



CENTRO DE INVESTIGACION EN MATERIALES AVANZADOS, S.C.

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO

*“Diseño termo-económico del sistema de suministro energético para calefacción de invernaderos agrícolas, utilizando energía solar, mediante simulación en TRNSYS”*

Tesis

Que como requisito para obtener el grado de:

*Maestro en Ciencia y Tecnología Ambiental*

Presenta:

José Apolonio Burciaga Santos

Director de Tesis:

Dr. Ignacio R. Martín Domínguez

Chihuahua Chih. 09 · Julio · 2011

# Índice

<b>I</b>	<b>Introducción.....</b>	<b>1</b>
I.1	Invernaderos.....	1
I.2	Agricultura protegida en México .....	3
<b>II</b>	<b>Métodos de Climatización .....</b>	<b>5</b>
II.1	Enfriamiento.....	6
II.1.1	Ventilación Natural .....	6
II.1.2	Ventilación Forzada.....	6
II.1.3	Sombreado.....	7
II.1.4	Enfriamiento evaporativo.....	7
II.1.5	Intercambio de energía entre tierra y aire .....	8
II.2	Calefacción .....	8
II.2.1	Sistemas de calefacción.....	8
<b>III</b>	<b>Planteamiento del problema.....</b>	<b>9</b>
<b>IV</b>	<b>Propuesta de solución .....</b>	<b>10</b>
<b>V</b>	<b>Justificación .....</b>	<b>11</b>
<b>VI</b>	<b>Hipótesis .....</b>	<b>11</b>
<b>VII</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>12</b>
VII.1	General.....	12
VII.2	Específicos .....	12
<b>VIII</b>	<b>Necesidades Energéticas .....</b>	<b>12</b>
<b>IX</b>	<b>Simulación del Uso de Energía en Edificaciones.....</b>	<b>15</b>
IX.1	Simulación de Sistemas Térmicos .....	15
IX.1.1	TRNSYS .....	16
<b>X</b>	<b>Modelo de simulación implementado en TRNSYS .....</b>	<b>18</b>
X.1	Modelación del invernadero .....	19
X.2	Sistema de Control.....	20



X.2.1	Control para el sistema de calefacción .....	22
X.2.2	Control para el sistema de enfriamiento .....	23
X.2.3	Control para el sistema de ventilación .....	24
X.2.4	Esquemas de control .....	26
X.3	Sistema de suministro energético .....	28
X.3.1	Funcionamiento del sistema de calefacción .....	28
X.3.2	Sistemas Adicionales.....	30
X.4	Equipos utilizados .....	30
X.4.1	Condiciones Ambientales .....	30
X.4.2	Equipo termo-mecánico.....	31
<b>XI</b>	<b>Análisis paramétrico .....</b>	<b>35</b>
<b>XII</b>	<b>Análisis Económico .....</b>	<b>37</b>
<b>XIII</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>39</b>
XIII.1	Invernadero sin acondicionamiento térmico .....	39
XIII.2	Energía consumida a partir de la combustión de gas LP .....	40
XIII.3	Climatización con energía utilizando energía solar .....	41
XIII.3.1	Efecto del volumen y temperatura de almacenamiento .....	42
XIII.3.2	Efecto del numero de colectores .....	43
XIII.3.3	Análisis financiero.....	44
<b>XIV</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>46</b>
<b>XV</b>	<b>Referencias .....</b>	<b>48</b>



## Tabla de Figuras

Figura 1 Esquema del cultivo realizado bajo invernadero.....	2
Figura 2 Superficie destinada a agricultura protegida en México (Elaboración propia con datos de AMPHI).....	3
Figura 3 Distribución de superficies de cultivo en invernaderos por estados de la república mexicana censo al 2008. (Elaboración propia con datos de SAGARPA, 2009) .....	4
Figura 4 Principales cultivos realizados bajo invernadero en México (Elaboración propia con datos de SAGARPA, 2009).....	4
Figura 5 Tipo de agricultura protegida realizada en México (Elaboración propia con datos de SAGARPA, 2009).....	5
Figura 6 Flujos energéticos en un invernadero .....	14
Figura 7 Presentación del paquete TRNSYS.....	16
Figura 8 Pantalla del modelo de simulación elaborado.....	17
Figura 9 Interconexión de variables entre modelos en TRNSYS .....	18
Figura 10 diagrama.....	19
Figura 11 Dimensiones y forma del invernadero simulado (dimensiones en m) .....	19
Figura 12 Pantalla de visualización del programa TRNBuild .....	20
Figura 13 Estrategia de control.....	21
Figura 14 Esquemas de control.....	22
Figura 15 Pantalla que muestra el comportamiento de las señales de control para los diferentes sistemas de climatización del invernadero .....	26
Figura 16 Esquema de control Estricto .....	27
Figura 17 Esquema de control Flexible.....	27

Figura 18 Circuitos de Flujo .....	29
Figura 19 Curva de eficiencia del colector usado en la simulación.....	32
Figura 20 Efectividad para el intercambiador de calor a contraflujo ( Fuente: Çengel, 2007) .....	33
Figura 21 Pantalla de visualización de TRNEdit y generación de tabla paramétrica.....	36
Figura 22 Valor presente de pagos con gradiente .....	38
Figura 23 Incremento histórico al gas LP en México (fuente: elaboración propia con datos de Diario oficial de la federacion) .....	39
Figura 24 Comportamiento anual de la temperatura interna del invernadero	40
Figura 25 Consumo de energía de la caldera .....	41
Figura 26 Costos de operación de caldera .....	41
Figura 27 .....	42
Figura 28.....	43
Figura 29 Ahorro de combustible .....	44
Figura 30 Valor presente del costo total de inversion .....	45
Figura 31 Beneficio final obtenido.....	46



## Resumen

La tendencia en producción de cultivos bajo ambiente invernadero en México, ha presentado incrementos considerables en los últimos años. Sin embargo, el diseño de los invernaderos instalados es de procedencia extranjera y se hace sin llevar a cabo un estudio del intercambio de energía entre el invernadero y el medio ambiente de la localidad. El objetivo de este trabajo fue simular la operación y correcto dimensionamiento de un campo de colectores solares, termo-tanques y caldera auxiliar, a utilizarse para suministrar la energía requerida en la calefacción del invernadero. Se presenta un análisis termoeconómico del requerimiento energético para calefacción en que incurren los invernaderos agrícolas en la ciudad de Chihuahua Chih., para el cultivo de tomate. Lo anterior se hace a partir de una simulación en el paquete TRNSYS utilizando las condiciones climáticas y la energía solar disponible en la región. Se modeló un invernadero con suministro de energía a partir de gas LP y se compara con el mismo invernadero pero asistido con energía solar, ambos usando aire caliente como medio de calefacción.



# I Introducción

La agricultura es la actividad humana que más estrecha relación tiene con el medio ambiente y con la sobrevivencia del hombre, se estima que la agricultura se ha desarrollado desde hace unos 8.000 a 10.000 años. Desde entonces todos los pueblos de la Tierra han reconocido el valor que las plantas cultivadas tienen para la alimentación humana. Actualmente es un vector indispensable para el desarrollo económico, y fundamental en la alimentación mundial.

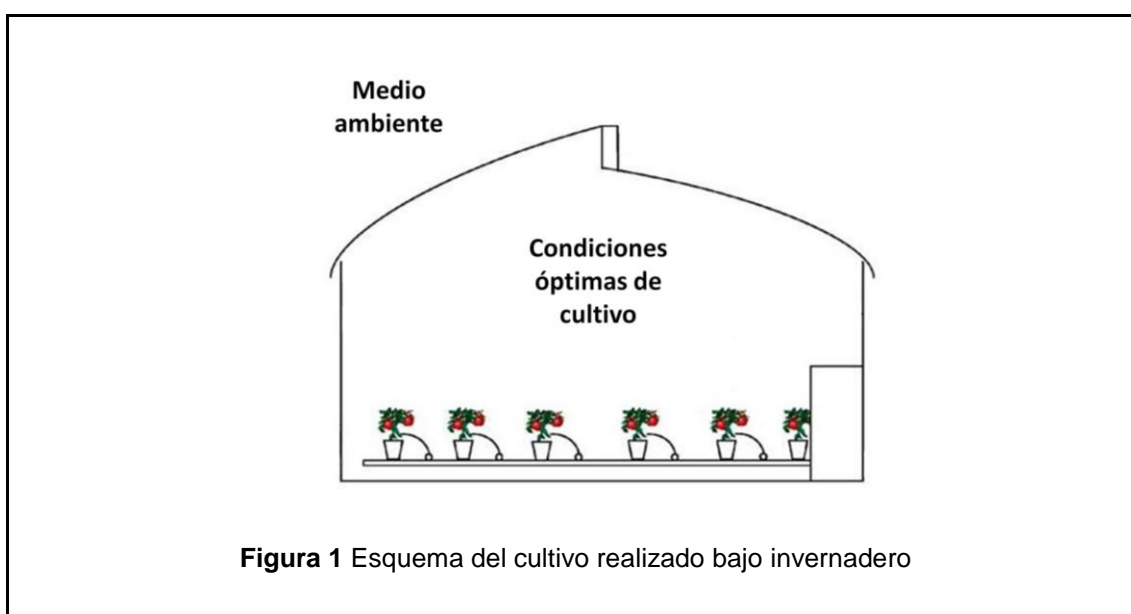
Asimismo, se ha convertido en una causa significativa del deterioro, la contaminación y el agotamiento de los recursos naturales. En su afán por solventar la demanda de alimentos, ocasionada por la explosión demográfica y minimizar el deterioro ambiental, el hombre ha desarrollado técnicas alternativas para obtener mejores rendimientos de producto por unidad de área superficial cultivada. Una de estas técnicas es el cultivo realizado bajo invernadero.

## I.1 Invernaderos

Un invernadero es toda aquella estructura cerrada, cubierta por materiales transparentes, dentro de la cual es posible obtener un microclima artificial y con ello cultivar plantas fuera de estación en condiciones óptimas. (Sheti 2009, Teitel *et al.* 2009, Bartazanas *et al.* 2009). El cultivo bajo invernadero ha permitido obtener producciones de calidad y mayores rendimientos en cualquier temporada del año, también permite alargar la duración del ciclo de cultivo, permitiendo producir en las épocas del año que presentan condiciones climáticas adversas obteniéndose con ello mejores precios de venta del producto. En un invernadero correctamente controlado es posible, en teoría, proveer a un cultivo agrícola o floral de las condiciones adecuadas de temperatura, humedad, concentración de CO<sub>2</sub> y luminosidad, para lograr maximizar su crecimiento. Estos factores condicionan el correcto desarrollo de los cultivos, en sus diferentes fases de crecimiento. Para que las plantas puedan realizar sus funciones biológicas es necesario mantener las

condiciones climáticas mencionadas dentro de ciertos límites, fuera de estos las plantas cesan su metabolismo, pudiendo llegar a la muerte.

Debido a lo anterior, este tipo de sistemas productivos requiere para su implementación, elevados consumos energéticos (Chinese *et al.* 2005) y adicionalmente, del control automatizado de las variables que influyen en su producción (Meijaard 1989). Se requiere entonces de una fuente de energía para mantener dentro del rango óptimo, o de confort de la planta, la temperatura del microambiente dentro del invernadero, de acuerdo al tipo de cultivo. Los combustibles fósiles que se utilizan actualmente son recursos limitados y son productos importados, razones que los convierten en productos con precios inciertos y por lo tanto, de gran importancia en la rentabilidad de estas actividades (Huacuz 2004). A esto se ha unido recientemente otro aspecto negativo, su consumo produce dióxido de carbono, gas considerado como el mayor responsable del efecto invernadero y calentamiento de la atmósfera (Latimer 2001). En la actualidad se están poniendo en marcha, diversas acciones para el ahorro energético en invernaderos, mediante el uso de sistemas tradicionales más eficientes (Meijaard 1989, Sheti 2009, García *et al.* 1998), el uso de fuentes de energía renovables (García *et al.* 1998, Huacuz 2004) y sistemas de calentamiento que aprovechan parte de la energía del medio ambiente (Chinise *et al.* 2005).

