



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

*MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN INVERNADERO AUTOMATIZADO PARA CHILE*

*JALAPEÑO POR MEDIO DE LABVIEW.*

TESIS QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECATRÓNICO**

PRESENTA

**ALFONSO ARRIAGA VIGIL.**

TUTOR

M. en I. JESUS VICENTE GONZALEZ SOSA.

México, D.F. Mayo 2013



MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN INVERNADERO  
PARA CHILE JALAPEÑO POR MEDIO DE LABVIEW.

1 de mayo de 2013



# Índice general

<b>1. Introducción.</b>	<b>9</b>
1.1. Identificación y planteamiento del problema. . . . .	9
1.1.1. Caso de estudio, municipio de Concepción Pápalo, Oaxaca. . . . .	9
1.1.2. Cultivo de chile jalapeño . . . . .	11
1.1.3. Uso de invernaderos en México. . . . .	12
1.2. Objetivos . . . . .	14
1.3. Descripción de la tesis. . . . .	15
<b>2. Antecedentes.</b>	<b>17</b>
2.1. Objetivos. . . . .	17
2.2. Descripción del sistema . . . . .	17
2.2.1. El invernadero como un sistema térmico. . . . .	17
2.2.2. Principales procesos térmicos en el invernadero. . . . .	19
2.2.3. Descripción general del desarrollo del cultivo. . . . .	21
2.3. Cultivo en invernaderos. . . . .	22
2.3.1. Evolución en el uso de invernaderos. . . . .	23
2.3.2. Modelado de los invernaderos. . . . .	24
Modelo matemático presentado por Udink, 1983. . . . .	25
El modelo de Tchamitchain, 1992. . . . .	27
El modelo de Tap, 2000. . . . .	28
Modelo de Tap mejorado por Iga. . . . .	30
Modelo matemático de cultivos en invernaderos. . . . .	30
2.3.3. Descripción de Labview. . . . .	31

<b>3. Modelo y Simulación con LabVIEW.</b>	<b>33</b>
3.1. Objetivos . . . . .	33
3.2. Modelo del invernadero vacío. . . . .	33
3.3. Modelo del chile jalapeño. . . . .	35
3.4. Simulaciones. . . . .	37
3.4.1. Efecto de las entradas sobre las variables de estado. . . . .	38
3.5. Resultados. . . . .	40
3.5.1. Efecto de las entradas sobre las variables de estado. . . . .	40
Temperatura exterior $T_o$ . . . . .	40
Radiación solar, $G$ . . . . .	42
Concentración de $CO_2$ , $C_o$ . . . . .	46
Humedad relativa. . . . .	49
Velocidad del viento, $w$ . . . . .	52
Aperturas de las ventanas. . . . .	54
3.6. Simulaciones del cultivo. . . . .	57
3.7. Análisis de los resultados obtenidos. . . . .	58
<b>4. Conclusiones y trabajos a futuro.</b>	<b>59</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>61</b>

# Índice de figuras

1.1. Coapam de Guerrero, Oaxaca. . . . .	9
1.2. Invernadero en el Estado de Oaxaca. . . . .	10
1.3. Línea del tiempo del desarrollo del uso de invernaderos (Tap, 2000; Tchamitchian, 1992; Cárdenas, 2010). . . . .	14
2.1. Descripción del sistema . . . . .	18
2.2. Intercambios de energía radiante. . . . .	19
2.3. Intercambios térmicos del invernadero vacío. . . . .	21
2.4. Parámetros de un invernadero tipo Vento. . . . .	25
2.5. Diagrama de bloques del invernadero. . . . .	26
3.1. Diagrama de bloques del invernadero vacío . . . . .	35
3.2. Código de LabVIEW para el invernadero vacío. . . . .	38
3.3. Ecuaciones diferenciales del invernadero vacío. . . . .	39
3.4. Respuesta de referencia del invernadero, Tg. . . . .	41
3.5. Respuesta de referencia del invernadero, Ts. . . . .	41
3.6. Respuesta de referencia del invernadero, Ci. . . . .	42
3.7. Respuesta de referencia del invernadero, Vi. . . . .	42
3.8. Efecto de la temperatura exterior sobre Tg. . . . .	43
3.9. Efecto de la temperatura exterior sobre Ts. . . . .	43
3.10. Efecto de la temperatura exterior sobre Ci. . . . .	44
3.13. Efecto de la radiación solar sobre Ts. . . . .	44
3.11. Efecto de la temperatura exterior sobre Vi. . . . .	45
3.14. Efecto de la radiación solar sobre Ci. . . . .	45

3.12. Efecto de la radiación solar sobre Tg. . . . .	46
3.15. Efecto de la radiación solar sobre Vi. . . . .	47
3.17. Efecto de la concentración de CO <sub>2</sub> sobre Ts. . . . .	47
3.16. Efecto de la concentración de CO <sub>2</sub> sobre Tg. . . . .	48
3.18. Efecto de la concentración de CO <sub>2</sub> sobre Ci. . . . .	48
3.19. Efecto de la concentración de CO <sub>2</sub> sobre Vi. . . . .	49
3.20. Efecto de la humedad relativa sobre Tg. . . . .	50
3.21. Efecto de la humedad relativa sobre Ts. . . . .	50
3.22. Efecto de la humedad relativa sobre Ci. . . . .	51
3.23. Efecto de la humedad relativa sobre Vi. . . . .	51
3.24. Efecto de la velocidad del viento sobre Tg. . . . .	52
3.25. Efecto de la velocidad del viento sobre Ts. . . . .	53
3.26. Efecto de la velocidad del viento sobre Ci. . . . .	53
3.27. Efecto de la velocidad del viento sobre Vi. . . . .	54
3.28. Efecto de la apertura de las ventanas sobre Tg. . . . .	55
3.29. Efecto de la apertura de las ventanas sobre Ts. . . . .	55
3.30. Efecto de la apertura de las ventanas sobre Ci. . . . .	56
3.31. Efecto de la apertura de las ventanas sobre Vi. . . . .	56
3.32. Temperatura del aire del invernadero con cultivo. . . . .	57



# Nomenclatura

- $\alpha$  Coeficiente de transferencia de calor del sistema de calefacción. ( $\text{W}/^{\circ}\text{Cm}^2$ )
- $\eta$  Factor de conversión de la radiación
- $\lambda_e$  Energía radiante que entra al invernadero. ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
- $\vartheta_g$  Temperatura interior del invernadero, en el modelo de Udink ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- $\vartheta_h$  Temperatura del agua de calefacción en el modelo de Udink ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- $\varphi_s$  Radiación de onda corta en el modelo de Udink ( $\text{W}$ ).
- $\Phi_v$  Flujo de ventilación. ( $\text{m}/\text{s}$ )
- $\gamma_o$  Densidad del aire seco. ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )
- $\lambda_s$  Energía radiante que sale de invernadero. ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
- $C_g$  Capacidad calorífica del aire en el invernadero. ( $\text{J}/^{\circ}\text{Cm}^2$ )
- $C_i$  Concentración de  $\text{CO}_2$ . ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )
- $C_p$  Calor específico del agua. ( $\text{J}/^{\circ}\text{CKg}$ )
- $C_e$  Calor total de la masa de aire que entra al invernadero. ( $\text{J}/\text{kg}$ )
- $C_s$  Calor total de la masa de aire que sale del invernadero. ( $\text{J}/\text{kg}$ )
- $G$  Radiación de onda corta ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
- $H$  Calor proporcionado por las tuberías de calefacción. ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
- $h$  Altura del invernadero. ( $\text{m}$ )

- K Coeficiente de intercambio térmico entre el invernadero y el exterior. ( $W/^{\circ}Cm^2$ )
- $k_d$  Coeficiente de transferencia de calor del suelo profundo. ( $W/^{\circ}Cm^2$ )
- $K_r$  Coeficiente de transferencia de calor de la cubierta. ( $W/^{\circ}Cm^2$ )
- $k_s$  Coeficiente de transferencia de calor del suelo. ( $W/^{\circ}Cm^2$ )
- $k_v$  Coeficiente de ventilación. ( $W/^{\circ}Cm^2$ )
- Q masa de aire seco que se intercambia entre el invernadero y el exterior. (Kg/s)
- QG Energía radiante del invernadero. (W)
- $Q_w$  Energía debido al flujo de aire. (W)
- $r_m$  Posición de la válvula del mezclador, modelo de Udink, %.
- $r_w$  Posición de la válvula de la ventana, modelo de Udink, %.
- S Superficie cubierta ( $m^2$ )
- $S_v$  Razón de ventilación en el modelo de Udink ( $h^{-1}$ ).
- $S_p$  superficie de las paredes. ( $m^2$ )
- $T_d$  Temperatura del suelo profundo. ( $^{\circ}C$ )
- $T_g$  Temperatura del aire dentro del invernadero ( $^{\circ}C$ )
- $T_o$  Temperatura del exterior ( $^{\circ}C$ )
- $T_s$  Temperatura del suelo ( $^{\circ}C$ )

# Capítulo 1

## Introducción.

### 1.1. Identificación y planteamiento del problema.

#### 1.1.1. Caso de estudio, municipio de Concepción Pápalo, Oaxaca.

El problema expuesto en esta sección surgió en la localidad de Coapam de Guerrero en el municipio de Concepción Pápalo perteneciente al estado de Oaxaca. Esta zona cuenta con 350 habitantes (<http://www.oaxaca.gob.mx/>), la actividad primaria es la agricultura. En este municipio se sembró un total de 1408 (ha) en el 2010, de los cuales 1254 (ha) fueron de maíz grano, 35 (ha) fueron de frijol y el resto de otros cultivos nacionales; en ese año el total de hectáreas cosechadas fueron 1219 (ha) (<http://www.inegi.org.mx/>). En la localidad de Coapam de Guerrero los habitantes cosecharon granadilla china como actividad económica primaria (<http://www.oaxaca.gob.mx/>), este producto fue destinado a la venta, mientras que el maíz y frijol se utilizaron para el consumo local Parada (2010).



Figura 1.1: Coapam de Guerrero, Oaxaca.

En la figura 1.1 se aprecia la localidad de Coapam de Guerrero, el clima de esta región limita la

variedad de cultivos, la ubicación geográfica del poblado en medio de la sierra, dificulta el comercio. El maíz y el frijol son los productos base de la alimentación de los habitantes de esta localidad, en los terrenos de la sierra crecen de manera silvestre diversos frutos como durazno, chirimoya, café, etc., sin embargo estos no son comercializados. Como propuesta de solución al problema de poca variedad en los alimentos de esta localidad, en el año del 2008 se construyó un invernadero donde se cultivó jitomate, figura 1.2. La introducción del invernadero a esta comunidad no arrojó resultados satisfactorios, debido principalmente a la falta de conocimiento técnico, mala organización y costos de operación altos; después de un año desde su construcción el invernadero dejó de usarse (Parada, 2010). Originalmente la idea parecía ser la solución al problema de alimentos que tiene esta zona, sin embargo las dificultades antes mencionadas ocasionaron que el beneficio para esta comunidad no resultara sustentable.

