmica del material de la estructura completa y la del aire interior. Los cálculos se llevaron a cabo solo con la suma de estos dos valores, ya que se desconoce la producción que se obtendrá, este invernadero está diseñado para fines educativos y de investigación. Los cultivos intensivos o producción de la planta no será la actividad principal, ya en operación afectará el valor total de la capacitancia térmica total, la masa foliar aumentará de manera significativa la capacitancia térmica total de todo el invernadero.

Tabla 2 Capacitancias térmicas totales de invernaderos

| TIPO | Estructura superior (capilla) | | Estructura inferior | Total | |
|------------------|-------------------------------|--------------------|------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| | Masa (kg) | Cp Acero (kJ/kg K) | Capacitancia Térmica (kJ/kg) | Capacitancia Estructura (kJ/kg) | Capacitancia Invernadero (kJ/kg) |
| Triangular | 330.81 | 0.46 | 152.18 | 357.29 | 1095.17 |
| Túnel doble | 340.31 | 0.46 | 156.55 | 357.29 | 1155.02 |
| Diente de sierra | 363.90 | 0.46 | 167.39 | 357.29 | 1212.35 |
| Túnel completo | 293.60 | 0.46 | 135.06 | 357.29 | 1144.27 |

Materiales de recubrimiento en el software Window e importación a TRNbuild

Para poder llevar a cabo una simulación con los materiales de ventanas deseados no incluidos en la librería de “Window type” manager en TRNBuild, es necesario utilizar la herramienta de software WINDOW. Este software nos permite generar ventanas con las propiedades térmicas y ópticas requeridas. Se introdujeron tres nuevos materiales a WINDOW no existentes en la librería (Library American) como lo fueron: policarbonato (PC), polietileno de baja densidad (LDPE) y policloruro de vinilo (PVC). En la Tabla 3 se presentan los materiales de cubierta del invernadero y sus propiedades térmicas y ópticas.

Simulación en TRNSYS studio

Para lograr que el dimensionamiento cumpla con el objetivo planteado (mantener dentro del invernadero un microclima con un rango de temperaturas entre 15 - 30°C). En la simulación del sistema del invernadero se seleccionaron modelos matemáticos genéricos, disponibles en la librería de TRNSYS; los cuales fueron adecuados a las características exactas de los equipos utilizados mediante la asignación de valores a los parámetros de diseño. Se analizó el comportamiento de

temperaturas interiores y requerimientos de energía de climatización en un año meteorológico típico de la ciudad de Durango, Dgo. La Figura 2 muestra el diagrama en TRNSYS de los sistemas requeridos para el funcionamiento de los invernaderos. Los resultados muestran la demanda energética anual en kWh y el monitoreo de la temperatura interior y exterior cada hora a lo largo de un año.

Tabla 3 Propiedades térmicas y ópticas de los materiales [5].

| Material/Propiedades | Poli-carbonato (PC) | Polietileno (PEBD) | Policloruro de vinilo (PVC) | Vidrio |
|----------------------------------------------|---------------------|--------------------|-----------------------------|--------|
| Conductividad Térmica, k, (W/m·K) | 0.19 | 0.45 | 0.16 | 0.81 |
| Espesor, (mm) | 4.0 | 0.18 | 0.10 | 3.20 |
| Densidad, ρ, (kg/m ³) | 0.18 | 0.91 | 1.30 | 0.88 |
| Emisividad, ε | 0.89 | 0.13 | 0.62 | 0.84 |
| Transmisividad Solar, τ _{solar} | 0.78 | 0.88 | 0.91 | 0.88 |
| Reflectividad Solar, ρ _{solar} | 0.14 | 0.09 | 0.07 | 0.136 |
| Transmisividad Visible, τ _{visible} | 0.75 | 0.89 | 0.92 | 0.89 |
| Reflectividad Visible, ρ _{visible} | 0.15 | 0.1 | 0.07 | 0.136 |
| U-value, (W/m ² ·K) | 5.433 | 3.720 | 5.160 | 2.890 |
| Coefficiente de ganancia de calor solar SHGC | 0.713 | 0.793 | 0.809 | 0.789 |