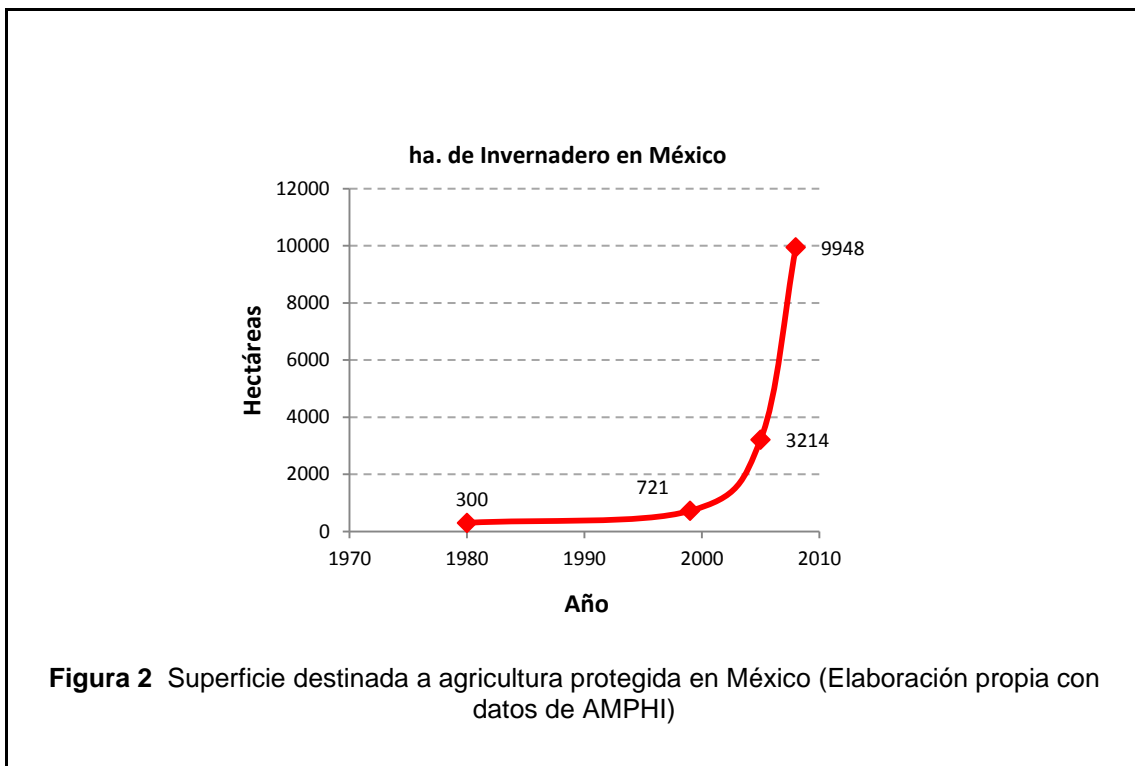


**Figura 1** Esquema del cultivo realizado bajo invernadero

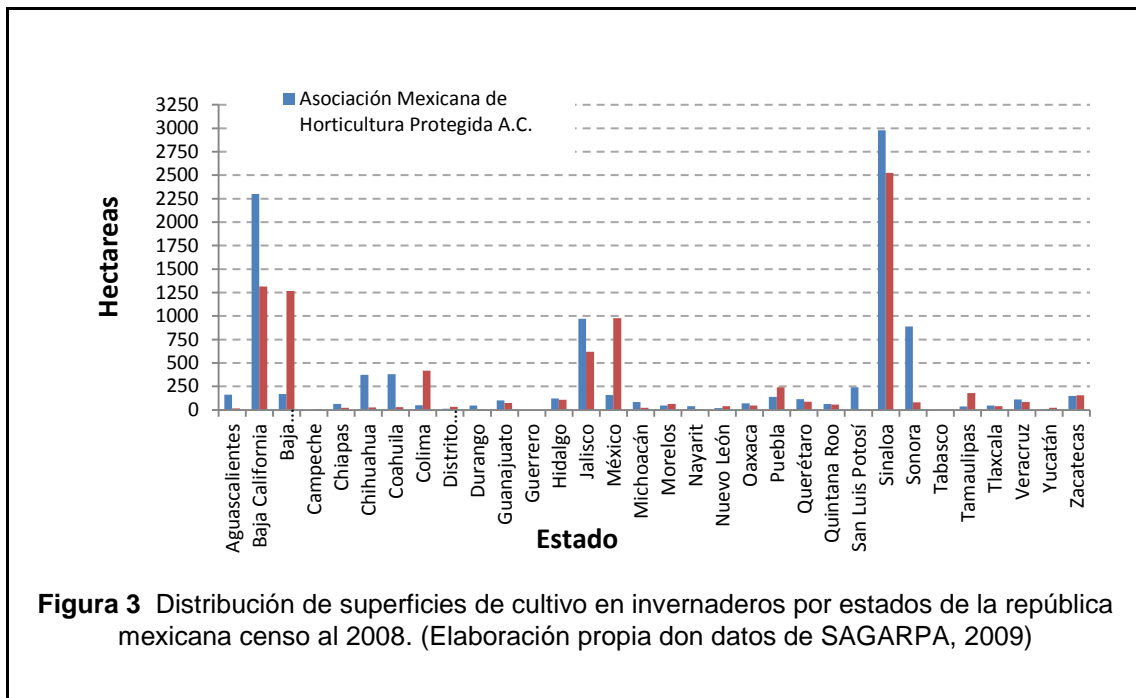


## I.2 Agricultura protegida en México

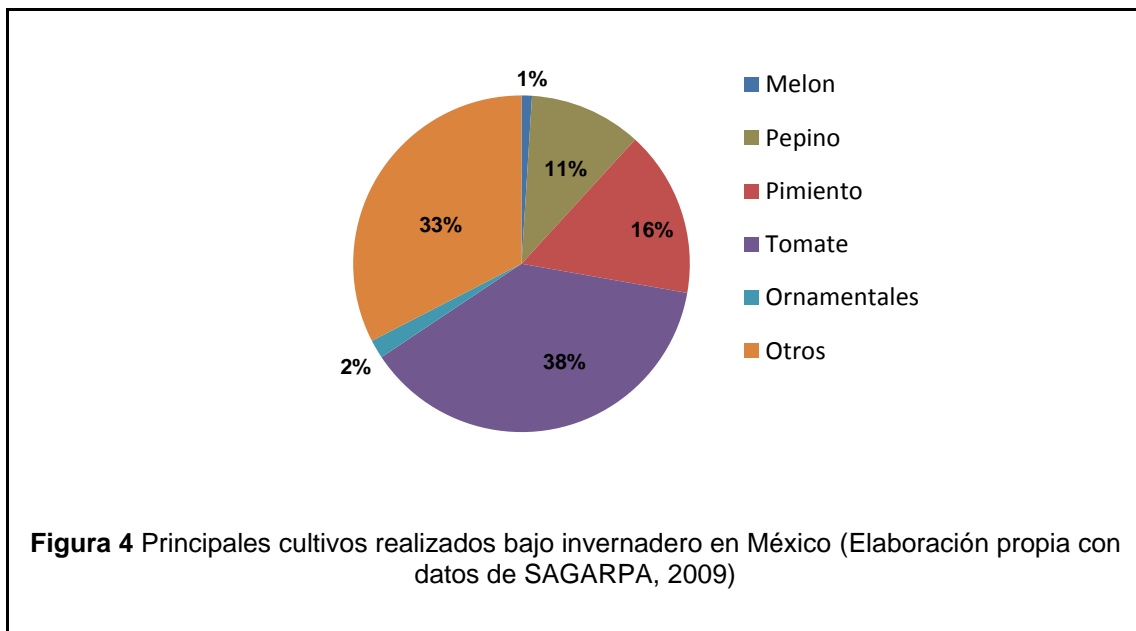
La tendencia en producción de cultivos en invernadero en México, ha presentado incrementos considerables (Castañeda-Miranda *et al.* 2007, Moran-Medina 2004). Ésta tecnología de cultivo tuvo sus inicios en el país a finales de la década de los 70, para 1980 abarcaba tan solo 300 ha, Guantes (2006) estimó que en 1999, el país contaba con 721 hectáreas de invernadero, en 2005 ascendió a 3,200 hectáreas y en 2008 llegó a 9948 ha, según datos de la AMPHI (Asociación Mexicana de Productores de Hortalizas bajo Invernadero) Figura 2.



En los últimos años los sistemas de producción bajo invernadero en México se ha expandido a 29 de las 32 entidades del país. Es de notarse que el 79% de la superficie se concentra en solo seis: Sinaloa, Jalisco, Chihuahua, Coahuila, Baja California Norte y Sonora (Figura 3).

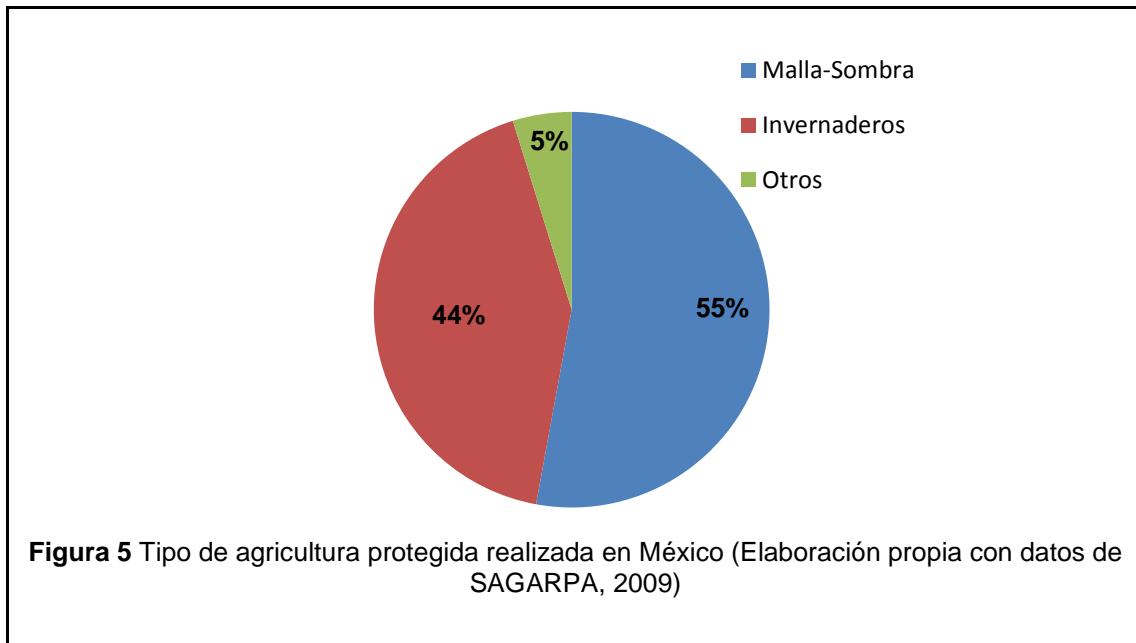


Los cultivos que se producen bajo invernadero en México, están concentrados en seis tipos principales, como se muestra en la Figura 4.



En México, la tecnología de agricultura protegida que predomina es la hecha en estructuras malla sombra, con un 53% del total de las hectáreas destinadas a este fin (Figura 5). En este tipo de sistemas no se provee al

cultivo de las condiciones óptimas de crecimiento, ya que solo se evitan altos niveles de radiación solar sobre el mismo y se protege contra plagas e insectos. El 44% lo ocupan invernaderos de plástico, y el 5% estructuras cubiertas con otro material (vidrio y policarbonato).



## II Métodos de Climatización

El control ambiental de invernaderos requiere manejar de forma adecuada todos los sistemas instalados tales como: luminosidad, sistema de calefacción, ventilación, humidificación, sistema de sombreado variable y suministro de dióxido de carbono. Con ello se deben mantener los niveles adecuados de radiación, temperatura, humedad relativa y nivel de CO<sub>2</sub>, y así conseguir una mejor respuesta del cultivo y por tanto, mayores rendimientos, precocidad, y mejoras en calidad del producto y calidad del cultivo. Para mantener las condiciones del microclima deseado dentro del invernadero, se requieren disponer de fuentes de energía que permitan suministrar calor, enfriamiento y/o ventilación en forma controlada, para contrarrestar los flujos térmicos naturales, ocasionados por las condiciones ambientales externas. Esto requiere la instalación de equipos de calentamiento y ventilación, y el consumo de varias formas de energía (gas, combustibles líquidos, electricidad) para operarlos.

## **II.1 Enfriamiento**

Durante el verano y días claros los altos niveles de radiación incrementan la temperatura del aire dentro del invernadero, que pueden llegar a provocar un impacto negativo en la calidad y desarrollo del cultivo. Para dar solución a este tipo de problemas se hace necesaria la instalación de equipos y tecnologías de enfriamiento eficientes y de bajo costo. La instalación de sistemas convencionales de enfriamiento no es totalmente aceptada debido al incremento en los costos de inversión y operación de los invernaderos. Aún en los invernaderos equipados con esta tecnología, existe un gran interés por la conservación de la energía. Esto ha motivado el desarrollo e investigación de nuevas tecnologías para el enfriamiento de invernaderos, de entre las cuales destacan ventilación natural, ventilación forzada, sombreado, enfriamiento evaporativo e intercambio de energía entre tierra y aire (Sheti y Sharma 2007).

### **II.1.1 Ventilación Natural**

La ventilación natural es la manera mas simple de mantener frío el clima dentro de un invernadero, esta se basa en el flujo de aire frío del exterior expulsando el aire caliente dentro del invernadero. Esto se origina debido a la diferencia de presiones causada por la temperatura del aire entrante (frío) por la parte inferior del invernadero sobre el aire dentro (caliente) a salir por la parte superior del mismo. La ventilación natural o pasiva es caracterizada por la poca demanda de energía (Sheti y Sharma 2007, Kumar *et al.* 2009 ). Diversos autores han estudiado el fenómeno de la ventilación natural en invernaderos, enfocándose en la distribución y variación de temperatura (Soni *et al.* 2005), en la tasa de intercambio de aire utilizando gases traza y en el estudio de la ventilación natural mediante programas de simulación de dinámica de fluidos (Sheti y Sharma 2007, Kumar *et al.* 2009, Teitel y Tanny 1999, Ganguly y Gosh 2009).

### **II.1.2 Ventilación Forzada**

Cuando la extracción de energía térmica, mediante la ventilación natural no es la suficiente para mantener la temperatura de crecimiento óptimo del cultivo, sistemas mecánicos como ventiladores (extractores e inyectores)



pueden suplementar grandes cantidades de flujo de aire de intercambio cuando sean requeridas. Estos sistemas son simples e incrementan significativamente la tasa de intercambio de aire del invernadero manteniendo las temperaturas dentro del mismo mas bajas que las del exterior. Kittas *et al.* (2005) reportó que con el uso de ventilación forzada y control de humedad relativa, la diferencia de temperaturas entre el interior del invernadero y el exterior dependía fuertemente de la tasa de ventilación.

### **II.1.3 Sombreado**

Durante el día la fuente de calor del invernadero es la incidencia de radiación solar sobre la cubierta transparente de este (Pieters y Deltour 1999). Parte de esta radiación puede ser bloqueada mediante el obscurecimiento de la superficie ó por pantallas reflejantes instaladas dentro o fuera del invernadero. Ballie *et al.* (2001) estudió el efecto de pintar de blanco la superficie de un invernadero, y encontró que esta podría ser una solución económica, aplicable a regiones con altos valores de incidencia de radiación solar, ya que al hacerlo la planta se desarrollo sin sufrir algún tipo de deterioro. El uso de cortinas reflectoras para la radiación solar también se ha reportado ser eficaz (Silva *et al.* 1991, Kumar *et al.* 2009). Las cortinas reflectoras se encuentran entre los metodos mas prácticos y apropiados para reducir los consumos de energía en el invernadero (Ghosal M.K. *et. al.*, 2004, Soni *et al.* 2005). Hans-Juergen, T. (1998), encontró que el porcentaje en consumo energetico se veia reducido por el uso de pantallas térmicas hasta en un 40%.

### **II.1.4 Enfriamiento evaporativo**

El enfriamiento evaporativo es el método mas efectivo para controlar la temperatura y humedad dentro de un invernadero (Kummar *et al* 2009). La literatura consultada muestra que se pueden tener temperaturas de 6 a 8 °C más bajas dentro del invernadero comparadas con la temperatura ambiente (Kummar *et al.* 2009, Sheti y Sharma 2007, Ghosal *et al.* 2004, Jain y Tiwari 2001). Los métodos más usados de enfriamiento evaporativo son los de pared húmeda y el de nebulización.

### **II.1.5 Intercambio de energía entre tierra y aire**

La capacitancia térmica del subsuelo puede ser usada tanto para calentar como para enfriar invernaderos, en verano cuando las condiciones de temperatura ambiente son altas, éstas se pueden disminuir haciendo circular aire a través de tubos enterrados para la disipación de calor al subsuelo. Reduciendo las cargas de enfriamiento requeridas. Por ser el subsuelo un medio masivo y mantener temperaturas constantes a lo largo del año puede ser utilizado como un sumidero de calor. Santamouris *et al.* (1995) estudió el efecto de intercambiar energía con el suelo del invernadero mediante tubos enterrados, utilizando el suelo como sumidero de calor, disminuyendo en un 8% el consumo de energía por los equipos de enfriamiento. Ghosal *et al.* (2004) comparó la operación de 2 invernaderos idénticos, uno utilizando tubos enterrados como intercambiador de calor y otro sin ellos, solo con sistema de ventilación. Comparando los resultados de la operación de los invernaderos a lo largo de un año en Delhi India, observó, que mediante el uso de tubos enterrados puede disminuir hasta en 4 °C la temperatura del aire dentro del invernadero en un día típico de operación.

## **II.2 Calefacción**

Durante las noches y en el periodo invernal la temperatura del invernadero desciende a valores que pueden ser dañinos para el cultivo. Para mantener la temperatura en los valores óptimos para el desarrollo del cultivo, es necesario el aporte de energía térmica al invernadero mediante sistemas de calefacción.

### **II.2.1 Sistemas de calefacción**

Actualmente una variedad de sistemas de calefacción están siendo usados para mantener las temperaturas en el rango óptimo de desarrollo de la planta. La función básica de un sistema de calentamiento es la de reponer la energía térmica que se pierde del invernadero hacia el medio ambiente o almacenar el excedente de calor durante el día y devolverlo durante la noche cuando este es requerido. La fuente principal de energía de los sistemas de calentamiento es la liberada a través de la combustión de combustibles

fósiles, ya sea para el calentamiento de agua ó aire para su posterior uso dentro del invernadero. Sheti y Sharma (2008) clasifican los sistemas de calefacción de invernaderos de acuerdo al medio de almacenamiento de energía. Destacando agua, lechos de piedra y el cambio de fase de materiales (sales eutécticas) como medios de almacenamiento, así como aislamiento móvil e intercambiadores de calor tierra-aire como sistemas alternativos. Los calentadores de aire eléctricos también son usados y reportados como uno de los sistemas más utilizados a nivel mundial (Bartzanas *et al.* 2005).

El calor cedido por la calefacción puede ser aportado al invernadero básicamente por convección o conducción. Por convección al calentar el aire del invernadero y por conducción a localizar la distribución de calor a nivel del cultivo.

Los sistemas de calefacción por convección más utilizados se pueden clasificar en:

- Tuberías aéreas de agua caliente.
- Generadores de aire caliente eléctricos
- Generadores de aire caliente de combustión directa
- Generadores y distribución del aire en mangas de polietileno.
- Piso radiante

Los sistemas de distribución de calor por conducción se basan en tuberías de agua caliente, las diferencias entre ellos se encuentran en la temperatura del agua suministrada y su localización que puede ser:

- Suelo a nivel de cultivo.
- Tuberías enterradas sobre la raíz del cultivo.

### **III Planteamiento del problema**

La obtención de mayores ganancias en la venta de sus productos constituye una preocupación y desafío permanente para cualquier agricultor.



Este aspecto se relaciona básicamente con dos factores en la venta; una salida al mercado en un período de baja oferta, y/o una mayor calidad de los productos cosechados, ambos consecuentemente permiten ventas con mayores precios. La dificultad y de obtener productos agrícolas fuera de temporada, se soluciona cultivando estas especies bajo la protección de invernaderos.

Sin embargo el punto más importante para obtener buenos resultados agronómicos en un invernadero, es el estudio técnico del mismo, basado en las condiciones geográficas y climáticas en las cuales será instalado. De esto se derivan tanto la información precisa para construir el diseño, como las condiciones apropiadas para ejecutar de manera profesional las técnicas de manejo y siembra de cultivos diferentes de acuerdo con los resultados obtenidos.

Como consecuencia de la falta de este estudio, se han cometido enormes errores en la aplicación de la tecnología de siembra bajo invernadero en el país, de los cuales, se han derivado problemas asociados con altos costos en insumos energéticos para lograr generar el microclima provisto al cultivo, reduciendo en grandes proporciones la productividad y aumentando los costos de operación.

## **IV Propuesta de solución**

Se propone la creación de un producto informático que permita diseñar, simular y optimizar el sistema de calefacción para invernaderos. Así mismo sea capaz de determinar aquellos requisitos que este debe cumplir, en función de las condiciones climáticas de la región, si se desea obtener el máximo rendimiento de energía. Se propone utilizar la energía solar disponible en la región de Chihuahua como fuente principal de energía y la utilización del software TRNSYS 16 como plataforma de simulación.