En países desarrollados como Holanda, se utilizan invernaderos para cultivar bajo condiciones extremas. Lo que han hecho estos países es que todos los procesos involucrados en la producción de jitomate se traducen a términos económicos, desde la inversión inicial, el costo de mantenimiento, la energía para que funcionen los subsistemas necesarios, hasta la inversión en mano de obra de los campesinos; se genera así una función de costo y con ésta se desarrollan sistemas de control automáticos de modo que exista una buena relación costo-beneficio. Para el desarrollo de los sistemas de control se requiere un modelo matemático que describa el comportamiento dinámico de la planta.



Figura 1.2: Invernadero en el Estado de Oaxaca.

### 1.1.2. Cultivo de chile jalapeño

En México, una de las actividades económicas primarias es la agricultura. El chile es el segundo producto hortícola de mayor importancia económica, debido a la siembra y consumo anuales. Sin embargo, la producción de chile en México, se sigue haciendo en su mayoría mediante trabajo manual y basado en las experiencias de los productores, además la explotación de este producto no es la óptima debido a factores como: las variaciones atmosféricas, la falta de información de producción, falta de asistencia técnica, bajo nivel tecnológico, altos costos de producción, pérdidas pos-cosechas, entre otros (Reveles et al., 2010).

En el caso específico del chile jalapeño una solución en la que se ha invertido en los últimos años y que se ha aplicado en el sureste del país es la manipulación genética; con lo que se ha logrado tener subespecies que pueden resistir los cambios del clima, tener mayor rendimiento promedio (hasta 43 ton/ha) y menores costos de producción (\$ 2,000 por kilogramo de semilla para una siembra de dos hectáreas, mientras que para un híbrido comercial el costo de semilla por hectárea es de 20,000) (INIFAP, 2011). Sin embargo, generar una especie de chile jalapeño genéticamente modificada para cada región del país, resulta una solución muy cara y a largo plazo.

El tipo jalapeño es el más sembrado en nuestro país; de 158,446 hectáreas de chiles sembradas 34, 831 hectáreas fueron de éste, siendo además la más popular en América del Norte; el nombre es proveniente de la ciudad de Xalapa en Veracruz. Se conocen distintas variedades entre las que se encuentran el típico, el candelaria o peludo, el espinalteco o pinalteco y el morita, todos ellos son productos carnosos y picantes que se cosechan en estado inmaduro, caracterizado por un color verde brillante, para encurtir y consumo fresco; mientras que la cosecha en el estado maduro, es decir los frutos de color rojo, se destinan a la producción de chile chipotle, el cual se obtiene con un proceso de secado y ahumado. Entre los diferentes usos que se le dan a esta variedad sólo el 60 % de la producción se consume fresco, el 20 % se destina a la industria de encurtidos mientras que el 20 % restante se destina a la producción de chile chipotle (Nuez et al., 1995). Queda claro que este producto juega un papel importante en la actividad agrícola de nuestro país y es un elemento del desarrollo económico rural.

El procedimiento de cultivo del chile en México se realiza bajo condiciones de cielo abierto por medio de los sistemas de roza-tumba-quema con un rendimiento de 8 (ton/ha) y suelos mecanizados con un rendimiento de 12 (ton/ha) tal como se muestra en el folleto técnico de García y Nava (2009). El uso de invernaderos para el cultivo de chile se limita a cultivar la plántula para después realizar el

trasplante en el terreno preparado.

Para el desarrollo del chile jalapeño se requiere de una temperatura durante el día de 18 a 26 (°C) y durante la noche de 15 a 18 (°C), este cultivo es susceptible a pudriciones de raíces debido al exceso de humedad en el suelo, se tiene el conocimiento acerca de una precipitación distribuida en forma regular de 600 a 900 (mm). Las fertilizaciones para el chile jalapeño se llevan a cabo con la dosis 92-184-00, resultante de la mezcla de 200 (Kg) de Urea y 400 (Kg) de superfosfato triple de calcio, y otros compuestos como el nitrógeno y fósforo; dicha fertilización se lleva a cabo en dos etapas, la primera entre los 20 y 30 días después de la emergencia, 20 días después se realiza la segunda. Cabe recalcar que estas cantidades de fertilizantes son los que reportan García y Nava (2009), son datos utilizados en cultivos realizados en Quintana Roo donde las condiciones ambientales son adecuadas para el desarrollo del chile jalapeño, la cantidad de fertilizante variará dependiendo de la región.

El chile es afectado por distintas plagas, por ejemplo la pulga saltona, la mosca blanca, barrenillo del chile, pulgón verde, diabrotica, araña roja, ácaro blanco, minador de hoja. Además existen enfermedades como lo son el ahogamiento o secadera, mancha bacteriana, mancha de hoja, marchites, virosis, etc. Cada una de estas plagas y enfermedades es contra atacada con distintos compuestos y plaguicidas en distintas dosis tal como lo mencionan García y Nava (2009).

### **1.1.3. Uso de invernaderos en México.**

Los invernaderos son estructuras que permiten crear un micro ambiente en el que el cultivo se desarrolle en condiciones óptimas. Aunque en realidad los invernaderos se han utilizado desde hace mucho tiempo; la operación de estos con un mínimo de energía y control de las variables físicas que intervienen en el micro ambiente, demandan aplicar técnicas de control automático para lo que es necesario un modelo matemático de estos sistemas. Con estos invernaderos controlados y automatizados, se pueden mantener las condiciones de clima óptimas para el chile jalapeño. Además se pueden instalar de manera rápida en los terrenos de cultivo brindando una solución a corto plazo que mejoraría el rendimiento promedio por hectárea del chile jalapeño.

Uno de los países que contribuyó de manera muy importante en el desarrollo de sistemas de control para los invernaderos fue Holanda. Las condiciones climáticas de esta región, que se caracterizan por ser inestables, fue la principal razón que despertó el interés de estudiar estos sistemas. Fue así como en varias universidades de esta zona se realizaron trabajos que son la base de los sistemas de control de invernaderos actuales (van Henten, 1994; Bot, 1983; Tap, 2000).

Las condiciones climáticas de nuestro país no son extremas en comparación con Holanda, es por eso que en el uso de invernaderos hasta hoy en día no se ha invertido en la implementación de sistemas de control y automatización, incluso en algunos estudios han llegado a mencionar que estos sistemas son relativamente nuevos en México, por lo que el diseño de las estructuras y el equipamiento utilizado no es el más adecuado y trayendo como consecuencia que sean caros y que no estén al alcance de los productores mexicanos (Cárdenas, 2010). En años atrás, cuando podríamos decir que los sistemas de control de invernaderos estaban de moda, la implementación de dichos sistemas hubieran resultado acciones contradictorias, sobre todo por la relación costo-beneficio de la inversión. Sin embargo, actualmente se han reducido los costos de las computadoras y de los sistemas que se emplean en los sistemas de control de invernaderos. También se han reforzado las técnicas y la teoría de control moderno y actualmente se busca no sólo controlar las condiciones de clima dentro de los invernaderos, sino que además este control sea de forma óptima con el fin de reducir costos de operación, una operación más eficiente o el uso de menos fertilizantes en los cultivos entre otros objetivos (Tap, 2000).

Sí bien hasta ahora sólo se emplean invernaderos automatizados en los países desarrollados, estos pueden ser una solución a necesidades de nuestro país, ya que se podría mejorar el rendimiento promedio de la producción de los cultivos y se mejorarían las características propias de estos, se obtendría conocimiento técnico que no sea basado sólo en la experiencia de los productores, se haría frente a las altas demandas de cultivos y a un mercado globalizado que exige soluciones de vanguardia para mantenerse dentro, sin olvidar una mundial y creciente crisis alimentaria.

El desarrollo de la implementación de invernaderos en México se encuentra en una etapa de crecimiento, con lo se tiene una área de oportunidad para la innovación y el desarrollo de sistemas más eficaces y con un nivel tecnológico agregado.

Como se muestra en la figura 1.3 existe un gran atraso en la técnica del uso de invernaderos entre Holanda y México, por ejemplo mientras que en el primero ya se empezaban los estudios para la implementación de control óptimo, en nuestro país recién se creaba el llamado programa de “Agricultura Bajo Ambiente Controlado”, en el que se comenzó a impulsar el uso de invernaderos, pero con bajo nivel tecnológico.

En la actualidad los invernaderos más equipados en México cuentan con sistemas automatización del tipo “encendido o apagado”, que se implementan en dispositivos como PLC's. Estos sistemas cuentan con algunas desventajas; por ejemplo debido a que los sistemas se accionan en un punto previamente configurado se presentan arranques inesperados o paros fuera de rango, debido a pequeñas variaciones

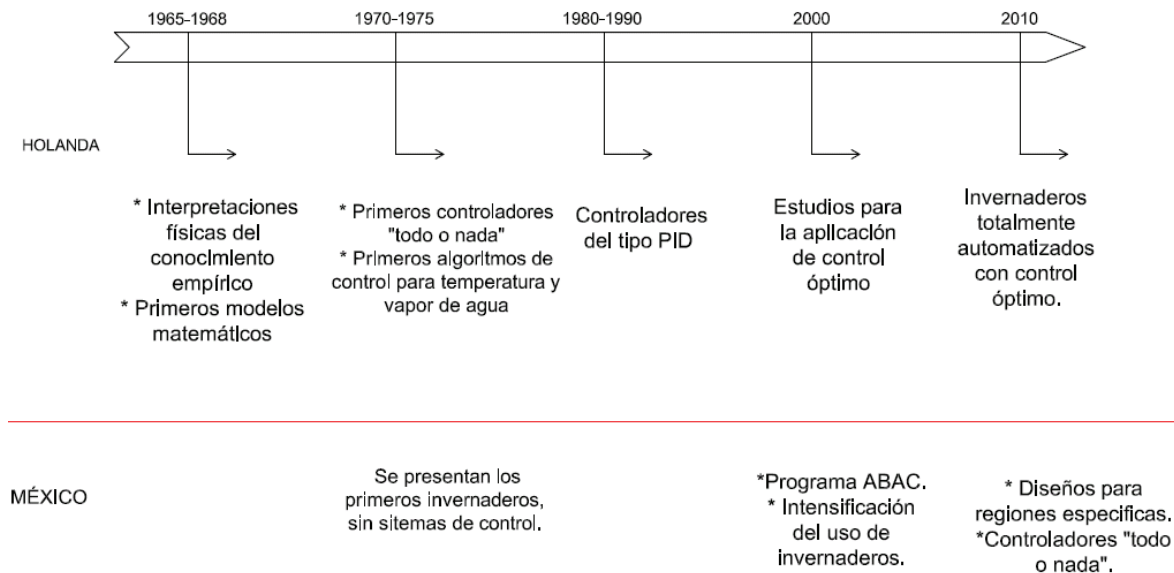


Figura 1.3: Línea del tiempo del desarrollo del uso de invernaderos (Tap, 2000; Tchamitchian, 1992; Cárdenas, 2010).

de las variables medidas. Además se basan en conocimiento empírico acerca del desarrollo del cultivo, por ejemplo la temperatura en el interior del invernadero; pero no se considera la dinámica propia del cultivo.