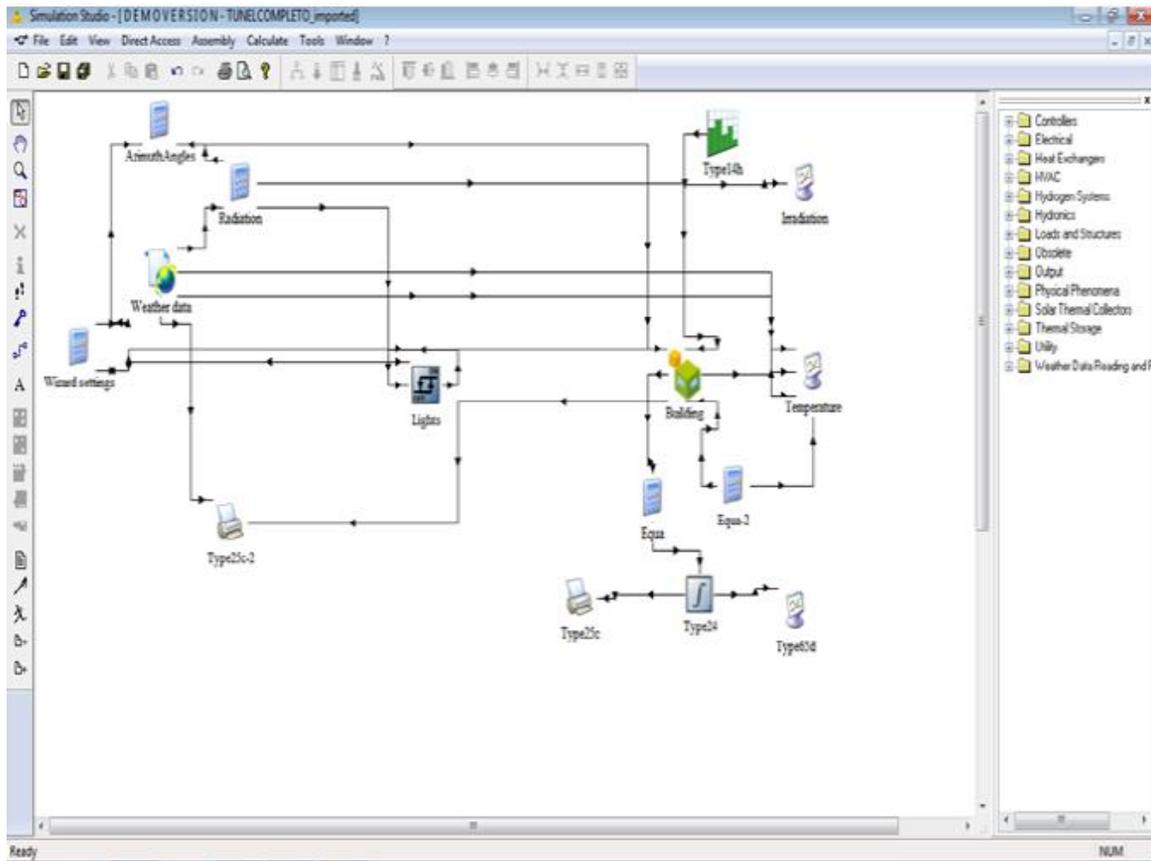


Figura 2. Diagrama TRNSYS Studio para cálculo anual de demanda energética. (TRNSYS Studio)

Los resultados de esta simulación muestran (Tabla 4) que el invernadero de túnel completo con recubrimiento de polietileno de baja densidad (PEBD) es el más eficiente ya que tiene menor requerimiento energético. Es en base a estos resultados que se seleccionará el tipo y forma de invernadero con que se trabajará.

Tabla 4 Requerimiento anual de energía para climatización

| Invernadero (material) | CALEFACCIÓN | | REFRIGERACIÓN | | TOTAL | % |
|----------------------------|--------------------------------|---------------|--------------------------------|--------------|---------------|--------------|
| | Requerimiento energético (kWh) | Diferencia | Requerimiento energético (kWh) | Diferencia | | |
| Diente de sierra (PC) | 15,400 | - | 3,960 | - | 19,360 | - |
| Túnel doble (PVC) | 15,541 | 0.9% | 3,321 | -16.1% | 18,862 | -2.6% |
| Túnel doble (PC) | 15,523 | 0.8% | 3,509 | -11.4% | 19,032 | -1.7% |
| Diente de sierra (PVC) | 15,400 | 0.0% | 3,730 | -5.8% | 19,130 | -1.2% |
| Triangular (PC) | 14,691 | -4.6% | 3,896 | -1.6% | 18,587 | -4.0% |
| Triangular (PVC) | 14,678 | -4.7% | 3,749 | -5.3% | 18,426 | -4.8% |
| Túnel completo PC | 14,560 | -5.5% | 3,798 | -4.1% | 18,357 | -5.2% |
| Túnel completo PVC | 14,534 | -5.6% | 3,652 | -7.8% | 18,187 | -6.1% |
| Túnel doble PEBD | 13,295 | -13.7% | 4,934 | 24.6% | 18,230 | -5.8% |
| Diente de sierra PEBD | 13,200 | -14.3% | 5,510 | 39.1% | 18,710 | -3.4% |
| Triangular PEBD | 12,515 | -18.7% | 5,368 | 35.6% | 17,884 | -7.6% |
| Túnel completo PEBD | 12,391 | -19.5% | 5263 | 32.9% | 17,654 | -8.8% |
| Diente de sierra vidrio | 9,502 | -38.30% | 10567 | 166.83% | 20,069 | 3.7% |
| Túnel doble vidrio | 9,692 | -37.06% | 9208 | 132.53% | 18,901 | -2.4% |
| Túnel completo vidrio | 9,073 | -41.08% | 9312 | 135.16% | 18,385 | -5.0% |
| Triangular vidrio | 9,115 | -40.81% | 9396 | 137.28% | 18,511 | -4.4% |