## V Justificación

En su mayoría los invernaderos instalados en el país son de procedencia extranjera principalmente importados de Holanda, España, Israel y China. Su diseño está basado en condiciones climáticas distintas a las que se encuentran en México, e implica que tengan también necesidades energéticas diferentes. Esto hace que la mayoría de los invernaderos operen fuera de sus condiciones óptimas de diseño impactando de manera negativa a la economía del productor. Provocando que el sistema de producción deje de ser rentable y atractivo, debido a que los costos de operación son muy altos.

En el estado de Chihuahua se tienen censados, según la Asociación Mexicana de Productores de Hortalizas en Invernadero (AMPHI), al año 2008 375 hectáreas, lo cual representa un 3.76% de la superficie total destinada a este fin en el país. Sin embargo, el elevado costo requerido para climatizar adecuadamente los invernaderos, ha ocasionado que un gran porcentaje de ellos hayan sido abandonados por incosteables (Díaz 2008).

Dado que los combustibles fósiles que se utilizan actualmente son recursos limitados y con precios inciertos y por lo tanto, de gran importancia en la rentabilidad de estos sistemas, la posibilidad de utilizar energía solar térmica como fuente de energía para los procesos de calefacción, se presenta como una opción sujeta a analizarse y evaluarse.

## VI Hipótesis

Es posible desarrollar un programa informático que permita simular, diseñar y optimizar el sistema de suministro de energía térmica para calefacción en invernaderos agrícolas, basado en la utilización de energía solar, almacenamiento térmico y con apoyo de una caldera auxiliar

## VII Objetivos

### VII.1 General

Desarrollar una herramienta de cómputo en el software TRNSYS (Transient Systems Simulation Program) que permita simular la operación y correcto dimensionamiento de un campo de colectores solares, termotanques y caldera a utilizarse para suministrar la energía requerida en la calefacción de un invernadero. Lo anterior utilizando la energía solar disponible en la región de Chihuahua, como fuente principal de energía, y el calor auxiliar proveniente de la combustión de gas LP.

### VII.2 Específicos

- Evaluar el desempeño técnico de un sistema de captación solar y almacenamiento térmico para calefacción de invernaderos, los requerimientos de calentamiento auxiliar y la rentabilidad económica de su operación.
- Evaluar el ahorro en el consumo anual de energía para climatización, al comparar el comportamiento de un invernadero que utiliza únicamente sistemas de acondicionamiento climático convencionales, contra el mismo diseño físico pero utilizando energía solar y almacenamiento térmico.
- Realizar análisis paramétricos para optimizar el diseño del sistema para climatizar el invernadero, determinando la configuración funcional que resulte más rentable, analizando periodos de operación anuales, en condiciones climáticas de la ciudad de Chihuahua.

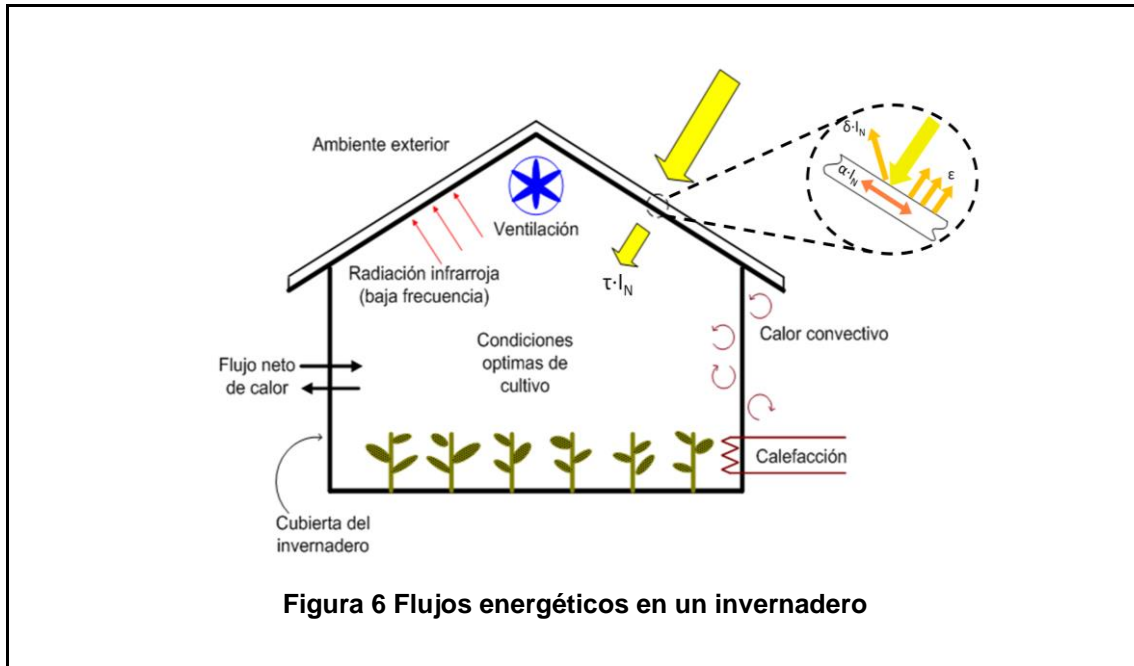
## VIII Necesidades Energéticas

La demanda energética de un invernadero depende de la relación la entre las condiciones climáticas exteriores y las necesidades ambientales de los

cultivos dentro del invernadero. Los sistemas de refrigeración y calefacción se usan para controlar la temperatura interior. Su objetivo es de lograr valores de humedad y temperatura lo más cercanos posibles a los óptimos de producción.

Con el objeto de estimar las necesidades energéticas para mantener en el rango de confort al cultivo, es decir la cantidad de energía demandada por los equipos de refrigeración o calefacción, es necesario realizar un balance de energía entre el entorno donde se encuentra localizado y el invernadero mismo.

Las plantas dentro de un invernadero se encuentran inmersas en el aire contenido por la envolvente y la estructura que forman el invernadero mismo. Estas intercambian masa (vapor de agua) y energía con el aire y la envolvente continuamente, experimentando una sensación de confort, si la temperatura y humedad relativa del aire son las adecuadas. Si se define que el aire contenido en la estructura y la envolvente es una Zona Térmica, su temperatura en cualquier instante dado está gobernada por el resultado de los flujos de calor que ocurran entre el aire y su entorno, esto es, por el balance térmico de la zona con el medio ambiente. En un invernadero la principal entrada de energía es en forma de radiación solar durante el día través de la envolvente, así como el calor generado por la actividad metabólica de las plantas, por disipación en equipos eléctricos, mecánicos e iluminación interna. Como puede observarse en la Figura 6 existen una variedad de posibles flujos de calor que pueden darse entre la zona térmica y el entorno. Pudiendo ser tanto ganancias como pérdidas de calor, como en el caso de intercambios por conducción y convección con el exterior así como pérdidas radiativas durante la noche.



Existen diversos modelos simplificados del balance de energía (Walker, 1965; Walker et al., 1974; Kindelan, 1980; Arinze et al., 1984; Boulard y Baille 1987; Baille 1996).

Una forma simplificada de la ecuación de balance de energía en un invernadero puede expresarse de la siguiente manera:

$$I_N + Q_{cli} = Q_{cc} + Q_{ren} + Q_{evp} + Q_{sue}$$

donde :

$I_N$ : Radiación solar neta incidente sobre la superficie del invernadero

$Q_{cli}$ : Energía térmica que es necesario suministrar o extraer del invernadero

$Q_{cnv}$ : Calor perdido por convección

$Q_{ren}$ : Calor sensible y latente perdido por la renovación del aire interior

$Q_{evap}$ : Calor latente consumido por la evapotranspiración de las plantas y el suelo

$Q_{sue}$ : Flujo de calor perdido por conducción a través del suelo

Estimar los flujos de energía que se dan entre el invernadero y su entorno es un problema complejo. Existen diversos métodos aproximados, en los cuales se toman valores promedio constantes, por temporada ó estación del

año, de las variables climáticas importantes para resolver el balance de energía (temperatura ambiente, irradiación, humedad relativa, velocidad del viento etc.). Si se desea conocer el resultado de realizar el balance de energía para intervalos mas cortos, y con ello disminuir el grado de incertidumbre y aumentar la confiabilidad de los cálculos del consumo de energético, es necesario conocer el patrón de comportamiento de las variables climáticas. Esto implica el poder estimar como varían las condiciones climáticas a cada hora, cada día durante todo el año, para diferentes localidades geográficas. Por ello y la gran cantidad de cálculos la única forma de poder llevar a cabo la estimación del uso de energía en edificaciones es mediante el uso de paquetes de computo, que no solo se hagan cargo de los cálculos, sino que puedan generar la información climática necesaria de forma confiable para cualquier localidad diferente, a partir de los datos climatológicos históricos disponibles.

## **IX Simulación del Uso de Energía en Edificaciones**

### **IX.1 Simulación de Sistemas Térmicos**

En la década de los 70's, como resultado de la crisis energética ocasionada por el embargo árabe del petróleo, y por el desarrollo insipiente de la tecnología de computo, se inicio el desarrollo de las metodologías de cálculo para la evaluación del comportamiento energético de equipos mecánicos, sistemas industriales y edificaciones.

El desarrollo de programas de cómputo para la simulación y evaluación de aspectos energéticos, y sus correspondientes impactos económicos, se dio tanto en centros gubernamentales de investigación como en universidades de países desarrollados. Algunos de esos paquetes fueron desarrollados para sectores específicos, tales como ASPEN, para la industria química, DOE-2 y BLAST para edificaciones y TRNSYS para sistemas compuestos por dispositivos termo mecánicos en general. El paquete de simulación TRNSYS tiene su origen en el laboratorio de energía solar de la universidad de la universidad de Wisconsin, en Madison, Wisconsin, Estados Unidos, y

actualmente se utiliza extensamente en Estados Unidos, Canadá, y en varios países de la unión europea como Alemania, Bélgica y España.

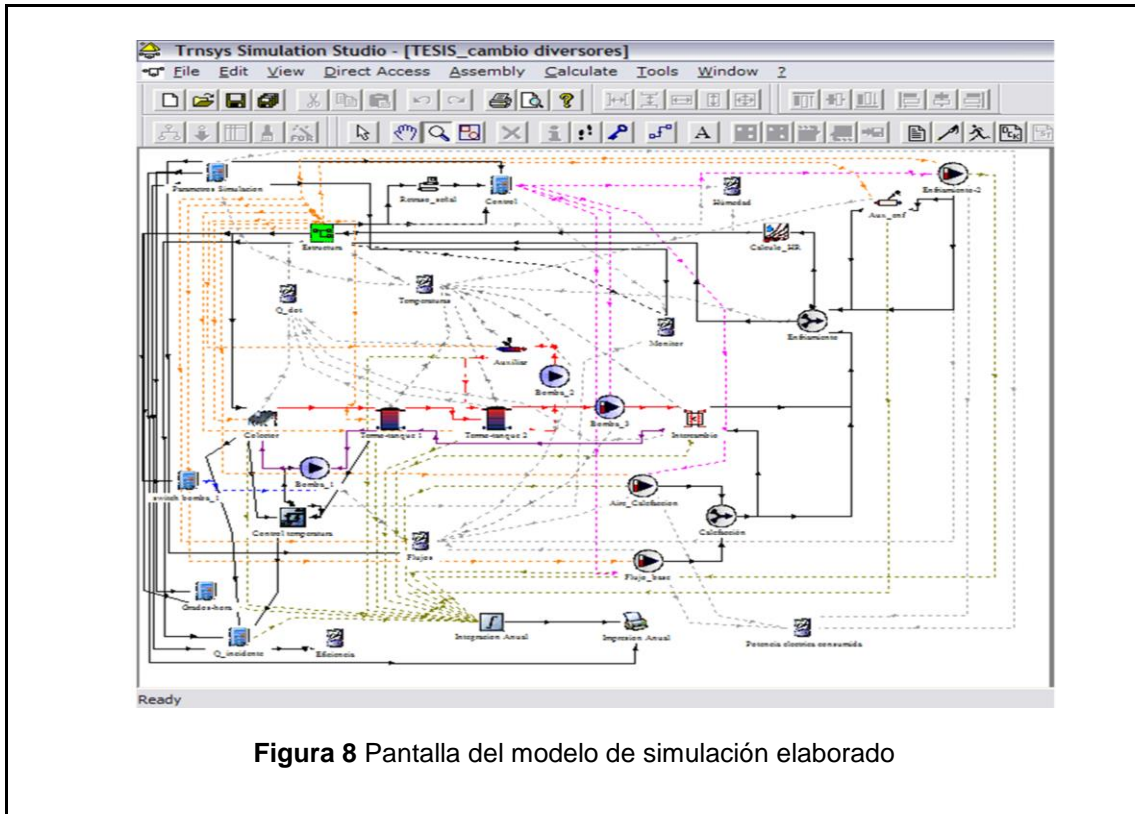
### **IX.1.1 TRNSYS**

TRNSYS es un programa de cómputo para la simulación del comportamiento de sistemas térmicos que pasan por procesos que dependen del tiempo (estados transitorios). Tiene la capacidad de simular el comportamiento de cualquier dispositivo térmico, incluyendo edificaciones y cualquier sistema de calefacción, refrigeración, ventilación o aire acondicionado (Figura 7).

El desarrollo data de hace mas de 28 años y está escrito en el lenguaje FORTRAN. Debido a su origen el programa principal, denominado “Motor” es un programa ejecutable tipo “Batch” que al correr lee los archivos de texto que contienen los datos del sistema q se desea simular, y a su vez produce varios otros archivos de texto con los resultados de la simulación. Este tipo de operación es herencia de las épocas en que todos lo programas eran necesariamente tipo “Batch” al tener que correr a partir de tarjetas perforadas.



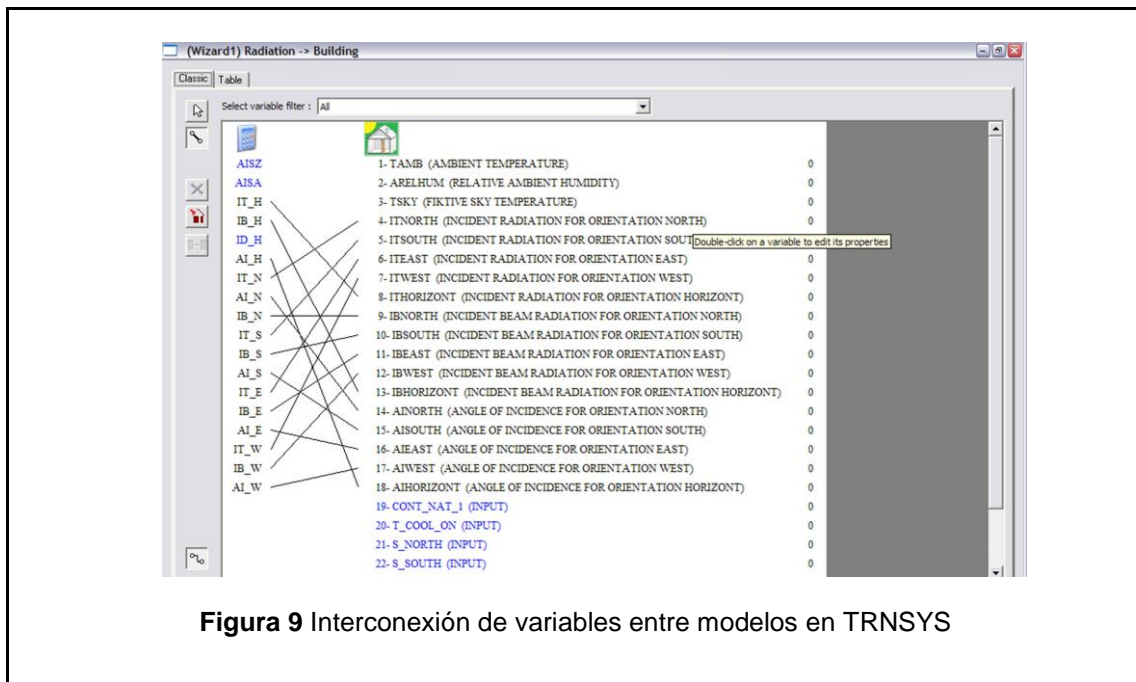
La Figura 8 muestra el simulador desarrollado, conteniendo lo modelos utilizados para la simulación del invernadero. En los siguientes párrafos se describen de manera breve los modelos utilizados.



**Figura 8** Pantalla del modelo de simulación elaborado

TRNSYS dispone de modelos matemáticos para un importante número de diferentes equipos, en forma de subrutinas. A dichos modelos se les denomina (Types) y se le distingue mediante números. El programa tiene la capacidad de permitir ensamblar cualquier sistema térmico deseado, mediante el procedimiento de seleccionar componentes de una barra de herramientas y arrastrarlas hasta la pantalla de simulación. Después se interconectan entre si de la forma deseada y se dimensionan seleccionando valores para los parámetros propios de cada componente.