## 1.2. Objetivos

El presente trabajo tiene los siguientes objetivos generales:

1. Revisar y documentar los modelos de invernaderos disponibles en la literatura.
2. Obtener un modelo matemático del crecimiento del chile jalapeño. Debido a que el modelado de hortalizas demanda de amplios conocimientos teóricos en este trabajo se plantea obtener una primera propuesta generada por el autor con sus capacidades teóricas.
3. Realizar la simulación del modelo obtenido que nos permita hacer un análisis del sistema para determinar la relación entre las condiciones ambientales el exterior, la presencia del cultivo, los sistemas de climatización y el clima dentro del invernadero.



### 1.3. Descripción de la tesis.

El presente trabajo se divide en cuatro capítulos. En el primer capítulo se plantea el problema con el que surge la necesidad del desarrollo de un modelo matemático de invernaderos, se expone el caso de un poblado de Oaxaca que tras adquirir un invernadero se enfrentó a distintas deficiencias técnicas que ocasionaron el fracaso del cultivo protegido. Se describe la producción de chile jalapeño en México así como los distintos tipos de usos de éste. Se describe el uso de invernaderos en México. Por último se realiza el planteamiento de los objetivos y alcances de este trabajo.

En el capítulo dos se muestra una investigación y documentación de las diferentes líneas de desarrollo del control de los invernaderos y los modelos resultantes. La teoría que se emplea en el control óptimo de los invernaderos en países como Holanda es resultado de años de investigación y desarrollo tanto de los modelos matemáticos como de los dispositivos y técnicas de control. Se analizan los principales procesos físicos que se ven involucrados en la dinámica del invernadero, con el fin de tener un entendimiento de las ecuaciones utilizadas en el análisis y simulaciones presentadas en el capítulo 3.

En el capítulo 3 se muestran las ecuaciones seleccionadas y su evolución. Desde los primeros trabajos mostrados por Tchamitchian (1992) hasta modelos utilizados en universidades nacionales de norte del país como es el caso de los trabajos realizados por Iga (2006). Cada uno de estos trabajos han sido modificaciones de los modelos ya existentes llegando así a distintos modelos con características adecuadas a la aplicación en la que vaya a ser empleado; por lo que se muestra una adecuación de este mismo modelo en la que obtiene un modelo para un invernadero vacío y posteriormente se genera un modelo para el cultivo. Posteriormente se muestran los resultados y el análisis de estos.

En el capítulo 4 se presentan las conclusiones y los trabajos a futuro.



# Capítulo 2

## Antecedentes.

### 2.1. Objetivos.

Con este capítulo se busca:

- Establecer los conceptos básicos para el análisis del invernadero.
- Realizar un análisis del estado del arte del modelo de los invernaderos.
- Describir las herramientas que se utilizaron.

### 2.2. Descripción del sistema

#### 2.2.1. El invernadero como un sistema térmico.

En el análisis y desarrollo del modelo matemático de los invernaderos, se emplean conceptos de la termodinámica, tales como balances de masa, balances de energía y análisis de la humedad. Para comenzar con el estudio de este sistema se definen la frontera, el entorno y las propiedades, figura 2.1, así como se analizan los principales procesos que intervienen en su dinámica.

- Frontera: La diferencia entre las condiciones ambientales y las del invernadero son causadas por la cubierta, es por esto que se considera a ésta como la frontera del sistema. Dada la naturaleza de esta frontera nuestro sistema es abierto puesto que hay intercambios de materia y de energía los cuales se describen más adelante.

- Entorno: Las condiciones ambientales como la temperatura, la humedad, la radiación solar, la velocidad del viento, etc., tienen un fuerte impacto sobre las condiciones internas del invernadero, pues éstas determinan el clima interno. Las condiciones ambientales son consideradas como perturbaciones, ya que no se puede tener ningún tipo de control sobre éstas pero se puede tener cierto conocimiento de su impacto para considerarlas en el modelo.
- Sistema: El conjunto invernadero-cultivo conforma nuestro sistema, las propiedades más importantes de éste son la temperatura, la concentración de CO<sub>2</sub> y la humedad absoluta. El comportamiento dinámico varía si se considera al invernadero vacío o si se considera con el cultivo, pues éste afecta de manera significativa a las condiciones del invernadero.

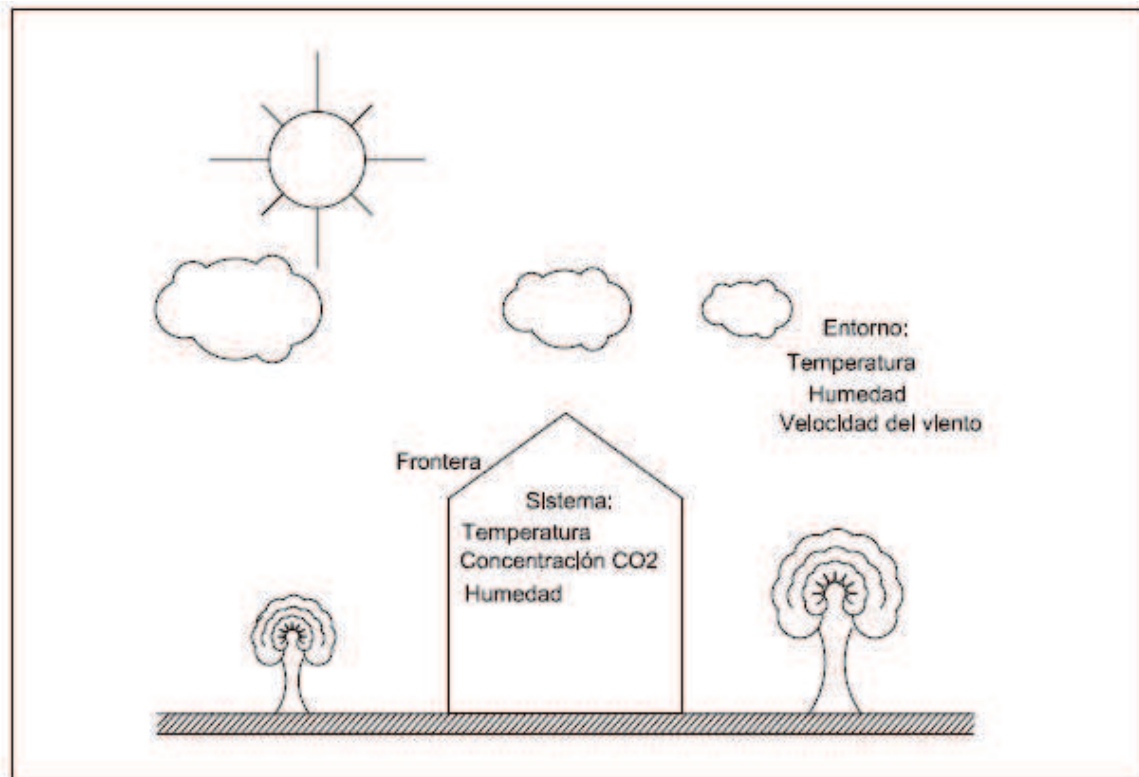


Figura 2.1: Descripción del sistema

### 2.2.2. Principales procesos térmicos en el invernadero.

La dinámica del sistema está relacionada con el almacenamiento de energía que se determina principalmente por la radiación, la ventilación, la concentración de CO<sub>2</sub> y la humedad.

- Intercambios térmicos: Existen intercambios de energía térmica entre el invernadero, el medio ambiente, el cultivo y el suelo. En la figura 2.2 se observa como de la radiación solar penetra a través de la cubierta, en relación con la temperatura interior del invernadero las radiaciones más importantes son la infrarrojas de onda corta, que van desde los 760 hasta 1000 mμ, esta energía radiante es absorbida por el cultivo, el suelo y otros materiales dentro del invernadero, éstos sufren un aumento de temperatura y al mismo tiempo emiten energía radiante con una longitud de onda mayor la cual es absorbida por la cubierta y emite nuevamente radiación hacia el invernadero y hacia el exterior; lo anterior se conoce como efecto invernadero. . El intercambio

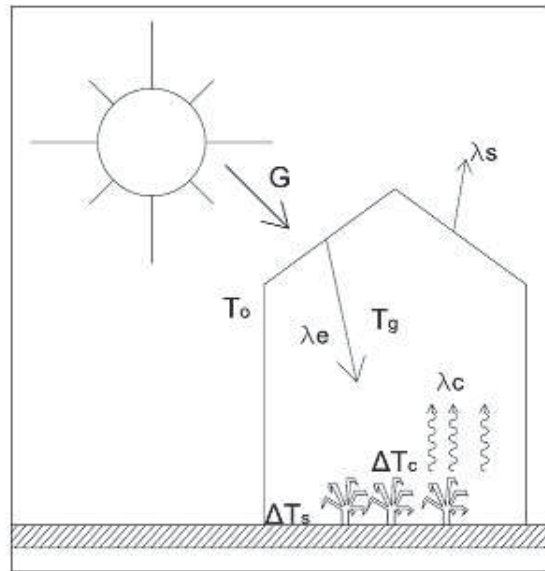


Figura 2.2: Intercambios de energía radiante.

térmico debido a la radiación solar se expresa en la ecuación 2.2.1, donde  $QG$  es la energía radiante del invernadero,  $\lambda_e$ , es la energía radiante entrante,  $\lambda_s$  es la energía radiante que sale del invernadero y  $S$  es la superficie cubierta.

$$QG = S(\lambda_e - \lambda_s) \quad (2.2.1)$$

La temperatura dentro del invernadero varía según la temperatura en el exterior, de forma

general el intercambio de energía térmica debido a ésta diferencia de temperaturas está dado por la ecuación 2.2.2 donde  $QT$  es el intercambio de energía térmica debido a la diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior del invernadero  $K$  es el coeficiente de intercambio térmico entre el invernadero y el exterior y  $Sp$  es la superficie de las paredes.