RESULTADOS

En las Figuras 3 y 4 se muestra el comportamiento térmico del invernadero bajo las condiciones de un año climatológico típico (TMY) de la ciudad de Durango, Dgo., determinado por Meteonorm, todas las variables son calculadas con un historial de 25 años para poder tener una serie de datos promedio. Cada dato en la simulación se genera con intervalos de una hora durante las 8760 horas del año, por lo tanto, se obtienen 8760 datos de cada variable. Las variables climatológicas que condicionan la simulación son la temperatura ambiente, humedad relativa, porcentaje de humedad absoluta, radiación difusa y directa, velocidad y dirección del viento, presión atmosférica, temperatura solar efectiva, ángulo de dirección solar y reflectancia del suelo.

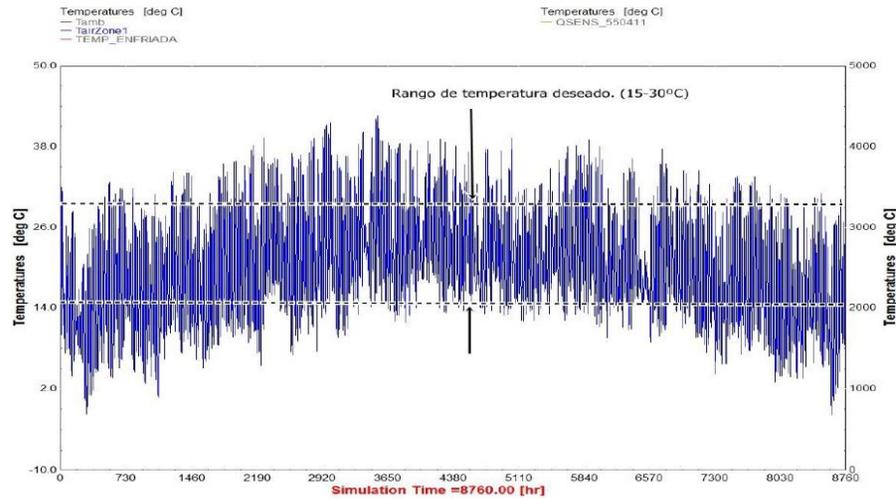


Figura 3 Temperatura interior de invernadero túnel completo con recubrimiento de polietileno (PEBD).

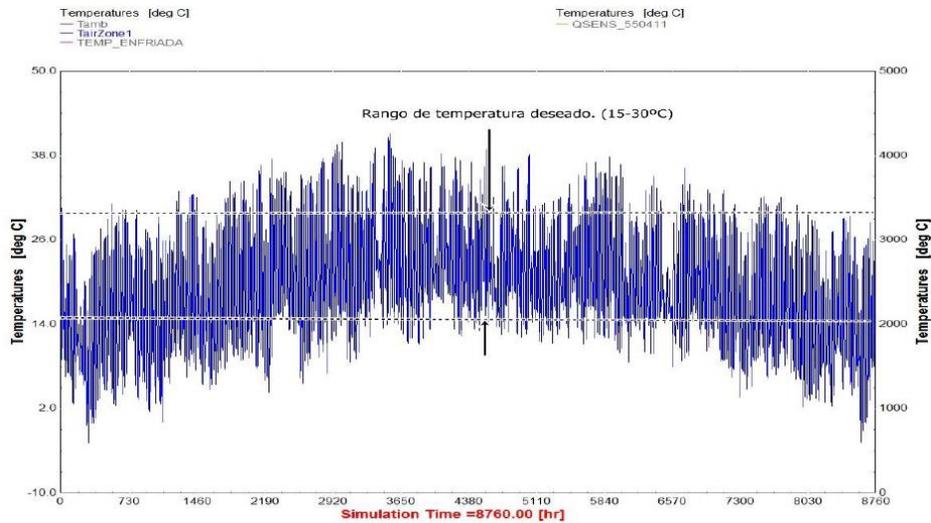


Figura 4 Temperatura interior de invernadero túnel completo con recubrimiento de policarbonato (PC).