La Figura 9 muestra la forma mediante la que se conectan las variables de dos modelos (Types). Las variables en la columna izquierda son variables de salida, y las situadas en la columna derecha, las variables de entrada, de los modelos a interconectar respectivamente. Los modelos mostrados en la figura corresponden a una calculadora de ecuaciones (salidas) y al modelo de la estructura del invernadero (entrada).



**Figura 9** Interconexión de variables entre modelos en TRNSYS

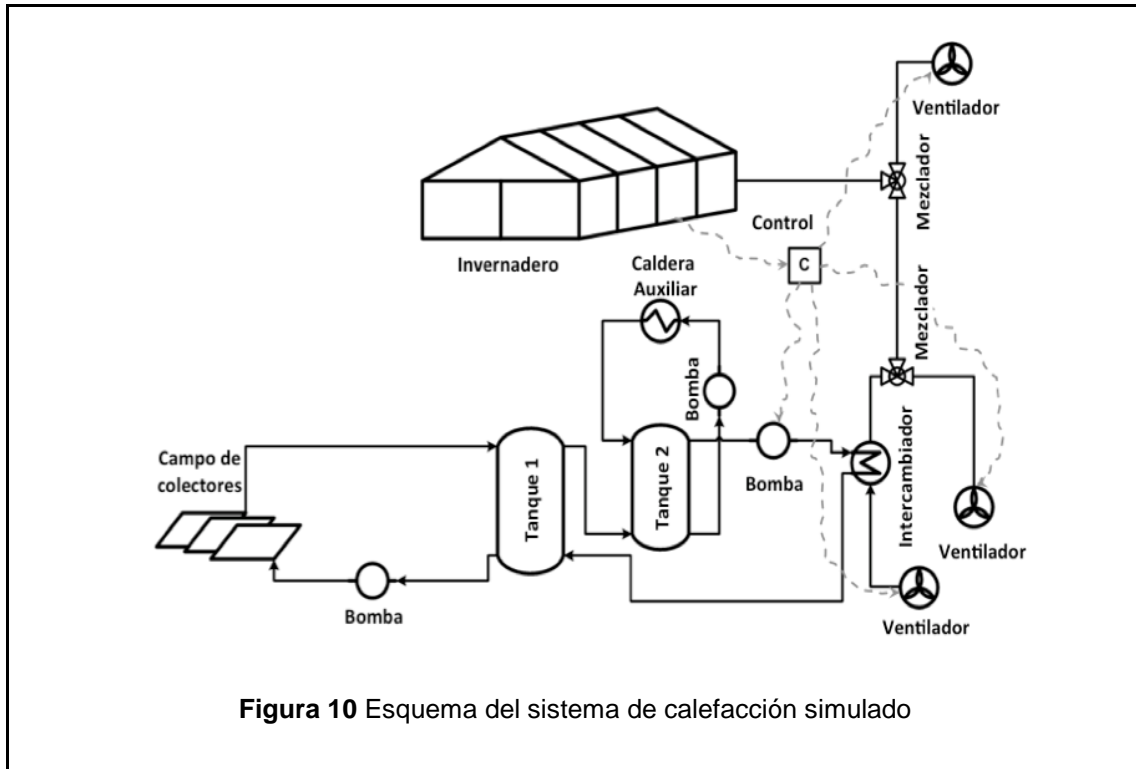
## X Modelo de simulación implementado en TRNSYS

Para el desarrollo de este trabajo se utilizó la plataforma de simulación TRNSYS versión 16. La modelación se compone principalmente de tres partes:

- Invernadero,
- Sistema de control
- Suministro energético.

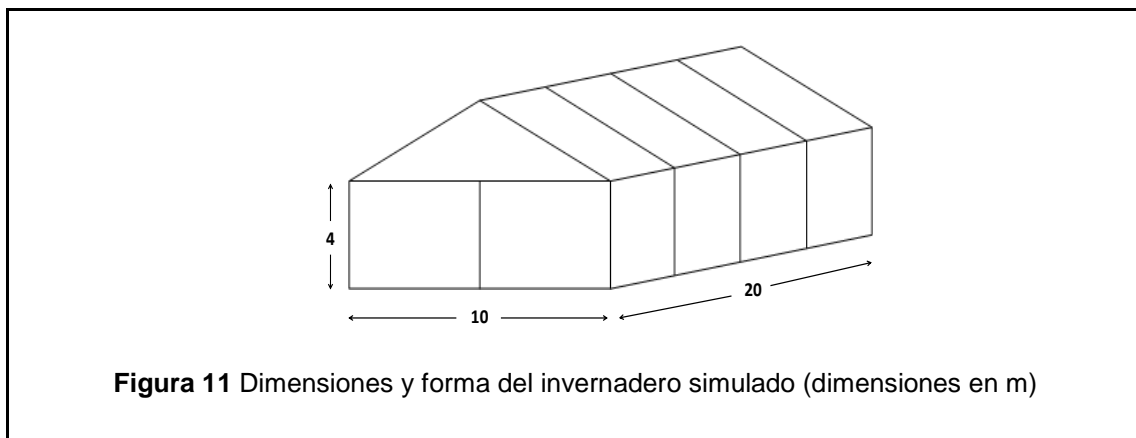
En la Figura 10 se muestra esquemáticamente la configuración del sistema simulado.



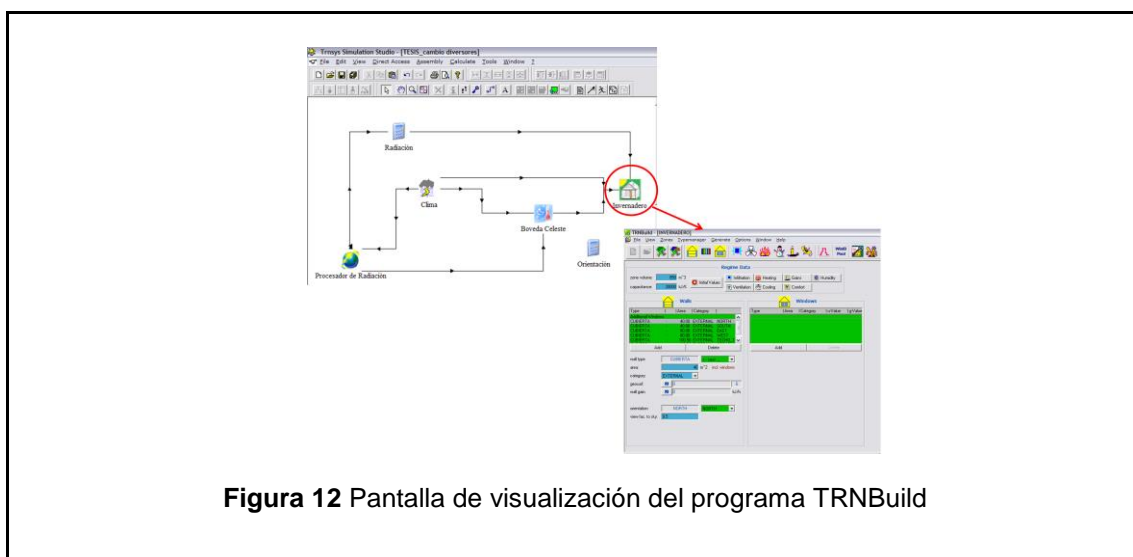


## X.1 Modelación del invernadero

El modelo del invernadero fue hecho para un invernadero tipo capilla (Figura 11) con un área superficial de  $200 \text{ m}^2$ , un volumen de  $850 \text{ m}^3$ , construido con policarbonato celular como material de envoltura. Se consideró que las plantas dentro del invernadero se encuentran en su etapa de producción, con una densidad de plantas encontrada como óptima por Cruz-Carrillo, 2003, de  $5.3 \text{ plantas/m}^2$ . La producción contemplada por planta es de  $3.30 \text{ kg/planta}$  (Cruz-Carrillo, 2003), esto se toma en cuenta para calcular la capacitancia total del invernadero. La capacitancia total del invernadero utilizada en la simulación fue de  $20000 \text{ KJ/}^\circ\text{C}$



Para la implementación del modelo del invernadero en TRNSYS se utilizó un subprograma que viene dentro de la misma plataforma de simulación llamado TRNBuild. En este programa se introducen las características y dimensiones geométricas de la estructura y se especifica su material o materiales de construcción, así como la orientación. En la Figura 12 se muestra el modelo ya implementado dentro de TRNSYS y la pantalla de visualización del TRNBuild.



**Figura 12** Pantalla de visualización del programa TRNBuild

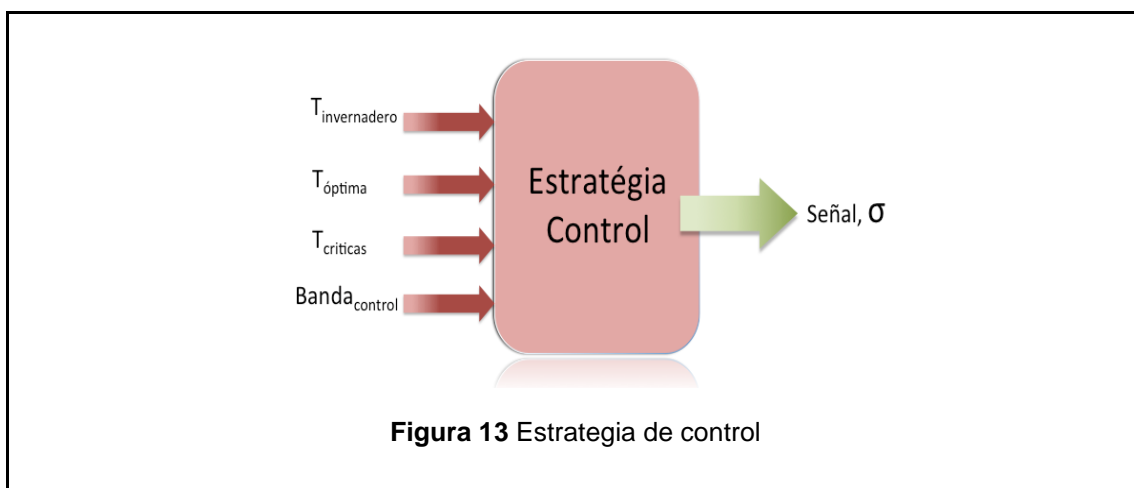
## X.2 Sistema de Control

Para lograr mantener la temperatura interna del invernadero, es necesario el poder suministrar ó bien extraer la energía térmica cuando sea requerido. Para ello se necesita tener un control sobre el prendido y apagado de los diversos equipos que se utilizan (bombas y ventiladores), así como el control sobre su funcionamiento continuo de acuerdo a las necesidades energéticas instantáneas del invernadero. El problema del control del clima en el interior del invernadero es crear un ambiente favorable que mejore el desarrollo de las plantas y minimice los precios en insumos agronómicos (fertilizantes, sustratos, fungicidas, etc) y energéticos.

Con el fin de controlar la temperatura interna del invernadero simulado y mantenerla dentro del rango de confort de cultivo se desarrollo un algoritmo de control dinámico, que permite controlar los flujos aportados por los equipos de calefacción y de enfriamiento. Este algoritmo de control a su vez también controla la ventilación del invernadero, para aprovechar al máximo la

energía disponible en el medio ambiente. El principal objetivo del sistema de ventilación es cumplir con los requerimientos de renovación de aire dentro del invernadero siempre y cuando la temperatura del exterior del invernadero se encuentre dentro de los valores mínimos y máximos soportados por el cultivo.

El sistema de control desarrollado se alimenta de la temperatura interna del invernadero, la temperatura ambiente, temperatura óptima de cultivo, temperaturas máximas y mínimas soportadas por el cultivo, y una banda de control de temperatura. La banda de control de temperatura es la tolerancia que se le da al algoritmo para que la temperatura interna del invernadero se acerque a las temperaturas máxima y mínima, o a la temperatura óptima. Con los datos de entrada el sistema de control genera señales para controlar los flujos de ventilación, calefacción y enfriamiento que intervienen en la climatización del invernadero.

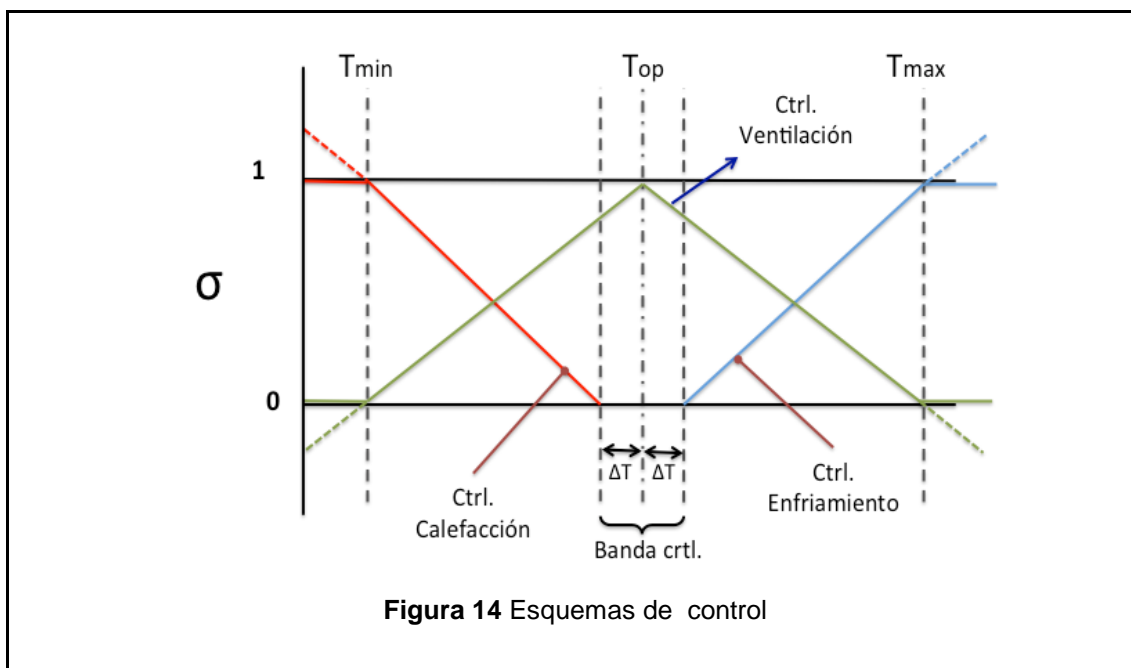


El sistema de control desarrollado censa a cada instante (paso de simulación) la temperatura interna del invernadero, la cual varía de acuerdo a los flujos de calor que este experimenta con el medio ambiente. Si la temperatura ambiente se encuentra dentro de la zona de confort del cultivo el sistema de control se encarga de encender el sistema de ventilación.

Al estar activo el sistema de ventilación la temperatura interna del invernadero seguirá de manera paralela a la temperatura ambiente, sin embargo, cuando la temperatura interna se empieza a alejar de la temperatura óptima, el flujo aportado por el sistema de ventilación empieza a

ser restringido por el control y los flujos de calefacción o enfriamiento según sea la necesidad, se incrementan.

Como se puede observar en la Figura 14 los sistemas de calefacción y enfriamiento no empiezan a operar inmediatamente después de que la temperatura interna del invernadero se aleja de la óptima de cultivo, esto es para dar una tolerancia antes de encenderlos o apagarlos y con ello evitar un funcionamiento intermitente de los equipos.



La banda de control es un valor que se da para establecer cuantos grados se puede alejar la temperatura interna del invernadero antes de mandar la señal de prendido a los sistemas de climatización. Los cambios de señal generados por el sistema de control responden de manera lineal a los cambios de temperatura interna del invernadero a continuación se presenta la modelación matemática del esquema de control.

### X.2.1 Control para el sistema de calefacción

Conociendo la pendiente que tiene el control de calefacción, y la cual está dada por:

$$m_{calef} = \frac{-1}{(T_{op} - \Delta T) - T_{min}}$$

como esta es constante, de la ecuación

$$\frac{y - y_1}{x - x_1} = m$$

tomando las coordenadas  $(T_{min}, 1)$ ,  $(T_{inv}, y)$  el valor de señal para el sistema de calefacción queda de la siguiente manera:

$$y_{cal} = (m_{calef} * T_{inv}) - (m_{calef} * T_{min}) + 1$$

donde  $T_{inv}$  es el valor instantáneo de la temperatura interna del invernadero.

Como la señal de control del sistema de calefacción se requiere que oscile entre cero y uno, se tuvo que condicionar de la siguiente manera mediante funciones lógicas en TRNSYS.