$$QT = K \cdot Sp \cdot (To - Tg) \quad (2.2.2)$$

Por otro lado existen intercambios de aire, ya sea debido a la ventilación o la calidad de la construcción, de manera general el intercambio de energía debido a estos flujos se puede representar por la ecuación 2.2.3, donde  $Qw$  representa la energía debida al flujo de aire,  $Q$  es la masa de aire seco que se intercambia entre el invernadero y el exterior,  $Ce$  y  $Cs$  es el calor total de las masas de aire que entran y salen del invernadero. Los intercambios de energía descritos en las ecuaciones antes mencionadas se pueden apreciar en la figura 2.3

$$Qw = Q(Ce - Ci) \quad (2.2.3)$$

- Humedad relativa en el invernadero: La humedad depende de la temperatura del aire, en un sistema en el que el vapor de agua y la presión se mantienen constantes, se observa que al aumentar la temperatura se tiene una disminución de la humedad relativa y viceversa, por otro lado al mantener constante la temperatura y variar la humedad específica se tiene un aumento de la humedad relativa. Dentro del balance de humedad se toman en cuenta los fenómenos que contribuyen al aumento de vapor de agua en el ambiente, por ejemplo la transpiración del cultivo, la irrigación, la nebulización, etc., además de los mecanismos que tienden a disminuir la humedad relativa entre los que se encuentran, la condensación, la ventilación y deshumificación. La humedad específica está fuertemente relacionada con el desarrollo del cultivo de una forma bidireccional, es decir que la concentración de vapor en el aire afecta al cultivo y la propia dinámica de éste causa variaciones a la humedad del invernadero.
- Concentración de  $CO_2$ : La fotosíntesis es la base del desarrollo de las plantas, el  $CO_2$  es el elemento fundamental para este proceso. La dinámica de los invernaderos marca una diferencia en la concentración de dicha sustancia entre el exterior y el interior del recinto determinada por distintos factores, por ejemplo la cantidad de energía solar y la temperatura exterior mostrando

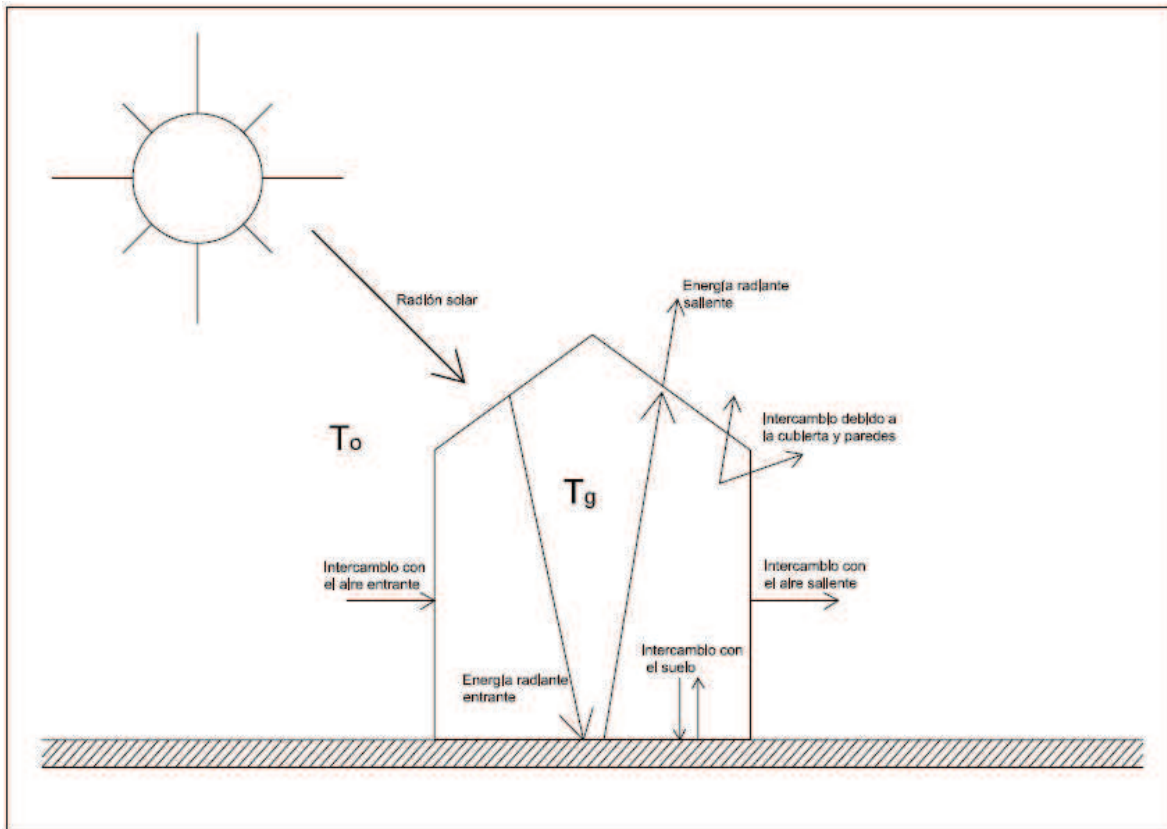


Figura 2.3: Intercambios térmicos del invernadero vacío.

comportamientos diferente durante el día y las estaciones del año. Un punto muy importante a considerar es que dentro de un invernadero los procesos fisiológicos adquieren ritmos más intensos de desarrollo, por lo que constantemente la concentración de  $CO_2$  no es suficiente, y por tal razón en algunos invernaderos se han incluido sistemas que aportan un flujo de  $CO_2$  extra.

### 2.2.3. Descripción general del desarrollo del cultivo.

Desde un punto de vista biológico, una planta es un complejo sistema en el que intervienen una gran cantidad de procesos y de variables. La respuesta de un cultivo a un factor ambiental, es el resultado de otros factores semejantes actuando sobre diferentes procesos fisiológicos, presentando cada uno de ellos una sensibilidad propia, además la dependencia de un proceso fisiológico a un factor ambiental no es constante en el tiempo, cambiando durante el ciclo de desarrollo de la planta. (Alpi, 1994). Un estudio completo del desarrollo de las plantas con objetivo de obtener un modelo matemático es un tema muy amplio, pues requiere de un perfecto conocimiento del metabolismo de las plantas y además

de procesos que se llevan a cabo durante su desarrollo.

- Temperatura: Existe una temperatura óptima para el desarrollo de cada cultivo, por ende uno de los principales objetivos al cultivar en invernadero es reducir las oscilaciones de la temperatura dentro del invernadero, tanto a lo largo del día como en las distintas estaciones del año. Procesos como la fotosíntesis, transpiración y respiración responden a la temperatura de manera diferente, teniendo consecuencias en la fotosíntesis neta y la cantidad de agua transpirada para la asimilación de  $\text{CO}_2$ . Además la temperatura ejerce un control determinante sobre la transpiración y relacionándose así con la humedad relativa.
- Humedad: La humedad relativa y la temperatura de las hojas determinan el gradiente de presión de vapor que regula el proceso de transpiración, lo cual dependiendo de la condiciones que se estén presentando, por ejemplo el índice foliar y alta radiación solar tienden a aumentar la humedad relativa, sin embargo altas fluctuaciones de ésta, sumadas a un abastecimiento hídrico inadecuado, traen como consecuencia un estrés hídrico en las plantas. Por otro lado, la condensación del vapor de agua, puede ser un efecto no deseado debido al goteo sobre las plantas ocasionando su estropeo debido al exceso de humedad.
- $\text{CO}_2$ : La concentración de  $\text{CO}_2$  en un invernadero corresponde al ciclo de la actividad fotosintética del cultivo, por la noche en ausencia de este proceso la concentración de  $\text{CO}_2$  aumenta debido a la respiración, durante los procesos luminosos la concentración de  $\text{CO}_2$  se reduce de manera proporcional a la actividad fotosintética.

### 2.3. Cultivo en invernaderos.

Con el desarrollo de la agricultura a lo largo de la historia del hombre, han surgido diversas técnicas que nos permiten obtener cultivos durante todo el año y no sólo en ciertas épocas, buscando tener una producción anticipada o totalmente fuera de estación lo cual recibe el nombre de producción semi-forzada y forzada respectivamente (Alpi, 1994). Los invernaderos forman parte de las técnicas de cultivo protegido, son estructuras equipadas con sistemas para generar un micro-clima adecuado para el desarrollo del cultivo que protegen. Se han usado desde tiempos lejanos para enfrentar los cambios de las condiciones climatológicas, el ataque de plagas y otros factores que afectan el cultivo. Entre los principales tipos de invernaderos se encuentran los siguientes:

- Invernadero-túnel.



- Invernadero capilla.
- Invernadero en diente de sierra.
- Invernadero capilla modificado.
- Invernadero con techumbre curva.
- Invernadero tipo “parral o “almeriense”
- Invernadero “holandés”, tipo Vento.

En el cuadro 2.3.1, se muestran las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de invernaderos.

Cuadro 2.3.1: Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de invernaderos.

Tipo de invernadero	Ventajas	Desventajas
Túnel	Alta resistencia al los vientos, fácil instalación, alta transmitancia solar, apto tanto para materiales flexibles como rígidos	Escasa inercia térmica, sólo recomendado para cultivos de bajo porte
Capilla	Construcción de mediana a baja complejidad, utilización de materiales de bajo costo, apto tanto para materiales flexibles como rígidos	Problemas de ventilación, menor volumen de aire encerrado, mayor sombreo, soportes internos que dificultan el emplazamiento de cultivos
Diente de sierra	Construcción de mediana a baja complejidad, excelente ventilación, empleo de materiales de bajo costo,	Mayor sombreo que el tipo capilla, menor volumen encerrado
Capilla modificado	Construcción de mediana a baja complejidad, empleo de materiales de bajo costo	Mayor sombreo, menor volumen encerrado, soporte interno dificulta el emplazamiento de cultivos
Techumbre curva	La más alta transmitancia solar, espacio interior totalmente libre, construcción de mediana a baja complejidad,	Carencia de algún sistema de ventilación
Tipo parral	Gran inercia térmica, gran intercepción de la luz solar, gran intercepción de la luz solar, resistencia a los vientos y eficiente sistema de anclaje	Deficiente ventilación, escasa capacidad de drenaje, construcción de alta complejidad
Tipo Vento	Presenta el mejor comportamiento térmico, alto grado de control de las condiciones ambientales	Alto costo

### 2.3.1. Evolución en el uso de invernaderos.

La tendencia en el uso de los invernaderos sufrió cambios que dependieron de las técnicas agropecuarias, la teoría de control, la tecnología desarrollada y la investigación sobre estos sistemas. Los invernaderos comenzaron como simples recintos que albergaban el cultivo y lo protegían de ciertas

amenazas y variaciones climáticas. Conforme se diseñaron mejores computadoras que permitieron la resolución de ecuaciones.