La Figura 5 muestra la temperatura interior (azul) deseada en invernadero tipo túnel completo con recubrimiento de Polietileno de baja densidad, la temperatura ambiente de un año típico (TMY) en la ciudad de Durango, Dgo. (rojo), y la potencia requerida para mantener las condiciones interiores del invernadero en kJ/h (amarillo).

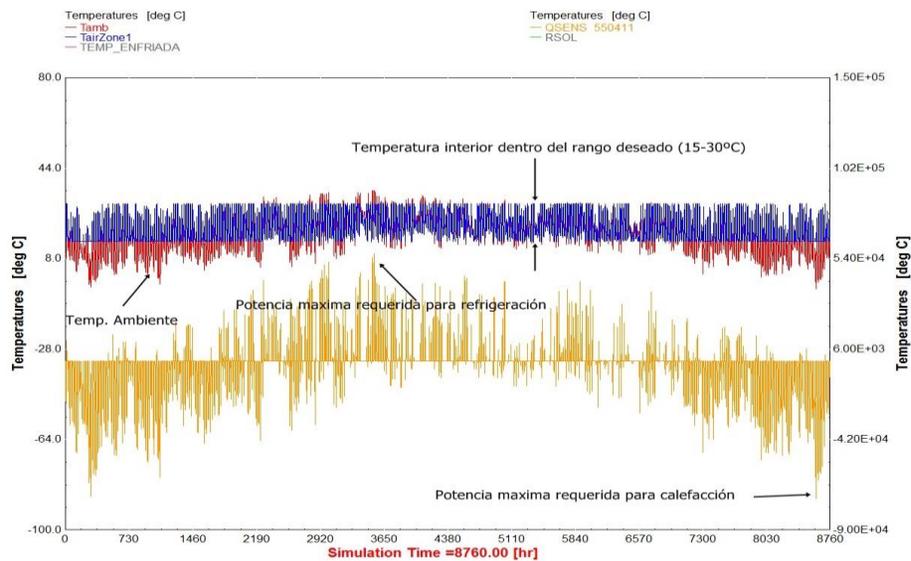


Figura 5 Temperatura interior (azul), temperatura ambiente (rojo) y potencia requerida (amarillo).

Las figuras 6 y 7 muestran la demanda energética del invernadero de túnel completo o simple con recubrimiento de policarbonato celular con un espesor de 4mm. Se puede apreciar en la figura las horas de los días más caliente y frío en todo el año., la hora de mayor demanda energética es a la hora 8600, es la hora cuando existe un mayor requerimiento de energía para calefacción, esta hora corresponde al día 24 de diciembre (temperatura ambiente -3.75°C). La hora 3545 es cuando se registra la mayor demanda energética para refrigeración, corresponde al día 27 de mayo (temperatura ambiente 35.30°C).

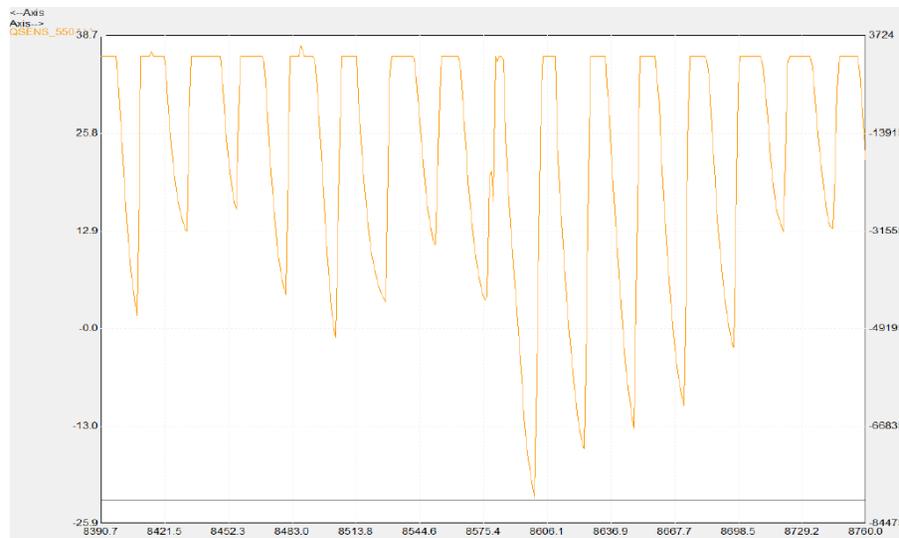


Figura 6 Requerimiento máximo de energía (W) para calefacción en la hora con menor temperatura del año.