Si  $0 \leq y_{cal} \leq 1$  entonces

$$y_{cal} = y_{cal}$$

Si  $y_{cal} \leq 0$  entonces

$$y_{cal} = 0$$

Si  $y_{cal} \geq 1$  entonces

$$y_{cal} = 1$$

### **X.2.2 Control para el sistema de enfriamiento**

De manera análoga para el sistema de enfriamiento, la pendiente se describe de la siguiente manera:

$$m_{enf} = \frac{1}{T_{max} - (T_{op} + \Delta T)}$$

Al igual que el sistema de calefacción es necesario conocer el valor de la señal de enfriamiento pero ahora con las coordenadas  $(T_{max}, 1)$  y  $(T_{inv}, y)$  quedando de la siguiente manera:



$$y_{enf} = (m_{enf} * T_{inv}) - (m_{enf} * T_{max}) + 1$$

obedeciendo también a las siguientes condiciones para su uso dentro de TRNSYS:

Si  $0 \leq y_{enf} \leq 1$  entonces

$$y_{enf} = y_{enf}$$

Si  $y_{enf} \leq 0$  entonces

$$y_{enf} = 0$$

Si  $y_{enf} \geq 1$  entonces

$$y_{enf} = 1$$

### **X.2.3 Control para el sistema de ventilación**

Como ya se mencionó anteriormente el sistema de ventilación se utiliza para mantener las tasa de renovación del aire interior del invernadero y para disminuir las cargas de energía requeridas por los equipos de calefacción y enfriamiento. Si el valor de la temperatura del medio ambiente esta por arriba de la temperatura del invernadero, el sistema de ventilación enciende para auxiliar al sistema de calefacción, si es el caso contrario este se apaga para evitar degradar la energía que el sistema de calefacción suministra.

Sin embargo si la temperatura del medio ambiente esta por debajo de la temperatura del invernadero el sistema de ventilación enciende para enfriar el invernadero y con ello auxiliar al sistema de enfriamiento, si es el caso contrario este se apaga.

Si el valor de la temperatura del invernadero es igual al valor de temperatura optima de cultivo el sistema de ventilación permanece apagado para garantizar el confort de las plantas dentro del invernadero. El modelo matemático implementado en TRNSYS se muestra a continuación.

$$m_{vencl} = \frac{1}{T_{op} - T_{min}} \quad m_{venenf} = \frac{1}{T_{max} - T_{op}}$$



Si  $T_{op} = T_{inv}$

$$y_{vent} = 0$$

Si no

Si  $T_{op} > T_{inv}$

Si  $T_{op} > T_{amb}$

$$y_{vent} = m_{venca}(T_{amb} - T_{inv})$$

Si no

$$y_{vent} = m_{venca}(T_{op} - T_{inv})$$

si no

Si  $T_{op} < T_{amb}$

$$y_{vent} = m_{venef}(T_{inv} - T_{amb})$$

si no

$$y_{vent} = m_{venef}(T_{inv} - T_{op})$$

La señal de control para el sistema de ventilación también se condicionó de la siguiente manera para concordar con las señales requeridas por dispositivos simulados en TRNSYS:

Si  $0 \leq y_{ven} \leq 1$  entonces

$$y_{vent} = y_{vent}$$

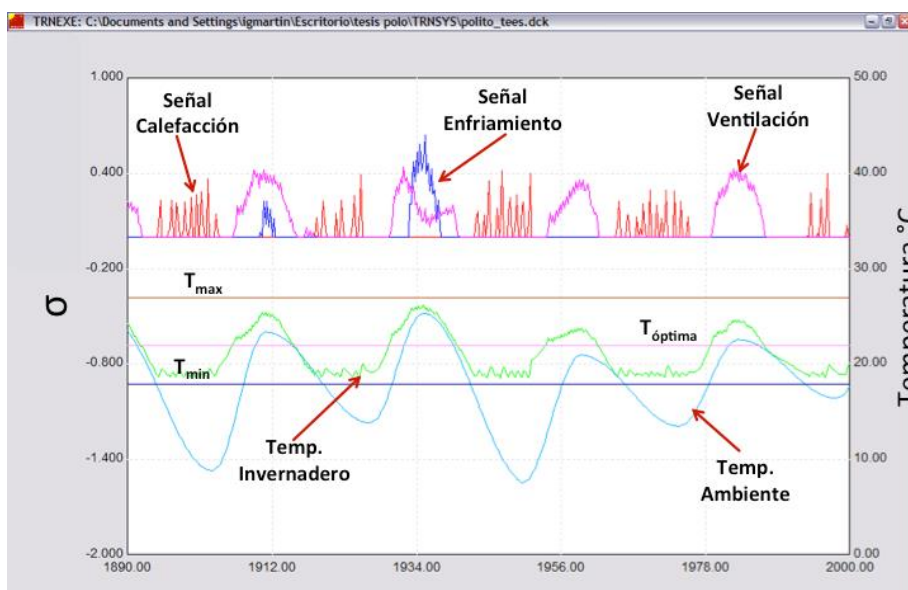
Si  $y_{vent} \leq 0$  entonces

$$y_{vent} = 0$$

Si  $y_{vent} \geq 1$  entonces

$$y_{vent} = 1$$

En la Figura 15 se observa el comportamiento de las señales de control para los tres distintos sistemas de climatización del invernadero. Como se puede observar, el sistema de ventilación puede trabajar junto con cualquiera de los otros dos sistemas ya sea enfriamiento ó calefacción, pero los sistemas de calefacción y enfriamiento nunca trabajaran de manera simultanea.



**Figura 15** Pantalla que muestra el comportamiento de las señales de control para los diferentes sistemas de climatización del invernadero

#### **X.2.4 Esquemas de control**

Se utilizaron dos esquemas diferentes de controlar la temperatura dentro del invernadero, una de ellas fue de manera “**estricta**” en la cual se forza a la temperatura interna del invernadero a permanecer lo mas cerca posible al valor de temperatura de confort del cultivo. El segundo esquema utilizado se denominó “**flexible**” y este evita que la temperatura del invernaderos caiga por debajo del valor de la temperatura mínima de cultivo o exceda el valor de temperatura máxima.



En la Figura 16 y Figura 17 se puede observar el comportamiento de la temperatura dentro del invernadero, con los dos esquemas de control utilizados en el simulador.

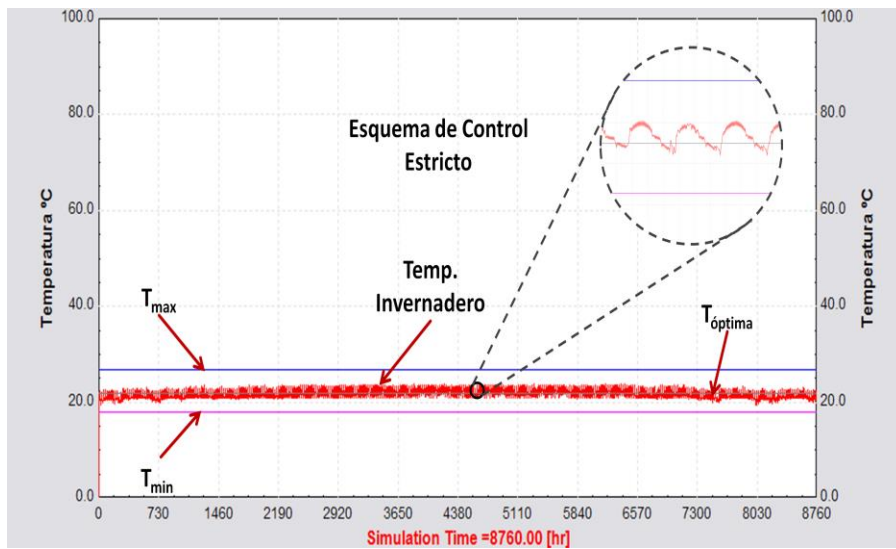


Figura 16 Esquema de control Estricto

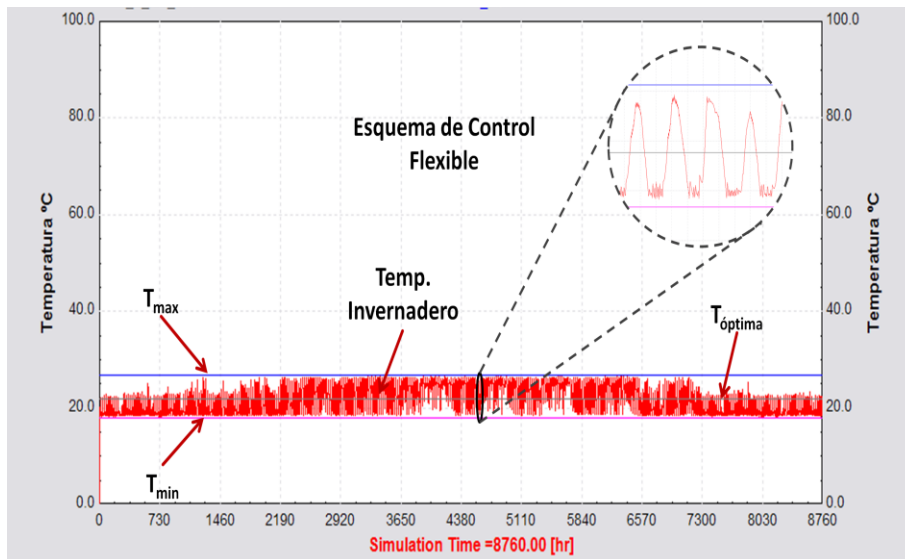


Figura 17 Esquema de control Flexible

### **X.3 Sistema de suministro energético**

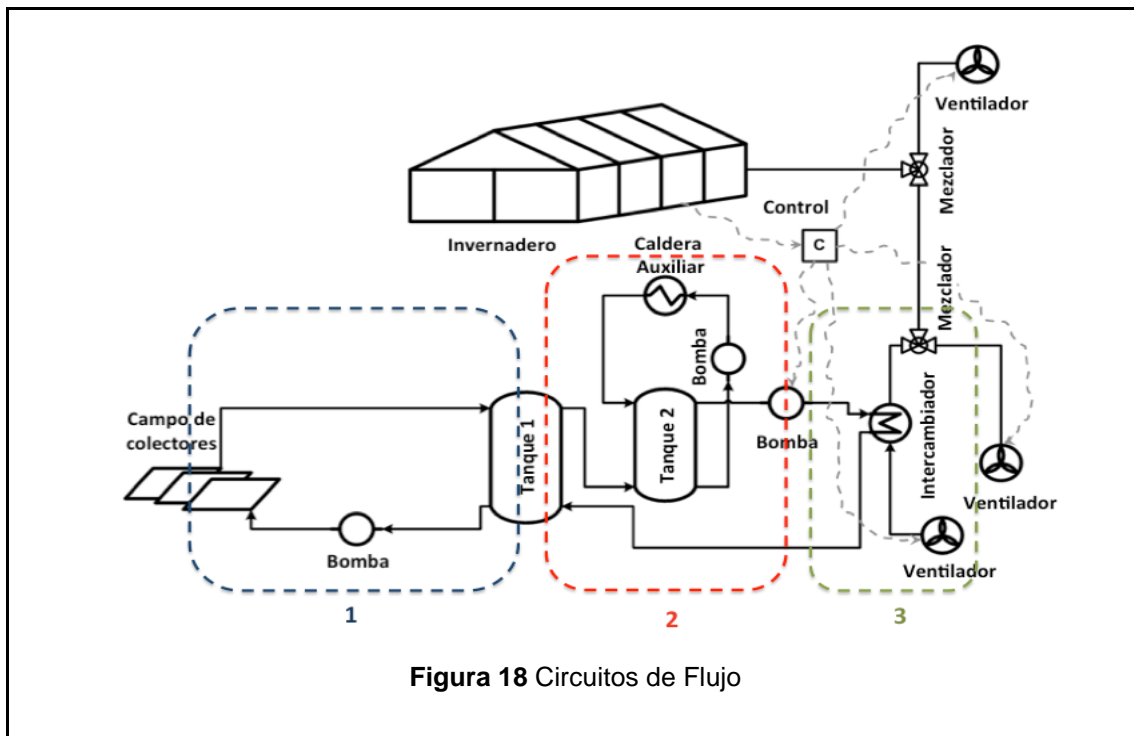
Durante la revisión de la literatura disponible y las aplicaciones de las diferentes maneras para suministrar calefacción a invernaderos, se optó por hacerlo mediante aire caliente. Sheti y Sharma 2008, establecen que los métodos mas utilizados para la calefacción de invernaderos son aquellos que utilizan pisos o tuberías radiantes, no obstante, observan y recomiendan, que estos sean utilizados en lugares donde la necesidad energética es de manera continua, es decir en lugares donde la temperatura ambiente sea muy fría o donde los niveles de radiación sean muy bajos.

Chihuahua, es uno de los estados con uno de los promedios de insolación mas altos del país, inclusive en temporada invernal se tienen días despejados y soleados la mayor parte de la temporada. Esta razón motivo el uso de aire caliente como sistema para llevar acabo la calefacción del invernadero ya que el suministro de energía se llevaría acabo de manera nocturna o durante algún día frio.

#### ***X.3.1 Funcionamiento del sistema de calefacción***

Se utiliza agua como fluido de trabajo para la captación y almacenamiento de energía solar térmica, y para calentar la corriente de aire atmosférico que provee el calentamiento del invernadero.

Se tienen tres circuitos principales de flujo como se muestra en la Figura 18.



**Figura 18** Circuitos de Flujo

El primero circuito de flujo lleva agua fría del fondo del primer termo tanque estratificado hacia el campo de colectores solares. Este circuito funciona cuando en el sistema la diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida de los colectores es de 10 °C. Se optó por un control de temperatura en lugar de uno por radiación debido a que, aunque se tenga radiación solar incidiendo sobre el colector, esta pudiera no ser la suficiente para incrementar la temperatura del líquido entrante. Con ello la energía captada y almacenada se podría regresar al medio ambiente.

El segundo circuito de flujo lleva el agua caliente de la parte superior del primer termo tanque hacia la parte inferior del segundo termo tanque, de aquí el agua se hace pasar a través de la caldera auxiliar, la cual censará la temperatura del agua, y en caso de ser necesario, suministrará la energía necesaria para mantener en un valor mínimo determinado la temperatura del segundo termo tanque. Si la temperatura del agua caliente que pasa a través de la caldera es mayor al valor determinado, debido al calentamiento en el campo de captación de energía solar, entonces, la caldera auxiliar permanece apagada, y el circuito opera con la temperatura existente en el segundo termo tanque.

El tercer circuito de flujo lleva el agua caliente del segundo termo tanque hacia el intercambiador de calor y la regresa hacia la parte fría del primer tanque. Mediante esta corriente de flujo se calienta aire atmosférico para suministrar la calefacción al invernadero al pasar por el intercambiador de calor.

Adicionalmente se tienen dos circuitos mas, uno de ventilación y otro para el enfriamiento del invernadero

### ***X.3.2 Sistemas Adicionales***

Se cuenta con dos sistemas adicionales al de calefacción, los cuales son el sistema de refrigeración y el sistema de ventilación del invernadero.

El sistema de refrigeración consta de una corriente de aire atmosférico la cual es forzada a pasar a través de una unidad de enfriamiento auxiliar, para posteriormente ser llevada dentro del invernadero y con ello mantener la temperatura por debajo de la temperatura máxima que soporta el cultivo.

La cantidad de energía requerida por este sistema no es analizada en este trabajo, ya que el interés principal es conocer la cantidad de energía necesaria para la calefacción del invernadero y el suministro de la misma a partir del uso de energía solar.

El sistema de ventilación consta de un ventilador que introduce aire atmosférico hacia el interior del invernadero. Mediante el esquema de control descrito anteriormente este ventilador ayuda a disminuir la demanda de energía requerida por los sistemas de refrigeración y calefacción al aprovechar la energía disponible en el medio ambiente.

## **X.4 Equipos utilizados**

### ***X.4.1 Condiciones Ambientales***

#### **Generador de clima**

Los datos climatológicos correspondientes a la ciudad de Chihuahua Chih., son generados por el TYPE 54, basándose en datos experimentales promedio de temperatura ambiente, irradiación solar, humedad relativa y altitud. La obtención de los datos climatológicos requerida por TRNSYS fue

tomada de Martín-Domínguez y Hernández-Álvarez, 2002, en donde se presentan los datos para cuatro ciudades del estado de Chihuahua.

### **Procesador de radiación**

Corresponde al TYPE 16, este modelo toma el dato de radiación total horizontal horaria producido por el generador de clima y lo procesa para obtener valores de radiación sobre superficies horizontales o inclinadas hasta intervalos de tiempo no menores a 15 minutos.