En relación con el invernadero tipo Vento se han realizado distintos estudios acerca de su comportamiento dinámico, marcando así una constante evolución del uso de estas estructuras. Uno de los avances más importantes que ha tenido a lo largo de la historia el uso de los invernaderos es la forma en la que se realizan los cambios en las entradas de estos sistemas para ajustar así alguno de los parámetros que se relaciona con el crecimiento de los cultivos, los cuales anteriormente se realizaban por medio de la experiencia y conocimiento del productor. En la actualidad en algunas regiones del mundo en la que se emplean invernaderos, el horticultor sigue realizando estos cambios basados en su propio juicio y de forma manual.

### **2.3.2. Modelado de los invernaderos.**

La historia del control de invernaderos se ha desarrollado desde mediados del siglo pasado. Con la evolución de estos sistemas también se fueron obteniendo mejores modelos matemáticos. Alrededor de los años 60's se utilizaban simples relaciones algebraicas pues el modelo como un sistema dinámico implica el uso de ecuaciones diferenciales, las cuales en aquella época eran difíciles de resolver para variables de entrada variantes en el tiempo (ten Cate Udink, 1983). Sin embargo la relación entre el cultivo y el suelo en la variación del clima del invernadero derivó en la aparición de los modelos complejos, los cuales se basaban en balances de calor. Aparecieron varios modelos de balance de calor, sin embargo no tomaban en cuenta el almacenamiento de energía dentro del invernadero y sólo proporcionaban buenos resultados bajo condiciones de clima estacionarias. En la década de los 70's otras técnicas fueron utilizadas para obtener modelos matemáticos, por ejemplo Takakura et al. (1974) utilizaron series de Fourier para descomponer las señales de entrada. Y Bot (1983), presentó en el año 1978 un modelo dinámico que podía ser utilizado para variables de entrada arbitrarias.

Se considera que formalmente se inicia con el modelado de los invernaderos en la década de los 80's. A partir de los primeros trabajos presentados y hasta la actualidad se han mejorado los modelos antes propuestos con el fin de describir mejor el comportamiento dinámico. A continuación se describe la evolución de un modelo de los más ampliamente aceptados, un desarrollo que ha tomado más de 40 años y que ha sido ampliamente probado.

### Modelo matemático presentado por Udink, 1983.

En 1983 el trabajo de Udink (ten Cate Udink, 1983) presentó un modelo que describe el comportamiento de un invernadero considerando que el factor más importante para el control es la temperatura del aire interno. Un balance térmico y la linealización alrededor de un punto de equilibrio conforman el modelo de bajo orden con tres funciones de transferencia y considera como señales de control la apertura de la válvula del sistema de calefacción y la apertura del sistema de ventilación. Considera también los efectos de la radiación de onda corta y onda larga. Consta de un conjunto de tres ecuaciones diferenciales de primer orden que relacionan a la temperatura del aire interior del invernadero,  $\vartheta_g$ , con: la temperatura del agua de entrada del sistema de calefacción,  $\vartheta_h$ , la razón de ventilación,  $S_v$ , y la radiación de onda corta,  $\varphi_s$ . Dicho modelo se obtuvo a través de un sencillo balance térmico y con ciertas idealizaciones, por ejemplo: se consideró al sistema como un tanque perfectamente mezclado y se asumieron que las variables eran uniformes en todo el invernadero. Los parámetros de este modelo se muestran en la figura 2.4

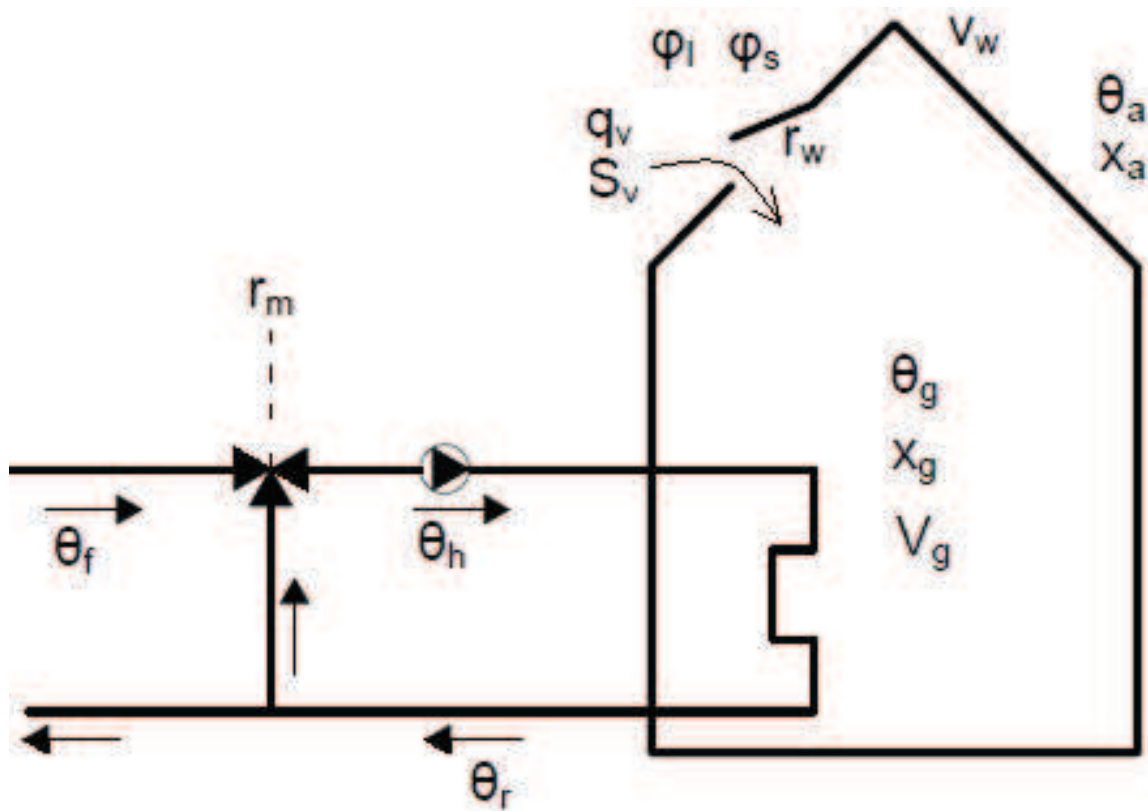


Figura 2.4: Parámetros de un invernadero tipo Vento.

El invernadero bajo las consideraciones antes descritas, se puede representar como se muestra en el diagrama de bloques de la figura 2.5. El modelo que expuso Udink en su tesis presenta algunos experimentos para la obtención de los parámetros y algunas simulaciones que le permiten concluir que a pesar de ser un modelo sencillo, permite tener buenas aproximaciones del comportamiento del sistema. Las variables de control son: la posición de la válvula del mezclador,  $r_m$ , y la posición de la ventana del sistema de ventilación,  $r_w$ , y la salida es la temperatura del aire interior, la cual se ve afectada directamente por la radiación de onda corta (que es la radiación solar), la temperatura del agua de calefacción a la entrada del invernadero y la razón de ventilación (que es el número de veces que el aire del invernadero es completamente reemplazado en una hora) .

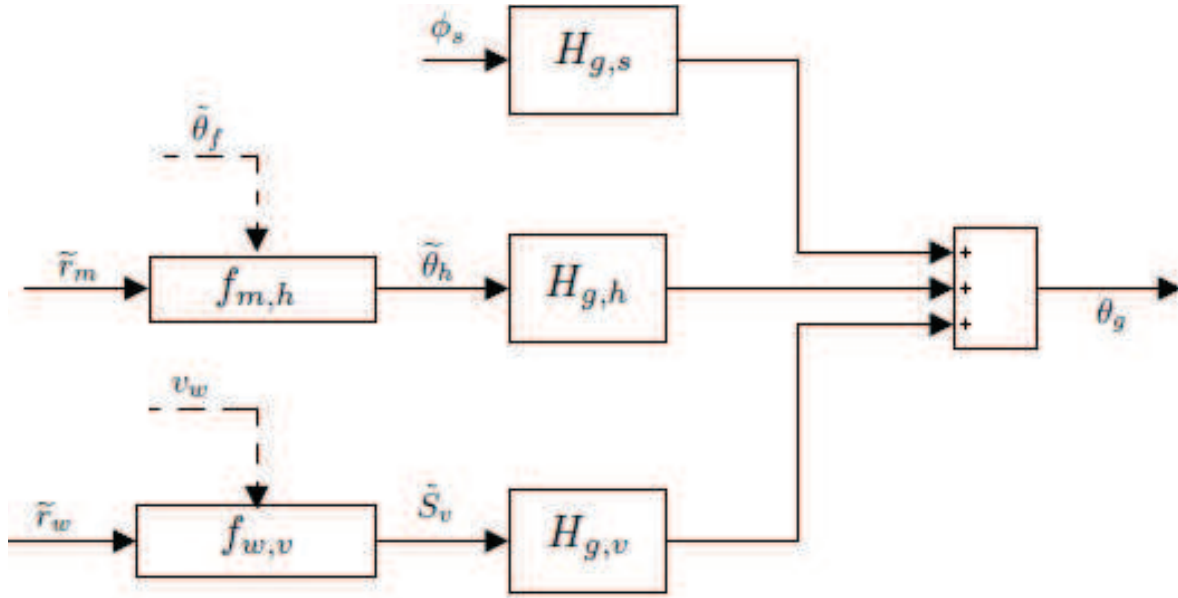


Figura 2.5: Diagrama de bloques del invernadero.