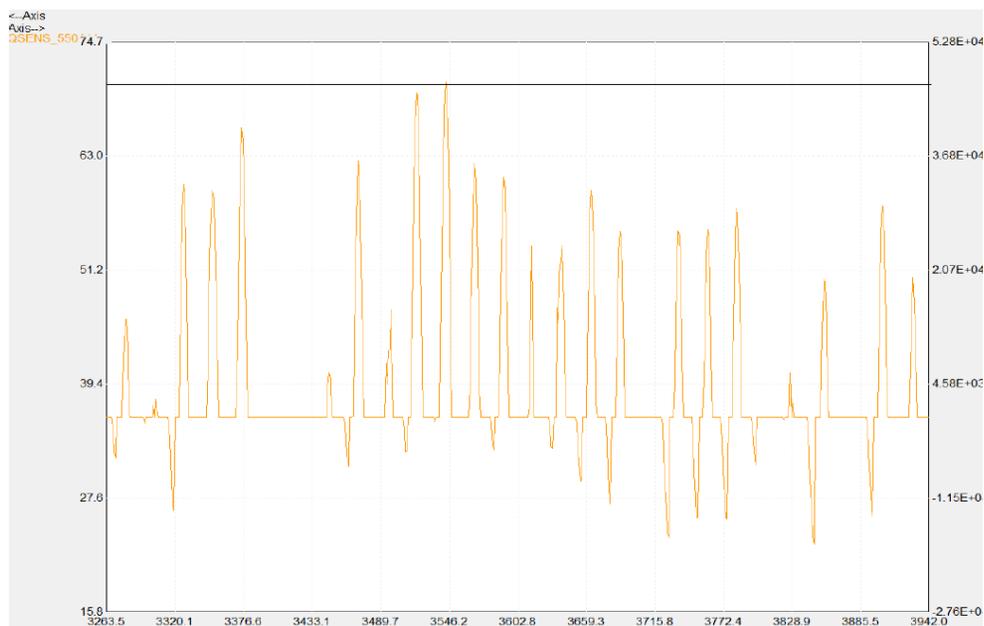


Figura 7 Requerimiento máximo de energía (W) para refrigeración en la hora con mayor temperatura del año.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta el análisis térmico de invernaderos con cuatro formas y cuatro materiales de cubierta. El sistema se analiza de forma horaria durante un año típico y se obtienen resultados de temperaturas horarias y consumo energético anual por concepto de climatización (calefacción y refrigeración). Para todas las formas de invernadero, el material de cubierta que requiere menor cantidad de energía para su calentamiento es el vidrio, por lo que si se considerara el uso del invernadero únicamente durante los meses fríos, éste sería el material técnicamente ideal, a reserva de realizar los cálculos económicos. Cuando se analiza el consumo energético total anual (calefacción y refrigeración), el invernadero que requiere menor cantidad de energía es el de túnel completo con cubierta de PEBD. Este invernadero requeriría 17 654 kWh anuales, lo cual representa un 8.8% menos energía que el invernadero con peor desempeño en los meses fríos.

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 éste trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Burgarin Montoya, R. (Julio- Septiembre de 2008). Estructuras utilizadas en la agricultura protegida. 8, 26. Nayarit, Nayarit.
- [2] Melter, J. y. (1995). Protected Agriculture. Washington D.C: The World Bank.

- [3] Alvarez, V. M. (1998). Ahorro y eficiencia energética en invernaderos. Madrid: Ministerio de industria, turismo y Comercio.
- [4] Antuna, M. H. (2015). Observaciones directas obtenidas de experiencias prácticas. Durango, Mexico.
- [5] Valera, D.L., Molina, F.D., Álvarez, A.J. (2008). Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Protocolo de Auditoría Energética en Invernaderos. Auditoría Energética de un Invernadero para cultivo de flor cortada en Mendigorria. Madrid.