#### ***X.4.2 Equipo termo-mecánico***

### **Bombas**

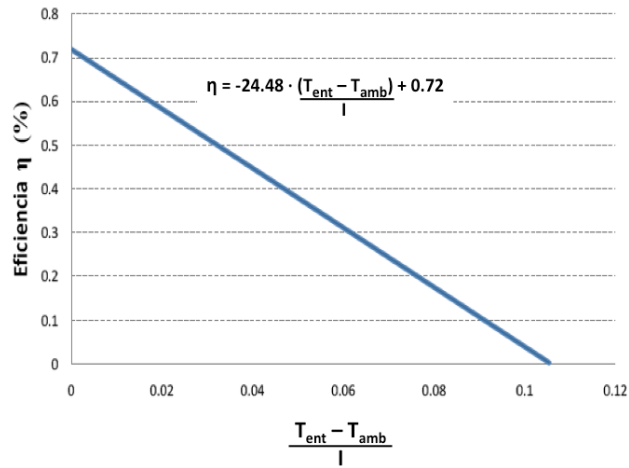
En este trabajo se utilizaron dos tipos de bombas, de caudal fijo y de caudal variable. Las bombas de caudal fijo corresponden al TYPE 3 de TRNSYS, este tipo de bomba trabaja en función de una señal con valores de 0 y 1 que corresponden al prendido y al apagado respectivamente.

Las bomba de caudal variable corresponde al TYPE 110, este tipo de bomba es capaz de mantener un caudal de salida entre 0 y un valor nominal. La tasa de flujo de la bomba varía linealmente con respecto a una señal de control (0 y 1).

### **Colectores**

El modelo utilizado en este trabajo corresponde al TYPE 1a, el cual modela el comportamiento térmico de un colector de placa plana. A este modelo se le debe proporcionar los datos de la curva de eficiencia, obtenidos de las pruebas experimentales realizadas al colector.

Los datos provistos al modelo corresponden a un colector con curva de eficiencia térmica lineal, correspondientes a un modelo disponible comercialmente en México. Tales colectores disponen de un área de captación de 1.86 m<sup>2</sup>. La curva de eficiencia provista por el fabricante señala una ordenada al origen de 0.72 y una pendiente de 24.48 KJ/(h·m<sup>2</sup>·K) mostrada en la Figura 19, y establece que el flujo a través del colector durante la prueba fue de 2 L/min.



**Figura 19** Curva de eficiencia del colector usado en la simulación

### Caldera Auxiliar

Para la caldera auxiliar se utilizó el TYPE 6. Este dispositivo auxiliar está diseñado para suministrar calor a la corriente de agua que pasa a través de esta, a una tasa menor que la máxima especificada. Funciona por medio de una señal externa de control de prendido y apagado, 0 y 1 respectivamente. Si se especifica que el valor de la señal es 1 y este constante, además de suministrar un valor lo suficientemente alto a la cantidad de calor que este es capaz de entregar, el dispositivo auxiliar para calentamiento operará como un calentador de agua doméstico para mantener la temperatura constante de salida de la corriente de agua en un valor dado.

### Mezcladores de flujo

Para el manejo de las diferentes corrientes de aire se utilizaron Te's, estas corresponden al TYPE 11 dentro de TRNSYS.

### Intercambiador

Se utilizó un intercambiador de calor a contraflujo que corresponde al TYPE 5a en TRNSYS. Se utiliza como un intercambiador de efectividad constante, con un valor de efectividad de 90%. Se modeló de manera que la corriente de flujo con mayor capacidad calorífica, fuera la de agua y la de aire la menor.

$$C_{max} = \dot{m}_{agua} C_{p_{agua}}$$

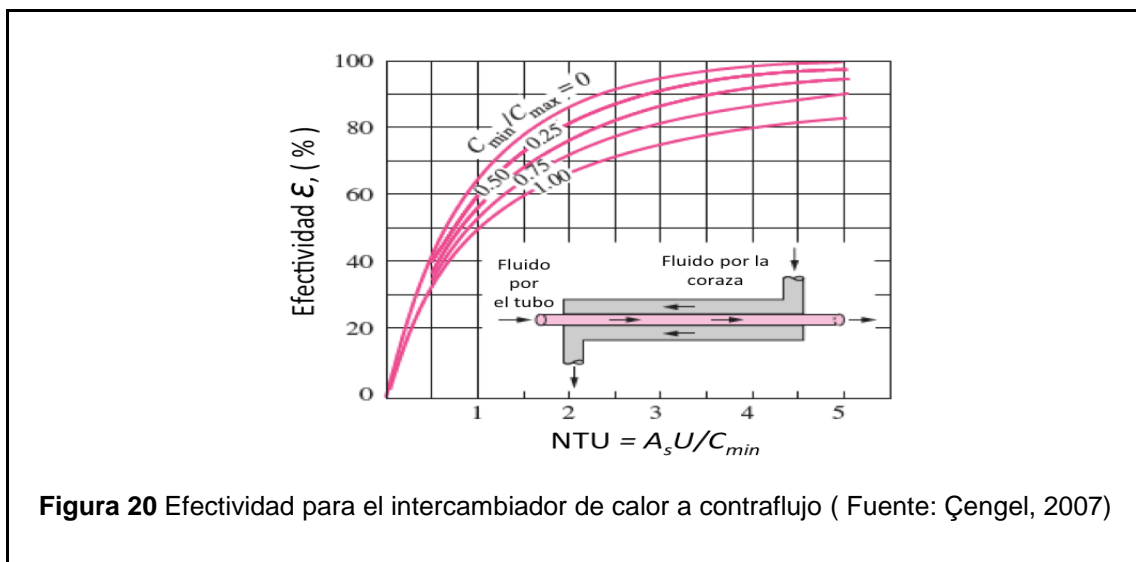
$$C_{min} = \dot{m}_{aire} C_{p_{aire}}$$

la relación usada entre las capacidades caloríficas de ambas corrientes de flujo es de:

$$0.25 = C_{aire} / C_{agua}$$

el número de unidades de transferencia resultante fue de 3 (Figura 20). De manera que, para mantener la efectividad constante, debido al sistema de control y la variación de flujos, el flujo de la corriente de aire a través del intercambiador quedó en función del gasto de agua de la corriente caliente.

$$\dot{m}_{aire} = 0.25 \dot{m}_{agua} C_{p_{agua}} / C_{p_{aire}}$$



## Tanques de almacenamiento

Los termo tanques se simulan utilizando el modelo de tanque estratificado TYPE 4c. El volumen del primer termo tanque es una variable a analizar. El primer tanque se modela como un tanque con 10 niveles de estratificación con una altura de 15 cm cada nivel. Se asume que la temperatura del agua en cada nivel es uniforme. El segundo tanque de almacenamiento se simula como un tanque perfectamente mezclado declarando que solo se compone de un solo nivel de estratificación. El modelo utilizado permite el cálculo de las pérdidas de energía térmica hacia el medio ambiente, en este trabajo se considero que ambos tanques son adiabáticos.

### **Unidad de refrigeración auxiliar**

Para la unidad de refrigeración se utilizó el TYPE 92. Este dispositivo auxiliar esta diseñado para extraer el excedente de calor a la corriente de aire que pasa a través de el a una tasa menor que la especificada. Funciona por medio de una señal externa de control de prendido y apagado, 0 y 1 respectivamente. Si se especifica que el valor de la señal es 1 y este constante, además de suministrar un valor lo suficientemente alto a la cantidad de calor que este es capas de extraer, el dispositivo auxiliar enfriamiento operará como una unidad de refrigeración domestica para mantener la temperatura constante de salida de la corriente de aire en un valor dado.

### **Ventiladores**

Se utilizó un ventilador de velocidad variable correspondiente al TYPE 111b, este tipo modela un ventilador capas de trabajar a cualquier velocidad entre 0 y la velocidad especificada. La cantidad de flujo másico que el ventilador mueve está directamente relacionada con la señal de control que este recibe.



## XI Análisis paramétrico

La cantidad de variables que intervienen en la simulación del sistema de calefacción es numerosa. El comportamiento del sistema que se simuló es, principalmente función de variables ambientales, equipo térmico y flujo de fluidos.

Por su naturaleza cambiante el análisis de sistemas que dependen del clima es muy complicado y resulta difícil el hacer comparaciones con diferentes configuraciones de variables.

La modelación del sistema de calefacción y su implementación en la TRNSYS, permite analizar el efecto de cualquier variable que interviene en el diseño del sistema. En este trabajo se analizó el efecto de simular un sistema de calefacción cambiando las siguiente variables mostradas en la Tabla 1.

**Tabla 1** Variables analizadas en el análisis paramétrico

Variable	Rango	Unidades
Numero colectores	10 - 100	colectores
Volumen primer TT	3,6,12,18,24	m <sup>3</sup>
Temperatura almacenamiento 2do TT	30 - 90	°C
Esquema Control	--	--

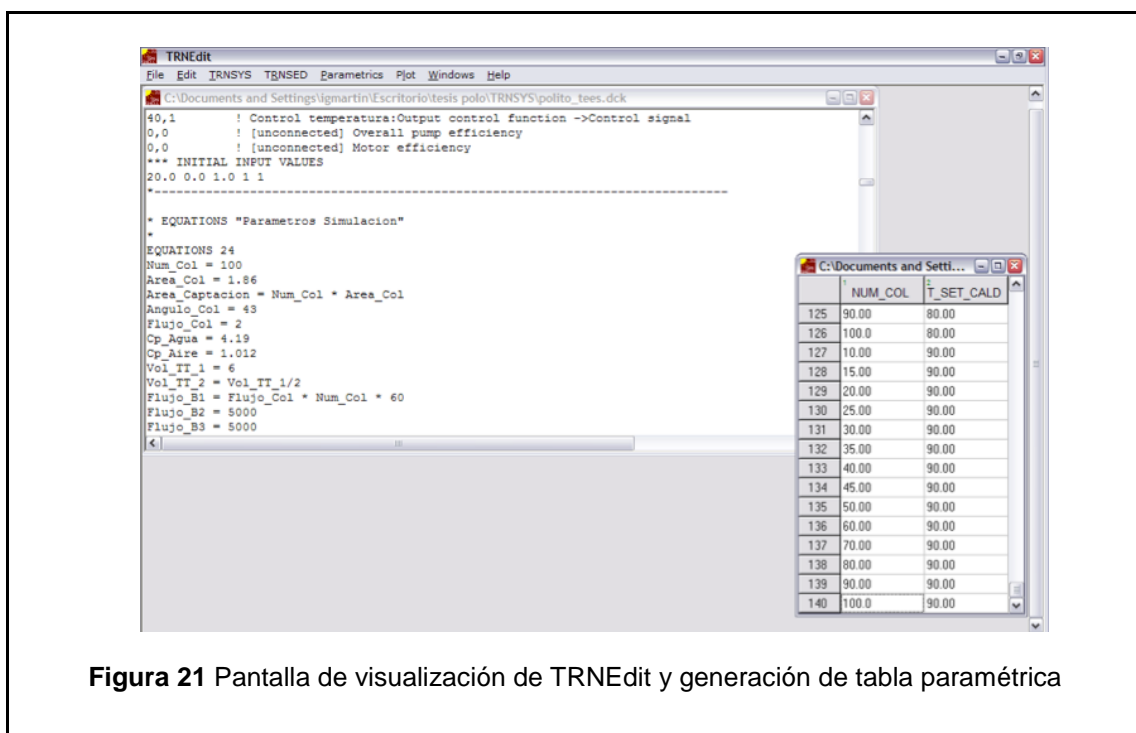
De la combinación de los parámetros analizados se obtuvo un total de 1400 corridas de simulación.

En cada caso, el modelo completo de simulación evaluó, cada 15 minutos durante todo el año:

- La radiación solar disponible sobre las superficies de los colectores y del invernadero
- La temperatura del medio ambiente
- La interacción térmica del invernadero con el medio ambiente

- La captación de energía solar y su transformación en energía térmica en un campo de colectores solares
- El comportamiento del sistema de almacenamiento térmico, y el suministro energía al invernadero.
- El consumo de energía auxiliar requerido para mantener las condiciones requeridas por el cultivo

Para poder realizar el análisis paramétrico en TRNSYS se utilizó la herramienta TRNEDIT dentro del programa, la cual se usa para editar los archivos de entrada al programa. Modificando el archivo madre se crea la instrucción para que TRNSYS corra una tabla paramétrica modificando solo el valor de los parámetros seleccionados para cada corrida de simulación. En la Figura 21 la pantalla de visualización de TRNEdit, en ella se puede ver la codificación del programa del sistema simulado.



**Figura 21** Pantalla de visualización de TRNEdit y generación de tabla paramétrica

## XII Análisis Económico

La base de la mayoría de las decisiones tomadas en ingeniería son económicas. Diseñar y construir un dispositivo o sistema, el cual funcione correctamente, es solo una parte de la tarea ingenieril. El dispositivo o sistema en adición debe de ser económico, lo cual significa que la inversión realizada debe de ser recuperada con una tasa y periodo de retorno adecuados. En el estudio de sistemas termo-solares, una de las claves es la optimización, y la función que generalmente es optimizada es el potencial de beneficio.

A veces el diseñador busca la solución con un costo mínimo inicial, ó con mayor frecuencia, el costo mínimo de vida útil total del dispositivo o sistema diseñado.

Dado que la instalación de sistemas termo-solares generalmente es para la reducción de gastos en insumos energéticos de convencionales. La rentabilidad de estos se determina al comparar los costos de adquisición, mantenimiento y operación contra los ahorros obtenidos por dejar de consumir combustibles fósiles durante un periodo de tiempo estimado.

Para poder estimar la rentabilidad del sistema propuesto, se utilizó la función financiera del Valor Presente con Gradiente (GWPF por sus sigas en ingles). El GWPF se basa en la suposición teórica de que una cantidad, como el costo dela energía, aumentará una cantidad igual cada periodo de tiempo y que esta situación se mantendrá así durante un cierto numero de periodos. Aunque en la practica esto casi nunca sucede, ya que no es posible determinar con exactitud los incrementos o disminuciones graduales de los costos mencionados.

El GWPF se define mediante la siguiente formula:

$$GPWF = PC \left[ \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] + \left\{ G \frac{1}{i} \left[ \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} - \frac{n}{(1+i)^n} \right] \right\}$$

donde:

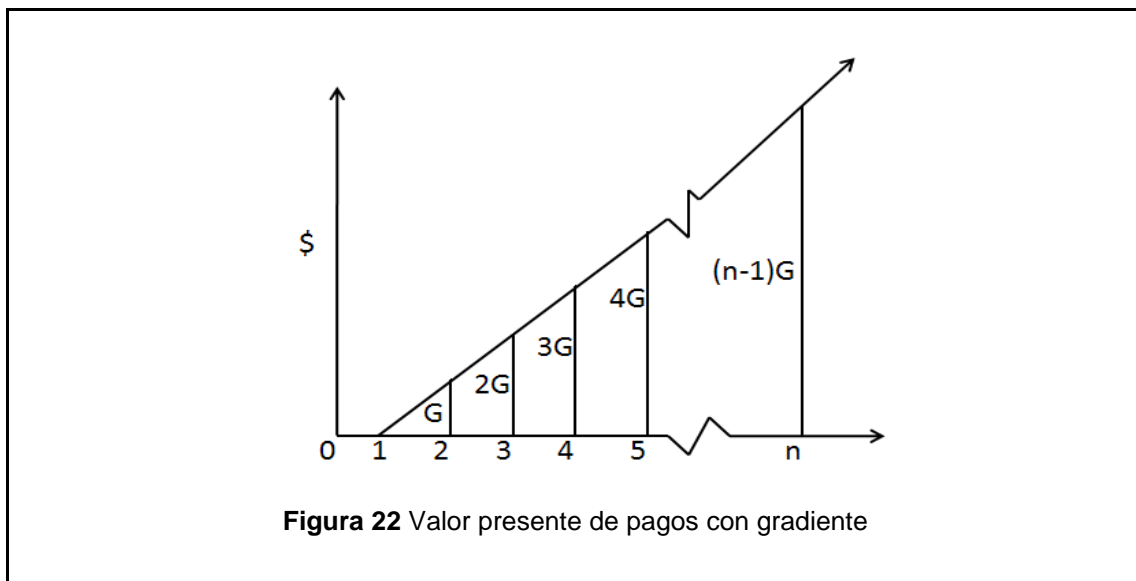
**PC** es la cantidad inicial a pagar en el periodo 1

$G$  es el gradiente que sufrirá la cantidad a pagar durante un numero de periodos establecido.