El modelo se presenta en las siguientes ecuaciones:

$$C_g^* \frac{d\tilde{\theta}_g}{dt} = -(k_v^* + k_h^* + k_r^*) \tilde{\theta}_g(t) + k_h^* \tilde{\theta}_h \quad (2.3.1)$$

$$C_g^* \frac{d\tilde{\theta}_g}{dt} = -(k_v^* + k_h^* + k_r^*) \tilde{\theta}_g(t) + \xi \bar{h}_g (\bar{\theta}_a - \bar{\theta}_g) \tilde{S}_v(t) \quad (2.3.2)$$

$$C_g^* \frac{d\tilde{\theta}_g}{dt} = -(k_v^* + k_h^* + k_r^*) \tilde{\theta}_g(t) + \eta \phi_s''(t) \quad (2.3.3)$$

$$\theta_h(t) = \left\{ 1 + \frac{r_m(t)}{100} \right\} \theta_r + \frac{r_m(t)}{100} \theta_f(t); r_m \in [0, 100\%] \quad (2.3.4)$$

$$\tilde{S}_v(t) = a_1 \bar{v}_w \tilde{r}_w(t); r_w \in [0, 30\%], v_w \left[ 1, 10 \left( \frac{m}{s} \right) \right] \quad (2.3.5)$$

Las ecuaciones desde 2.3.1 hasta la 2.3.5, describen el comportamiento dinámico de la temperatura del aire interno del invernadero. Aplicando la transformada de Laplace y haciendo sencillos despejes algebraicos, se obtienen las funciones de transferencia que se muestran en el diagrama de bloques de la figura 2.5. Los símbolos con una virgüilla corresponden a variables en incrementos, los símbolos testados corresponden a valores constantes que representan un punto de equilibrio, mientras que los valores marcados con un asterisco son parámetros normalizados a unidades del área del suelo del invernadero.

#### **El modelo de Tchamitchain, 1992.**

Dados los resultados presentados por Udink su modelo fue ocupado sin grandes modificaciones hasta el año de 1992 en el que Tchamitchain (1992), presentó un modelo que resultó de modificaciones del de Udink, en el que se logró un mejor modelo que de igual modo se mantuvo vigente durante varios años; en él se consideran las concentraciones de  $\text{CO}_2$ , consta de tres ecuaciones diferenciales en la que los estados son: la temperatura del aire del invernadero,  $T_g$ , la temperatura del suelo del invernadero,  $T_s$  y la concentración de  $\text{CO}_2$ ,  $C_i$ . La temperatura exterior,  $T_o$ , la radiación solar de onda corta,  $G$ . En la ecuación 2.3.6  $C_g$  representa la capacidad calorífica del invernadero,  $k_v$  es el coeficiente de ventilación y está relacionado con el tipo de ventanas que posee la estructura,  $H$  la calefacción la cual es una variable de control;  $k_r$  es el coeficiente de transmisión térmica de la cubierta relacionada con el material de ésta y determina la cantidad de transferencia de energía por la diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior,  $k_s$  es el coeficiente de transmisión térmica del suelo y nos determina la energía intercambiada con el suelo,  $\eta$  es el factor de conversión de radiación y determina cuanta de la radiación solar de onda corta atraviesa la cubierta y es absorbida por los cuerpos dentro del invernadero. En la ecuación 2.3.7  $T_d$  representa la temperatura de la segunda capa del suelo y  $k_d$  el coeficiente de transmisión térmica de dicha capa del suelo. En la ecuación 2.3.8  $\Phi_v$  es el flujo de ventilación que está determinado por la dirección y velocidad del viento,  $\phi_{inj}$  es el flujo de  $\text{CO}_2$  extra que se suministra al invernadero,  $R$  es la respiración del cultivo y  $\mu P$  es el término relacionado con la

fotosíntesis. Las ecuaciones del modelo matemático se presentan a continuación:

$$C_g \frac{d}{dt} T_g = k_v(T_o - T_g) + H + k_r(T_o - T_g) + k_s(T_s - T_g) + \eta G \quad (2.3.6)$$

$$C_s \frac{d}{dt} T_s = k_s(T_s - T_g) + k_d(T_d - T_s) \quad (2.3.7)$$

$$\frac{V_g}{A_g} \frac{d}{dt} C_i = \Phi_v(C_o - C_i) + \phi_{inj} + R + \mu P \quad (2.3.8)$$

$$k_v = M_{air} c_p \Phi_v \quad (2.3.9)$$

$$\Phi_v = \kappa + \theta \omega + v w r_w \quad (2.3.10)$$

A pesar de representar un avance en comparación con el modelo de Udink, el modelo de Tchamitchain no describe algunos procesos básicos que son de importancia en la descripción de la dinámica de estos sistemas, entre los que se encuentran la humedad del aire interno del invernadero.

### **El modelo de Tap, 2000.**

La atención hacia los invernaderos en Netherlands, no perdió fuerza y en el año 1997 se había firmado un convenio entre horticultores y el gobierno en el que se establecían varios objetivos entre los que se incluían aumentar el rendimiento promedio de los cultivos, un menor uso de fertilizantes y sus emisiones, y una disminución en el uso de combustibles fósiles empleados para el funcionamiento de dichos invernaderos. Todos estos objetivos hicieron evidente una evolución en el planteamiento del control en los invernaderos que se vio reflejado en el trabajo presentado por Tap (2000). Hasta ese momento los sistemas de control de invernaderos se basaban en consideraciones heurísticas o a lo más en sistemas PI, a los que se les fueron agregando distintos sistemas, por ejemplo sistemas de riego. La propuesta principal en dicha tesis es la implementación de técnicas de control óptimo con el fin de minimizar una función de costo que se relacionaba con el aspecto económico, para lo que fue necesario un modelo mejorado que se basó en el trabajo previo de Tchamitchain. El modelo aumentado, como él lo llama, considera además el factor de la humedad e integra un modelo del crecimiento dentro de invernaderos del jitomate. Un modelo integral de noveno orden que se podía implementar para

técnicas de control óptimo y que, en comparación con los modelos previos, era el más completo. Las ecuaciones que representan este modelo se muestran a continuación. La ecuación 2.3.13 es una opción para no medir la temperatura del agua del sistema de calefacción, considerando que no se tiene modo de sensar entonces se considera como una variable de estado más. a partir de la ecuación 2.3.16 hasta la ecuación 2.3.20 son parte de la dinámica del cultivo, en el trabajo de Tap (2000) se muestra a detalle el desarrollo de este modelo, la complejidad del modelado de hortalizas motivó a proponer una alternativa distinta, lo cual se discute en el siguiente capítulo. En la ecuación 2.3.11  $\alpha$  representa el coeficiente de trasferencia de calor de las tuberías del sistema de calefacción;  $\lambda E$  representa la cantidad de calor latente necesario para la transpiración del cultivo;  $\frac{\lambda}{\epsilon+1} M_c$  representa la cantidad de calor intercambiada por la condensación del agua en la cubierta del invernadero.

$$C_g \frac{d}{dt} T_g = k_v(T_o - T_g) + \alpha(T_p - T_g) + k_r(T_o - T_g) + k_s(T_s - T_g) + \eta G - \lambda E + \frac{\lambda}{\epsilon + 1} M_c \quad (2.3.11)$$

$$C_s \frac{d}{dt} T_s = -k_s(T_s - T_g) + k_d(T_d - T_s) \quad (2.3.12)$$

$$\rho C_p V_p \frac{d}{dt} T_p = \frac{2\rho\varphi\varphi_h}{2\varphi - \varphi_h} (T_h - T_p) + A_p \beta G - A_p \alpha (T_p - T_g) \quad (2.3.13)$$

$$\frac{V_g}{A_g} \frac{d}{dt} C_i = \Phi_v (C_o - C_i) + \varphi_{inj} + R - \mu P_g \quad (2.3.14)$$

$$\frac{d}{dt} V_i = \frac{A_g}{V_g} (E - \Phi_v (V_i - V_o) - M_c) \quad (2.3.15)$$

$$\frac{d}{dt} B = P_g - b \left( f \cdot g_f \cdot W_f + v \cdot g_L \cdot \frac{W_L}{z} \right) - bR \quad (2.3.16)$$

$$\frac{d}{dt} W_F = b \cdot g_F W_F - (1 - b) r_F W_F - h_F W_F \quad (2.3.17)$$

$$\frac{d}{dt} W_L = b \cdot g_L W_L - (1 - b) r_L W_L - h_L W_L \quad (2.3.18)$$

$$\frac{d}{dt}D_P = d_1 + d_2 \ln\left(\frac{T_g}{d_3}\right) - d_4 t - h \quad (2.3.19)$$

$$\frac{d}{dt}W_{H_F} = h_F W_F \quad (2.3.20)$$

### Modelo de Tap mejorado por Iga.

Una de las mayores mejoras que se han aplicado al modelo de Tap, fue completar dentro del modelo matemático la relación entre la humedad y temperatura dentro del invernadero, ya que en el modelo de Tap se considera humedad constante, pero esta se ve afectada por diversos factores incluyendo el cultivo (Iga, 2006). En este modelo  $h$  representa la altura del invernadero,  $C_p$  es el calor específico del agua,  $\gamma_o$  es la densidad del aire seco, el término  $h(C_p\gamma_o + C_H V_i)$  es en sí la mejora propuesta por Iga (2006) y representa que la capacidad calorífica del aire dentro del invernadero no es constante y depende de una de las variables de estado. Las ecuaciones de este modelo se muestran a continuación.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}T_g = & \frac{1}{h(C_p\gamma_o + C_H V_i)} [k_v(T_o - T_g) + \alpha(T_p - T_g) + k_r(T_o - T_g) + \\ & + k_s(T_s - T_g) + Z\eta G - \lambda E + \frac{\lambda}{\epsilon + 1} M_c - C_H T_g (E - \Phi_v(V_i - V_o) - M_c)] \end{aligned} \quad (2.3.21)$$

$$C_s \frac{d}{dt}T_s = -k_s(T_s - T_g) + k_d(T_d - T_s) \quad (2.3.22)$$

$$\rho C_p V_p \frac{d}{dt}T_p = \frac{2\rho\varphi\varphi_h}{2\varphi - \varphi_h} (T_h - T_p) + A_p \beta G - A_p \alpha (T_p - T_g) \quad (2.3.23)$$

$$\frac{V_g}{A_g} \frac{d}{dt}C_i = \Phi_v(C_o - C_i) + \varphi_{inj} + R - \mu P_g \quad (2.3.24)$$

$$\frac{d}{dt}V_i = \frac{A_g}{V_g} (E - \Phi_v(V_i - V_o) - M_c) \quad (2.3.25)$$

### Modelo matemático de cultivos en invernaderos.

El modelado de hortalizas es un campo de la investigación que exige gran conocimiento en el área. Los modelos conseguidos representan el comportamiento de las hortalizas, lo cual es empleado en el



estudio de los cultivos, elaboración de planes de riego y fertilización, manejo de invernaderos y en la implementación de algoritmos de control óptimo. Existen tres tipos de modelos: los empíricos, los telenómicos y mecanicistas.

Para los fines de esta investigación el tipo de modelo que más relevancia tiene es el mecanicista; los cuales son un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales que representan el comportamiento de las variables de estado del sistema. Los modelos mecanicistas son la opción para describir los fenómenos que ocurren en los sistemas biológicos de una manera cualitativa.