$n$  es el numero de periodos a analizarse

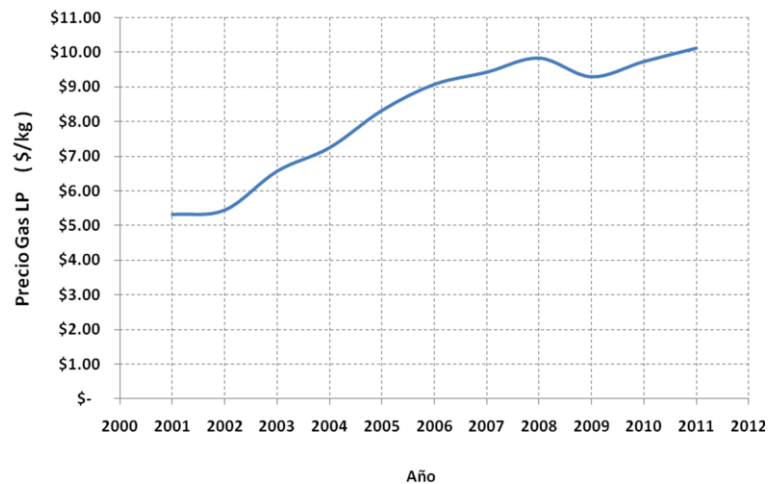
$i$  el interés que sufre la cantidad en el tiempo

Como se puede observar en la Figura 22 el costo de operación del primer año no tiene incremento, para el segundo periodo sufre un incremento  $G$  al final del segundo año,  $2G$  al final del tercer año, y así sucesivamente.



Para el análisis financiero se consideró que el consumo energético anual calculado permanece constante durante el periodo de operación del invernadero. La norma mexicana, NMX-E\_255\_CNCP-2008 “Invernaderos- Diseño y Construcción- Especificaciones” establece que la vida útil de un invernadero debe ser de 10 años, dado lo anterior este fue el periodo de tiempo que se tomó para llevar a cabo el análisis de rentabilidad.

En México el incremento histórico que ha sufrido el gas LP en los últimos diez años es del 90% (Figura 23). Se establece que esta condición se repite durante los diez años de operación del invernadero y se tomo como incremento anual del combustible el 9%.



**Figura 23** Incremento histórico al gas LP en México (fuente: elaboración propia con datos de Diario oficial de la federacion)

El costo financiero del dinero es igual a la inflación promedio que ha sufrido el país de igual manera en los últimos diez años, esta es del 5%.

### XIII Resultados

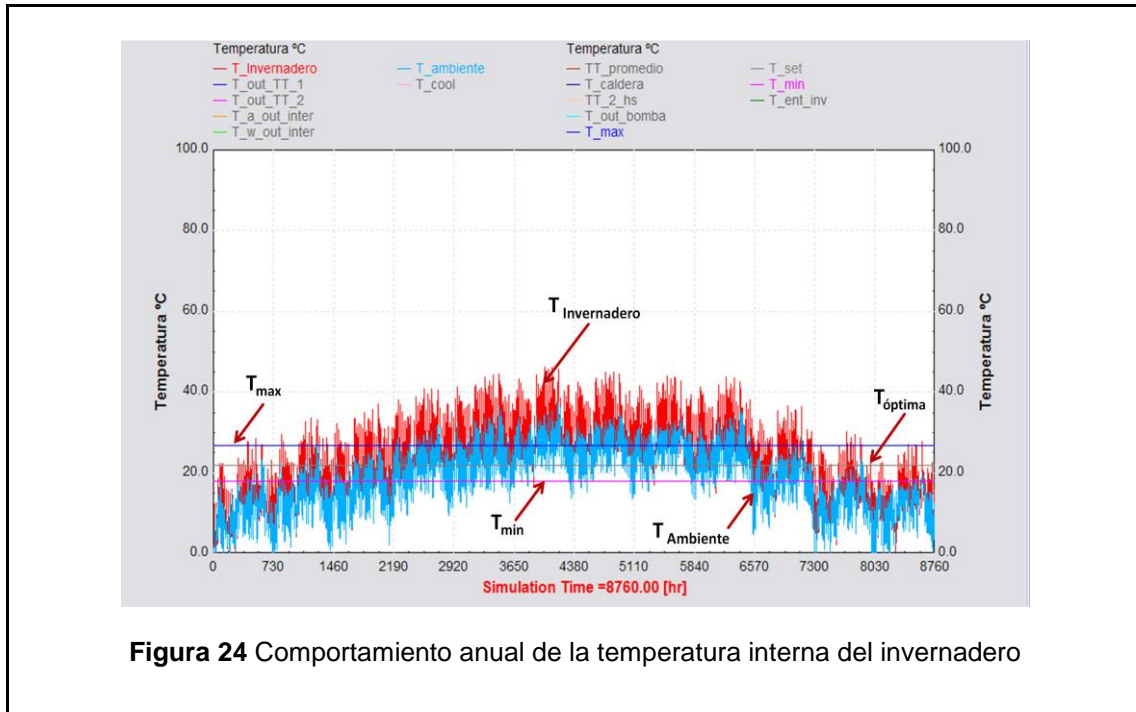
Una vez implementado el simulador dentro de la plataforma TRNSYS, se realizaron el numero de corridas resultantes de la combinación del cambio de valores a los parámetros seleccionados para su estudio. Posteriormente, los datos numéricos arrojados por el simulador fueron almacenados y trabajados en hojas de cálculo electrónicas.

Se simularon tres invernaderos idénticos simulados, uno dotado de climatización convencional, a partir de la combustión de gas L.P., otro dotado de los sistemas basados en energías renovables, y un tercero sin climatización, que sirvió de comparativo ante los otros dos mencionados.

#### XIII.1 Invernadero sin acondicionamiento térmico

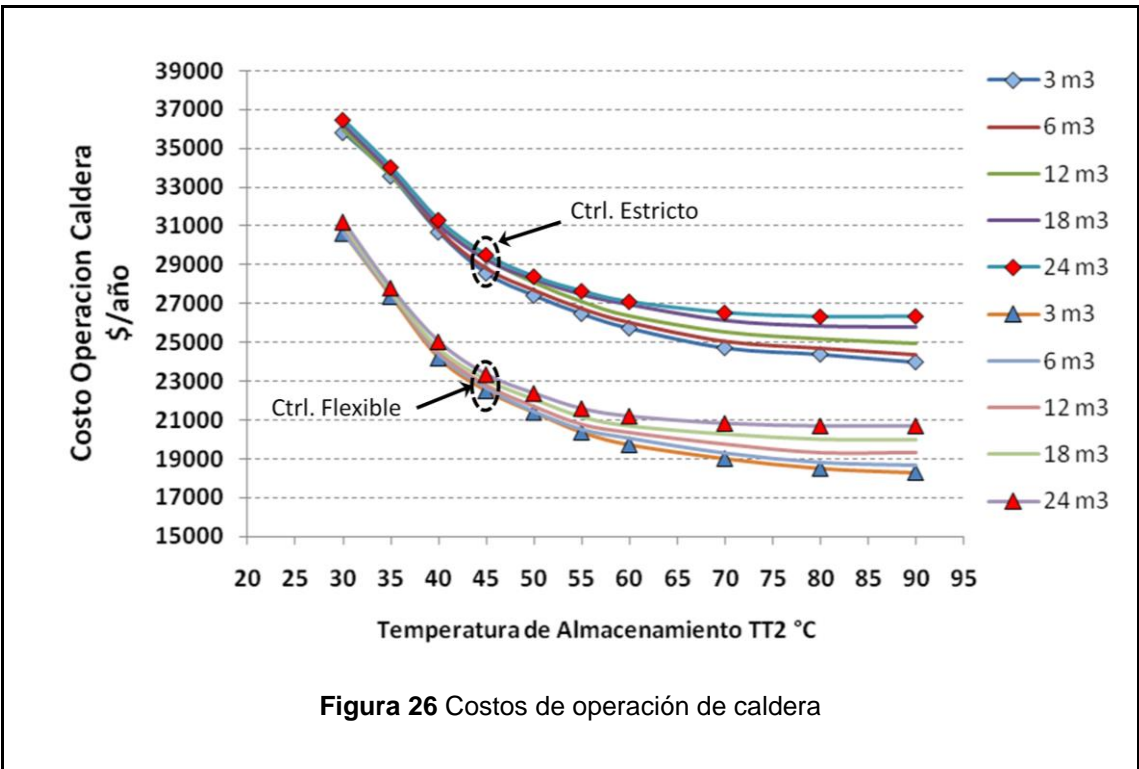
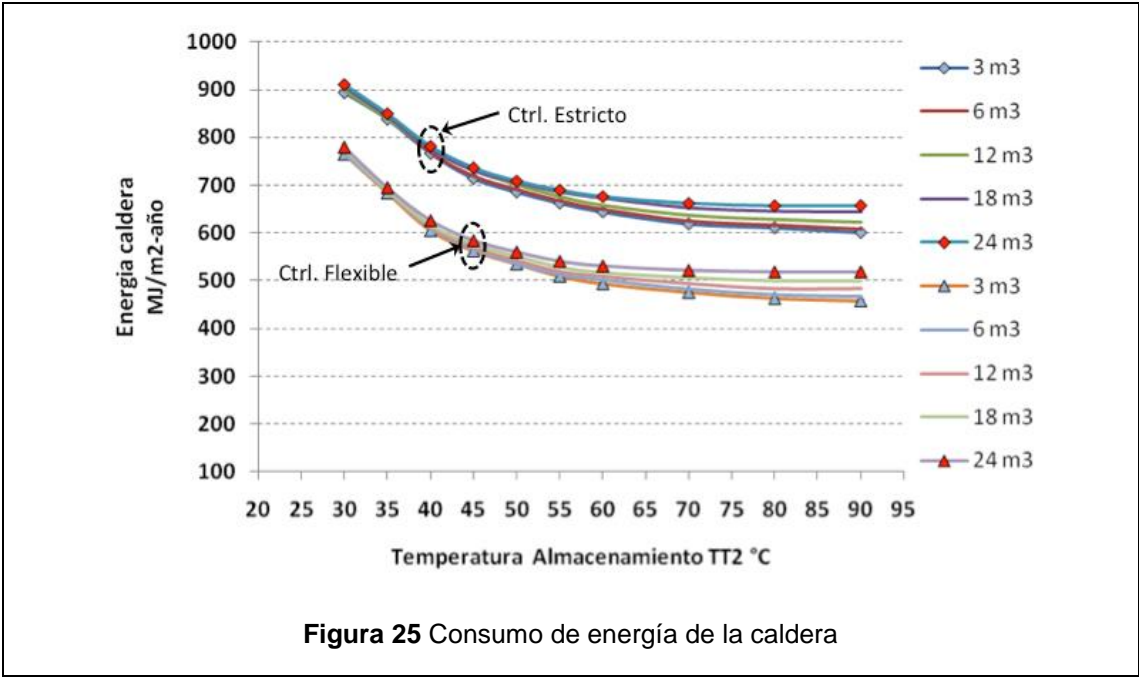
En la Figura 24 se observa el comportamiento de la temperatura interna del invernadero simulado sin ningún tipo de acondicionamiento térmico durante todo un año. Como se puede observar, la temperatura interna sigue a la temperatura ambiente de manera paralela, pero debido a las ganancias

solares los valores de la temperatura en el interior son mas altos, comprobándose el efecto invernadero dentro de la estructura simulada.



### XIII.2 Energía consumida a partir de la combustión de gas LP

En la Figura 25 se muestra el consumo de energía de calefacción hacia el invernadero por unidad de superficie, en donde, en su totalidad es suministrada por la caldera mediante la quema de gas L.P. El mayor consumo de energía se presenta a temperaturas mas bajas, esto es debido a que se requieren flujos de agua mayores para el suministro de energía. A su vez un mayor tiempo de operación de la caldera durante el año. En la Figura 25, también se muestra el consumo con los dos tipos de control utilizados, se puede observar que tratar de mantener la temperatura de manera constante en el valor óptimo de cultivo, consume alrededor de un 20% mas de energía, que si solo se evita que la temperatura salga fuera del rango de temperatura soportado por el cultivo. En la Figura 26 se muestra los costos asociados a la operación de la caldera.

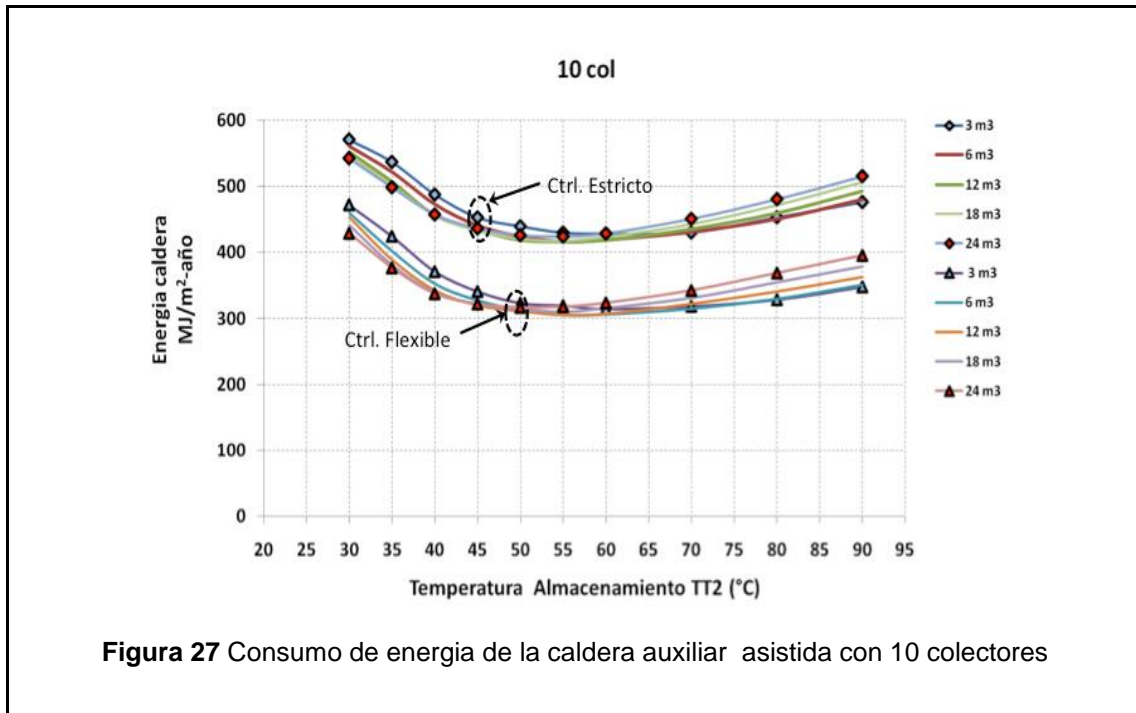


### XIII.3 Climatización con energía utilizando energía solar



### XIII.3.1 Efecto del volumen y temperatura de almacenamiento

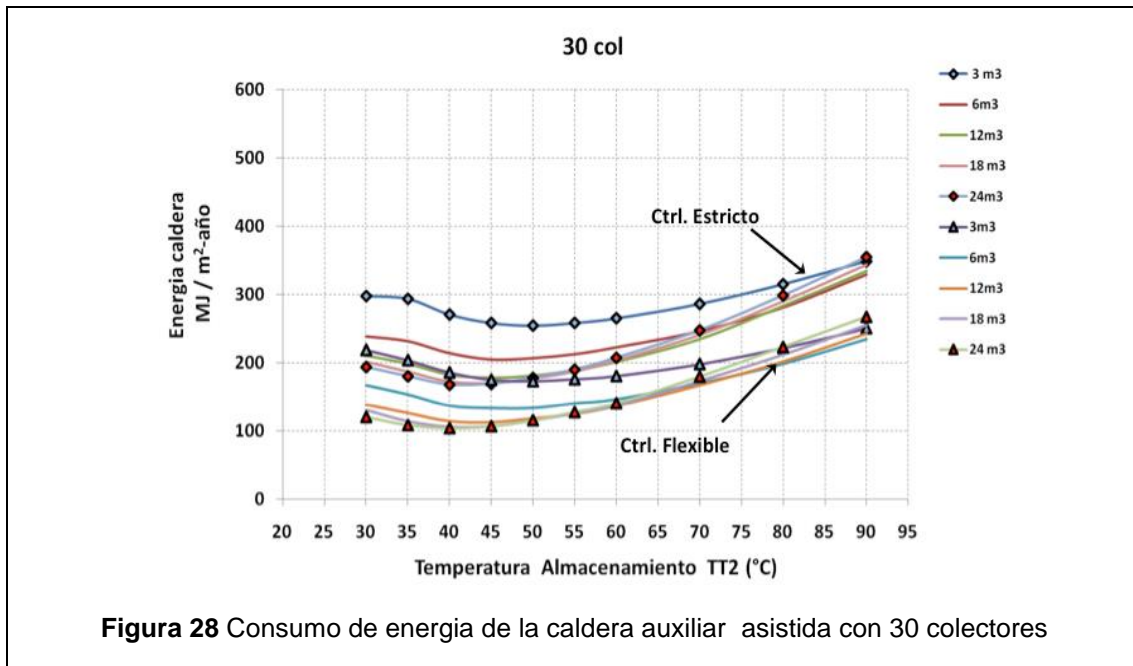
El efecto de analizar los 5 volúmenes de almacenamiento térmico utilizados para la simulación, se puede observar en la Figura 27 y Figura 28. A medida que se incrementa el volumen de almacenamiento la cantidad de energía suministrada por la caldera es menor, hasta temperaturas entre los 40 y los 60 °C. Al incrementar la temperatura de almacenamiento por encima de los 60 °C la energía suministrada por la caldera incrementa conforme se incrementa el volumen de almacenamiento del primer tanque. Esto es debido a la que las temperaturas alcanzadas por los colectores planos es relativamente baja y al exceder este valor la eficiencia de estos se ve afectada y con ello la cantidad de energía solar captada.