## 2.4. Descripción de Labview.

LabVIEW es un entorno de programación gráfica que ofrece una amplia gama de herramientas de integración con hardware que lo han colocado como una de las plataformas de desarrollo más utilizadas en las áreas de instrumentación, control, automatización entre otras ramas de la ingeniería y de la investigación. El lenguaje en el que se programa con LabVIEW se denomina lenguaje G, por ser un lenguaje gráfico es muy intuitivo de modo que científicos, ingenieros e investigadores se familiarizan rápidamente con éste. Las diferencias técnicas entre la programación en lenguajes de texto y el lenguaje G son muy claras; en un programa hecho en un lenguaje basado en texto la ejecución de éste se realiza por secuencias de las sentencias escritas por el programador, mientras que en un programa elaborado en lenguaje G una instrucción no se realiza hasta que no disponga de toda la información que esta requiere, es decir que en el lenguaje G el programa se ejecuta de acuerdo al flujo de datos.

LabVIEW significa *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench* y fue desarrollado por *National Instruments*; los programas que se realizan en esta plataforma son llamados VI's, por las siglas en inglés: *virtual instrument*, debido a que su apariencia y operación son similares a las de instrumentos como los multímetros u osciloscopios pero, resulta obvio que dichos instrumentos son virtuales y sólo podemos acceder a ellos a través de la computadora. Para realizar programas contamos con dos ventanas: el panel frontal y el diagrama de bloques.

En el panel frontal se muestra una interfaz de usuario la cual contiene controles e indicadores. Los controles son herramientas que le permiten al usuario introducir valores que serán procesados por el código programado. En cuanto a los indicadores son herramientas que nos permiten el monitoreo de los valores de salida o el estado de alguna variable del programa. En el diagrama de bloques se estructura propiamente el código del programa, cada instrucción es representada por un bloque que después se conecta con los demás bloques para obtener el flujo de datos necesitado para que nuestro código se

ejecute tal como lo pensamos. Una de las ventajas de LabVIEW es que continuamente se desarrollan herramientas y aplicaciones adicionales que se integran fácilmente, de tal modo que al usarlas se ahorra tiempo de programación, sin embargo se pierde un poco el control sobre el tiempo en el que se ejecuta cada uno de estos códigos. Actualmente LABVIEW se integra no sólo con el hardware diseñado por *National Instruments*, pues se han desarrollado herramientas que permiten una integración con distintas herramientas de otros desarrolladores, por ejemplo : los dispositivos FPGA's de cualquier marca, una integración con la plataforma Arduino, e incluso integración con otros softwares como es el caso de *SolidWorks* en el que de manera conjunta con LabVIEW se pueden realizar simulaciones del diseño mecánico y el diseño de control de alguna máquina o producto mecatrónico.

## Capítulo 3

# Modelo y Simulación con LabVIEW.

### 3.1. Objetivos

En este capítulo se plantean los siguientes objetivos.

- Obtener el modelo del invernadero vacío. El modelo resultante será propuesto como una referencia para cualquier tipo de invernadero.
- Proponer un modelo del chile jalapeño.
- Realizar las simulaciones en LabVIEW para observar como las variables del medio exterior y del invernadero afectan el clima dentro del invernadero.

### 3.2. Modelo del invernadero vacío.

En el modelo, se presenta el resultado del análisis de los principales intercambios térmicos del invernadero y los procesos biológicos del cultivo, sin embargo el desarrollo de un modelo que considere términos como la transpiración, la respiración y el crecimiento del cultivo es muy complejo y sale de los alcances de este trabajo. En la literatura se tienen modelos matemáticos para el cultivo del jitomate, la lechuga y el pepino; también se han desarrollado modelos de simulación de crecimiento generales bajo condiciones de cultivo a campo abierto, ejemplo de éstos son SUCROSS, HORTISIM, AZKAM entre otros, el desarrollo de estos modelos se realizó en el lenguaje FORTRAN. Lo anterior fue la razón para separar de los modelos analizados previamente en dos partes, el modelo del invernadero vacío

y el modelo del cultivo. Si suponemos que no existe cultivo en el invernadero la dinámica dependerá sólo de los intercambios debidos a la naturaleza de la cubierta y sistemas de calefacción y ventilación; por ejemplo en la ecuación 2.3.21 el término  $\lambda E$  describe la energía de calor latente necesaria para la transpiración del cultivo, donde:

$$E = W_L \frac{qsn\eta G + r\rho c_p D_g g_b}{\lambda \left( s + \gamma \left( 1 + \frac{g_b}{g} \right) \right)}$$

$W_L$  representa el peso seco estructural del fruto y es medido en  $(g/m^2)$ . De modo que si no existe este cultivo dentro del invernadero este término se convierte en cero. De manera similar, en la ecuación 2.3.24 los términos  $R$  y  $\mu P_g$  hacen referencia a la respiración y la fotosíntesis respectivamente y están definidas por las siguientes ecuaciones:

$$R = r_F W_F + r_L \frac{W_L}{z}$$

donde  $W_L$  es el peso seco estructural de las hojas, que al no haber cultivo se considera como cero al igual que  $W_F$ ; la fotosíntesis se define por:

$$P_g = P_m l \frac{I \cdot C}{p_3 + I p_4 + C}$$

donde  $l$  es definido como:

$$l = \frac{\left( \frac{W_L}{w_R} \right)^m}{1 + \left( \frac{W_L}{w_R} \right)^m} \quad (3.2.1)$$

donde  $w_R$  es una constante y no puede valer cero, sin embargo al suponer que no hay cultivo  $W_L$  es considerado cero y de este modo  $P_g$  toma también valor de cero. De este modo probamos que si se considera actividad nula del cultivo se puede extraer un modelo del invernadero vacío, el cual está representado por las siguientes ecuaciones.

$$\begin{aligned} dtT_g = & \frac{1}{h(C_p \gamma_o + C_H V_i)} [k_v(T_o - T_g) + \alpha(T_p - T_g) + k_r(T_o - T_g) + \\ & + k_s(T_s - T_g) + Z\eta G + \frac{\lambda}{\epsilon + 1} M_c - C_H T_g (\Phi_v(V_i - V_o) - M_c)] \end{aligned} \quad (3.2.2)$$

$$C_s \frac{d}{dt} T_s = -k_s(T_s - T_g) + k_d(T_d - T_s) \quad (3.2.3)$$

$$\frac{V_g}{A_g} \frac{d}{dt} C_i = \Phi_v(C_o - C_i) + \varphi_{inj} \quad (3.2.4)$$

$$\frac{d}{dt} V_i = \frac{A_g}{V_g} (-\Phi_v(V_i - V_o) - M_c) \quad (3.2.5)$$

Cada término describe los intercambios de energía presentes, las ecuaciones antes mencionadas fueron obtenidas del análisis de un invernadero tipo Vento. En México predominan otros tipos de invernadero, el objetivo de tomar el modelo existente y quedarnos únicamente con el modelo del invernadero vacío es para simular y analizar cómo afectan cada parámetro del invernadero al clima interior de es éste. El diagrama de bloques del sistema descrito se muestra en la figura 3.1.

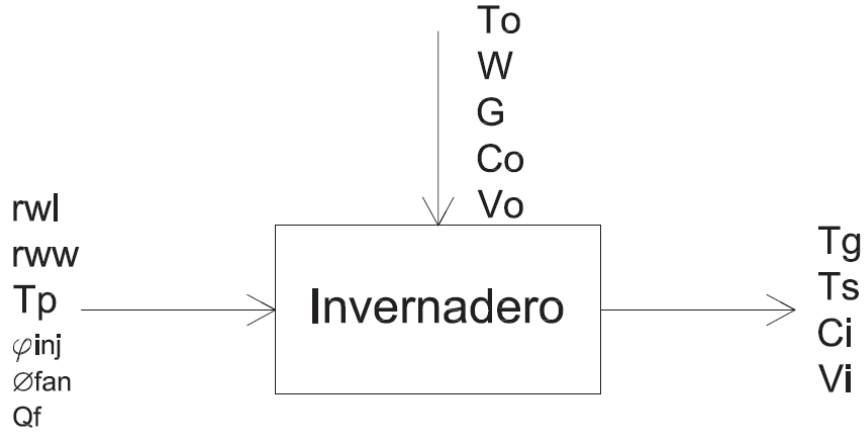


Figura 3.1: Diagrama de bloques del invernadero vacío

### 3.3. Modelo del chile jalapeño.

Para la obtención de un modelo que representara de algún modo a la dinámica del chile jalapeño, se tomó como base los datos experimentales reportados en el trabajo de Azofeifa y Moreira (2004) los cuales se muestran en el cuadro 3.3.1.

DDS	T	$\varphi$	Wr	Wl
26	23.1	0.86	0	0
40	23.1	0.87	0.002	0.00004
54	22.9	0.84	0.074	0.00031
68	22.4	0.84	0.197	0.00116
82	22.4	0.89	0.332	0.00355

Cuadro 3.3.1: Datos del desarrollo del chile jalapeño

El modelo de variables de estado que se propone tiene la siguiente estructura:

$$\frac{d}{dt}Wr = aT_g + bVi + cWr \quad (3.3.1)$$

$$\frac{d}{dt}Wl = dT_g + eVi + fWr \quad (3.3.2)$$

Se puede apreciar que es un modelo lineal que tiene como entradas la temperatura y la humedad y las salidas son el peso seco estructural de la raíz  $Wl$  y de las hojas  $Wr$ . Cabe señalar que el modelo presentado es una primera aproximación realizada con datos experimentales existentes y éste se puede mejorar mucho. Lo que se plantea es que en el cuadro se tienen cuatro puntos de la solución del modelo propuesto, considerando de que un derivada se puede expresar como incrementos, se pueden plantear el siguiente sistema de ecuaciones algebraicas.

$$\frac{\Delta Wr1}{\Delta t} = aTi1 + bVi1 + cWr1 \quad (3.3.3)$$

$$\frac{\Delta Wr2}{\Delta t} = aTi2 + bVi2 + cWr2 \quad (3.3.4)$$

$$\frac{\Delta Wr3}{\Delta t} = aTi3 + bVi3 + cWr3 \quad (3.3.5)$$

donde las incógnitas son los coeficientes a, b y c. El mismo procedimiento se realizó para la variable de estado  $Wl$ .