La temperatura en el segundo tanque de almacenamiento, tiene un efecto importante en el consumo de energía del sistema. Para el caso de un sistema sin colectores solares, Figura 25, el menor consumo total de energía se encuentra a los 90 °C debido a que los flujos requeridos para suministrar la energía de calefacción son menores. Sin embargo cuando se utilizan colectores solares se requiere disminuir considerablemente la temperatura de almacenamiento en el segundo tanque para no afectar la eficiencia de los



colectores, y aprovechar en lo máximo posible la energía solar incidente sobre estos. Como se puede apreciar en la Figura 27 y Figura 28 el menor consumo se encuentra entre los 40 y 60 °C, temperaturas relativamente bajas, pero, los suficientemente altas para cumplir con el propósito de suministro de calefacción al invernadero.

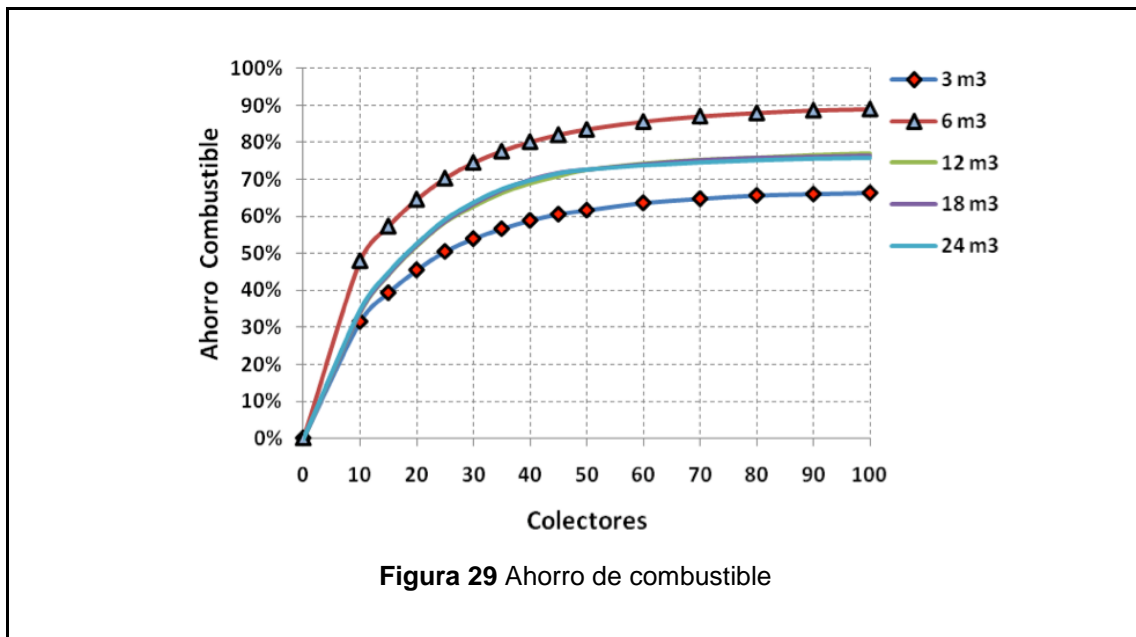


### XIII.3.2 Efecto del número de colectores

Una vez analizado todo lo anterior se procedió a calcular el ahorro en consumo de gas LP al incrementar la cantidad de colectores utilizados en el sistema. Así mismo se comparó el ahorro obtenido al utilizar los 5 diferentes volúmenes de almacenamiento utilizados durante la simulación del sistema. Las corridas de simulación se llevaron a cabo con el esquema de control flexible ya que fue el que mostró un mayor ahorro de energía. También se está usando una temperatura de almacenamiento de 50 °C en el segundo termo-tanque, ya que los menores consumos de energía de la caldera se encontraron en el rango de los 40 a los 60 °C, como se puede apreciar en las Figuras 27 y 28, para las diferentes configuraciones en las que se tenía sistema de captación de energía solar.

En la Figura 29 se puede ver que el mayor ahorro en combustible se obtiene con un volumen de almacenamiento de 6m<sup>3</sup> y con la máxima

cantidad de colectores utilizados. De manera contraria los menores ahorros, se observan con un volumen de almacenamiento del termo-tanque principal de 3m<sup>3</sup>, lo anterior debido a que, la cantidad de energía almacenada no es la suficiente para abastecer las demandas del invernadero. Los volúmenes restantes utilizados en la simulación, es decir, 12, 18 y 24 m<sup>3</sup> no muestran diferencia significativa entre ellos en cuanto a ahorro energético.

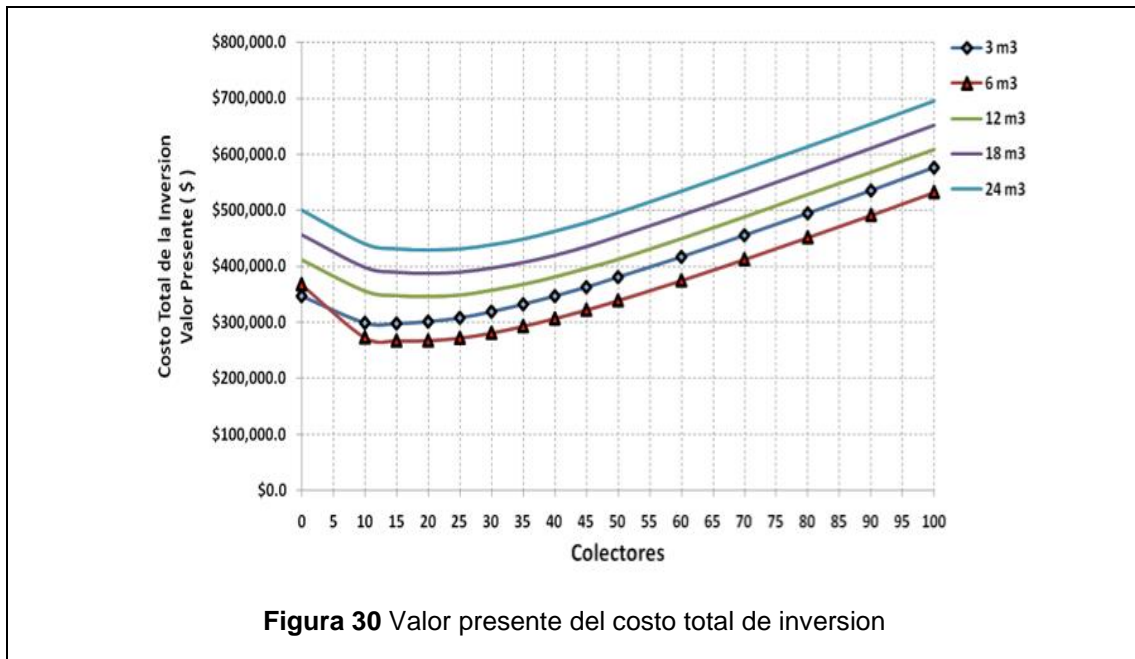


### XIII.3.3 Análisis financiero

Al observar los resultados obtenidos en la sección anterior, se pensaría que lo mas lógico sería instalar un sistema dotado con un volumen de almacenamiento de 6 m<sup>3</sup> y la cantidad de 100 colectores solares para obtener la máxima cantidad de ahorro en combustible. Sin embargo no se esta considerando, el costo inicial de los equipos y si la inversión se recupera al final del periodo de operación del invernadero. Por ello se realizó un análisis financiero en el cual se determinó la configuración que presentaba el menor costo de inversión inicial y el menor costo en consumo de combustible durante el periodo de operación considerado, del invernadero.

En el análisis financiero se consideró que el consumo energético anual calculado permanece constante durante los diez años del periodo de operación. El gasto de inversión inicial incluye el costo de la caldera, los termo-tanques y de los colectores solares únicamente. En la Figura 31 se

puede observar el valor presente de las corridas de simulación llevadas a cabo y se observa que con un sistema dotado de un termo-tanque de 6 m<sup>3</sup> y 15 colectores solares se obtiene el menor costo de inversión con valor de \$272,916.14 MXN. Por el contrario el valor mas alto de inversión se presenta cuando se tienen instalado un termo tanque principal de 24 m<sup>3</sup> y el máximo número de colectores utilizado con un valor de \$532,115.56 MXN.



También se evaluó la cantidad económica ahorrada al comparar el sistema de calefacción que utiliza la que combustión de gas L.P., contra el mismo sistema pero utilizando energía solar.

En la Figura 31 se puede observar que el mayor ahorro es de \$100,000 MNX, al utilizar un tanque de almacenamiento principal de 6m<sup>3</sup> y 15 colectores, esto era de esperarse ya que la configuración mencionada fue la que presentó un menor costo de inversión.

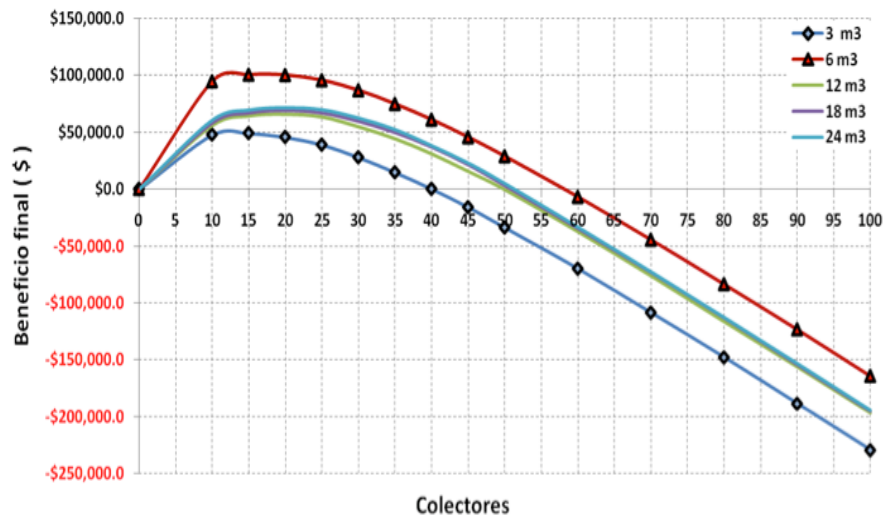


Figura 31 Beneficio final obtenido

## XIV Conclusiones

- Analizar los flujos de energía que se dan entre el invernadero y su entorno es un problema complejo, dada la cantidad de variables climáticas que influyen. Por ello se requiere de la utilización de paquetes de simulación dinámica detallada, que tomen en cuenta su variabilidad en el tiempo, para poder estimar los consumos energéticos requeridos por el invernadero para brindar las condiciones de confort requeridas por el cultivo.
- La simulación del sistema de calefacción en TRNSYS permite evaluar el efecto de las principales variables de diseño sobre los consumos de energía y con ello facilita el análisis financiero que determina la rentabilidad del sistema.
- Un mal dimensionamiento en cuanto a número y tamaño de los dispositivos principales, puede tener como consecuencia la anulación de cualquier posible ahorro en costos de operación del sistema, o inclusive superiores a los generados por usar gas L.P.
- Se recomienda validar el modelo mediante mediciones en campo para ajustar con los datos obtenidos los resultados de la simulación.

## XVReferencias

Baille, A., Kittas, C., Katsoulas, N., 2001. Influence of whitening on greenhouse microclimate and crop energy partitioning. *Agriculture and Forest Meteorology* 107:293–306,

Bailey, B. J. 1981 Reduction of thermal radiation in glass houses by thermal screen. *Journal of Agricultural Engineering Research* . 26:215–22.

Bartazanas, T.; Tchamitchian, M. y Kittas, C. 2005 Influence of heating method on greenhouses microclimate and energy consumption. *Biosystems Engineering* 91:487-499

Castañeda-Miranda R.; Ventura-Ramos, E.; Peniche-Vera, R. y Herrera-Ruiz, G.; 2007.; Análisis y simulación del modelo físico de un invernadero bajo condiciones climáticas de la región central de México. *Agrociencia* 41:317-335.

Chinese, D.; Meneghetti, A. y Nardin, G.; 2005; Waste to energy based greenhouse heating: exploring viability conditions trough optimization models. *Renewable Energy* 30:1573-1586

Cruz Carrillo, José; Jimenez, Felix; Ruiz, Jaime; Días, Gustavo; Sánchez, Prometeo; Perales, Catarino; Arellanes, Anselmo; 2003; Evaluación de densidades de siembra en tomate en invernadero; *Agronomía Mesoamericana* 14:85-88

Davies, P. A.; 2005; A solar cooling system for greenhouse food production in hot climates. *Solar Energy* 79:661-668

Díaz, L. 2008 Inversiones millonarias inútiles en invernaderos. *El diario de Chihuahua*. Domingo 7 septiembre 2008.

Ganguly, A. y Gosh, S.; 2009; Model development and experimental validation of a floriculture greenhouse under natural ventilation. *Energy and buildings* 41:521-527

García J. L.; De la Plaza S.; Navas L. M.; Benavente R. M. y Luna L.; 1998; Evaluation of the feasibility energy sources for greenhouses heating. Journal of Agriculture Engineering Research 69:107-114.

Ghosal, M. K.; Tiwari, G. N. y Srivastava N.S.L.; 2004; Thermal modeling of a greenhouse with an integrated earth to air exchanger: an experimental validation. Energy and buildings 36:219-227

Guantes Ruiz, J.; 2006; El mercado de los invernaderos en México; notas sectoriales; instituto español de comercio exterior

Hernández, V.; 2008; Operan en México seis mil hectáreas de invernadero. El siglo de Torreón. Miércoles 6 de Febrero

Huacuz Jorge M.; 2005; The road to green power in Mexico-reflections on the prospects for the large scale and sustainable implementation of renewable energy. Energy Policy 33:2087-2099

Kittas, C.; Karamanis, M.y Katsoulas, N.; 2005. Air temperature regime in a forced ventilated greenhouse with rose crop. Energy and Buildings 37:807–812.

Kumar, K. S.; Tiwari, K. N. y Jha, Madan K.; 2009; Design and technology for greenhouse cooling in tropical and subtropical regions: A review; Energy and Buildings 41:1269-1275

Latimer, J. C. 2001 Dealing with the high cost of energy for greenhouse operations. Horticulture, publ.430-101:1-8

Meijaard I. D.; 1989; The economic evaluation of energy reduction and substitution techniques. Acta Horticulturae. 245:520-529

Moran-Medina, F. 2004 Producción de plantas ornamentales en maceta en invernadero. Memorias del IV Simposio Nacional de Horticultura. Invernaderos: Diseño, Manejo y Producción Torreón, Coah, México, Octubre 13, 14 y 15 del 2004

Pieters, J. G. y Deltour J. M. 1999 Modeling solar energy input in greenhouses. Solar energy 67:119-130



Santamouris, M.; Mihalakakou,G.; Balaras, C.A.; Argiriou, A.; Asimakopoulos, D. y Vallindras, M. 1995. Use of buried pipes for energy conservation in cooling of agricultural greenhouses. *Solar energy* 55:111-124

SAGARPA; 2009; Plan nacional de agricultura protegida 2009

Sethi, V.P. 2009. On the selection of shape and orientation of a greenhouse: Thermal modeling and experimental validation. *Solar Energy* 83:21–38.

Sethi, V.P. y Sharma, S.K.; 2007; Survey of cooling technologies for worldwide agricultural greenhouse applications. *Solar Energy* 81:1447-1459

Silva A. M.; Miguel, A.F.; Rosa, R.; 1991; Thermal radiation inside a single span greenhouse with a thermal screen. *Journal of agricultural engineering research*. 49:285-298

Soni P.; Salokhe V.M.; Tantau H.J.; 2005; Effect of screen mesh size on vertical temperature distribution in naturally ventilated tropical greenhouses. *Biosystems Engineering* 92:469–482

Teitel, M.; Barak, M. y Antler, A.; 2009 Effect of cyclic heating and thermal screen on nocturnal heat loss and microclimate of a greenhouse. *Biosystems Engineering* 102:162-170

Teitel, M.; Tanny, J.; 1999; Natural ventilation of greenhouses: experiments and model. *Agricultural and forest meteorology* 96:59-70

Walker, J.N.; Duncan, G.A.; 1974; Effectiveness of recommended greenhouse air circulation system. *Translations of the ASAE* 17:371–376.