Se requiere es tener los datos en las mismas unidades que el modelo del invernadero. Para obtener la humedad en ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) se prosigue de la siguiente manera:

Para  $\varphi=0.86$  del primer renglón del cuadro 3.3.1, primero se obtiene la presión de saturación a  $T=23.1$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) de las tablas de vapor:

$$P_g = 2.827(Pa)$$

Posteriormente se calcula la presión parcial del vapor de agua con la ecuación 3.3.6.

$$P_v = \varphi \cdot P_g \quad (3.3.6)$$

lo cual nos da un resultado de 2.43122 (Pa), con este resultado se obtiene la humedad específica con la ecuación 3.3.7.

$$\omega = 0.6222 \left( \frac{P_v}{P_m - P_v} \right) \quad (3.3.7)$$

para este ejemplo se tiene que  $\omega = 0.0152913(\text{kg}_{\text{vapor}}/\text{Kg}_{\text{aire}})$ . Finalmente se multiplica por la densidad del aire.

$$V = \omega M_{\text{air}} \quad (3.3.8)$$

$$V1 = 0.0197258$$

El mismo procedimiento se realiza para los demás datos de humedad.

Resolviendo los dos sistemas de ecuaciones algebraicas el modelo obtenido fue el siguiente:

$$\frac{d}{dt} W_r = 0.0002 \times 10^{-3} T_g - 0.1781 \times 10^{-3} V_i - 0.024 W_r \quad (3.3.9)$$

$$\frac{d}{dt} W_l = 0.0003 \times 10^{-3} T_g - 0.3984 \times 10^{-3} V_i - 0.024 W_r \quad (3.3.10)$$

### 3.4. Simulaciones.

El código de LabVIEW utilizado para estas simulaciones se muestra en la figura 3.2 (a); la figura 3.2 (b) muestra la interfaz de usuario, donde se pueden configurar los parámetros del método numérico, las condiciones del clima exterior y las variables de entrada.

El sistema de ecuaciones diferenciales que conforman el modelo del invernadero vacío se muestra en la figura 3.3, con el “*mathscrip*” de la izquierda se programan todas las ecuaciones algebraicas que dependen del valor del resto de las variables. Las ecuaciones de estado se programaron en el nodo formula de la derecha.

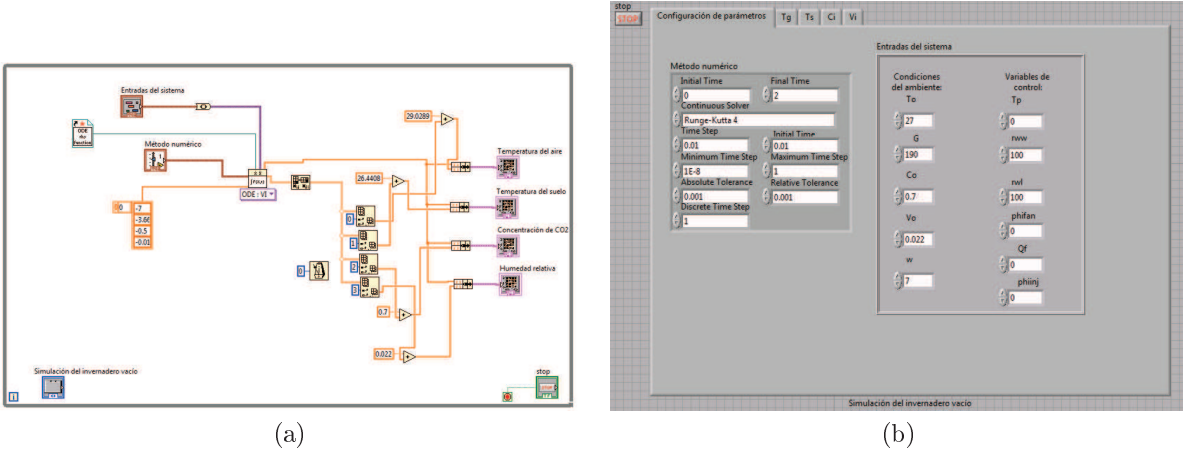


Figura 3.2: Código de LabVIEW para el invernadero vacío.

### 3.4.1. Efecto de las entradas sobre las variables de estado.

Las siguientes simulaciones tienen como objetivo mostrar el efecto de cada una de las entradas del sistema sobre las variables de estado. Considerando que las condiciones clima exterior son:

$$T_o = 27 \text{ (}^\circ\text{C)}; \quad G = 190 \left( \frac{W}{m^2} \right); \quad C_o = 0.7 \left( \frac{Kg}{m^3} \right)$$

$$V_o = 0.022 \left( \frac{Kg}{m^3} \right); \quad w = 7 \left( \frac{m}{s} \right)$$

Las condiciones iniciales son:

$$T_g = 2 \text{ (}^\circ\text{C)}; \quad T_s = 22 \text{ (}^\circ\text{C)};$$

$$C_o = 0.2 \left( \frac{Kg}{m^3} \right); \quad V_o = 0.004 \left( \frac{Kg}{m^3} \right)$$

Los valores de las variables de control son:

$$T_p = 0 \text{ (}^\circ\text{C)}; \quad rww = 100 \%; \quad rwl = 100 \%;$$

$$\phi_{fan} = 0 \left( \frac{m}{s} \right); \quad Q_f = 0 \left( \frac{m^3}{s} \right); \quad \varphi_{inj} = 0 \left( \frac{Kg}{s \cdot m^2} \right)$$



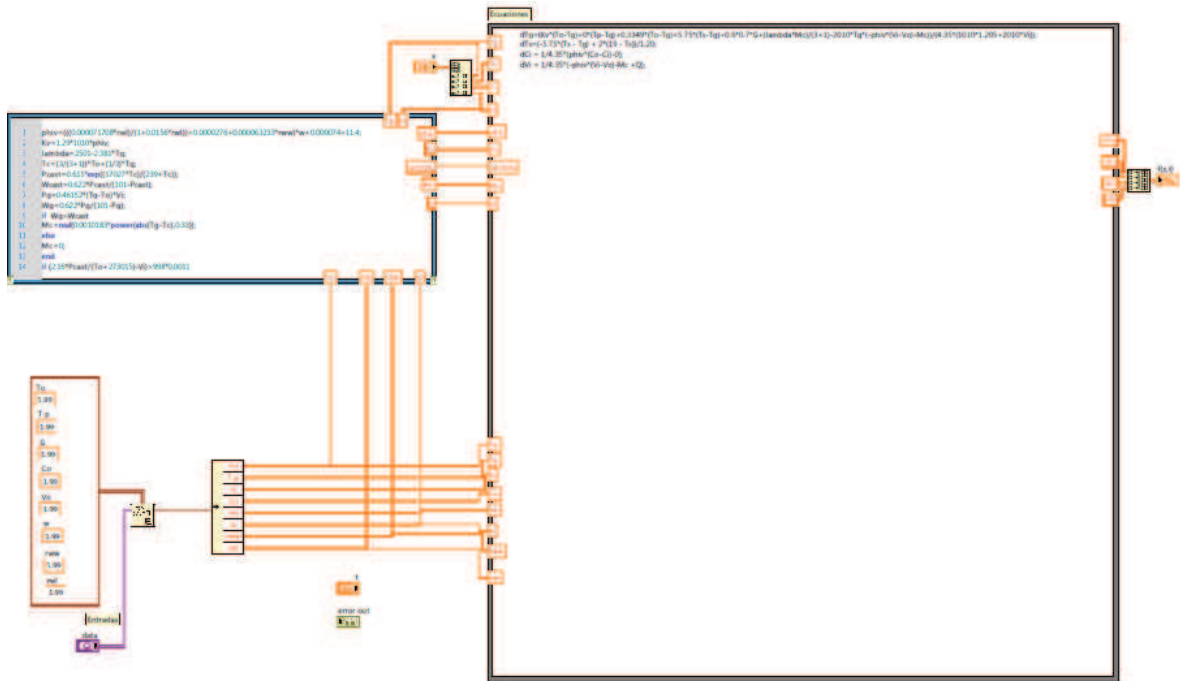


Figura 3.3: Ecuaciones diferenciales del invernadero vacío.

Se busca analizar cómo afectan cada una de las variables del clima exterior, así como la apertura de las ventanas sobre las condiciones internas del invernadero, para ello se realizan las pruebas variaciones que se observan en el cuadro 3.4.1. .

Cuadro 3.4.1: Pruebas realizadas para el invernadero.

Valor modificado.
Temperatura exterior de 27 a 32 ( $^{\circ}\text{C}$ )
Radiación solar de 190 a 300 ( $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ )
Concentración de $\text{CO}_2$ del medio ambiente de 0.2 a 1 ( $\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ )
Humedad relativa del medio ambiente de 0.004 a 0.8 ( $\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ )
Velocidad del viento de 7 a 15 ( $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ )
Apertura de las ventanas de 100 % a 12 %

Para cada simulación se hizo el cambio en listado, las demás variables se dejaron en el valor antes mencionado.

## 3.5. Resultados.

### 3.5.1. Efecto de las entradas sobre las variables de estado.

La simulación que se toma como base es la que se realizó con los siguientes valores:

$$T_o = 27 \text{ (}^\circ\text{C)}; \quad G = 190 \left( \frac{W}{m^2} \right); \quad C_o = 0.7 \left( \frac{Kg}{m^3} \right)$$

$$V_o = 0.022 \left( \frac{Kg}{m^3} \right); \quad w = 7 \left( \frac{m}{s} \right)$$

Las condiciones iniciales son:

$$T_g = 2 \text{ (}^\circ\text{C)}; \quad T_s = 22 \text{ (}^\circ\text{C)};$$

$$C_o = 0.2 \left( \frac{Kg}{m^3} \right); \quad V_o = 0.004 \left( \frac{Kg}{m^3} \right)$$

Los valores de las variables de control son:

$$T_p = 0 \text{ (}^\circ\text{C)}; \quad rww = 100 \%; \quad rwl = 100 \%;$$

$$\phi_{fan} = 0 \left( \frac{m}{s} \right); \quad Q_f = 0 \left( \frac{m^3}{s} \right); \quad \varphi_{inj} = 0 \left( \frac{Kg}{s \cdot m^2} \right)$$

El resultado de esta simulación se aprecia en las figuras de la 3.4 a la 3.7. Se muestran a continuación los resultados para las demás pruebas.

#### Temperatura exterior $T_o$ .

Al variar la temperatura exterior de 27 a 32 ( $^\circ\text{C}$ ), se obtienen los resultados que se observan en las figuras de la 3.8 a la 3.11.

Como se puede apreciar los cambios que causa el aumento de  $T_o$  afecta solamente los valores a los que tienden las temperaturas del aire y del suelo dentro del invernadero, se conserva la diferencia de dos grados entre el ambiente y el invernadero y los tiempos de asentamientos no sufren grandes cambios, pues en ambos casos están alrededor de una hora. Los valores de  $\text{CO}_2$  y humedad relativa

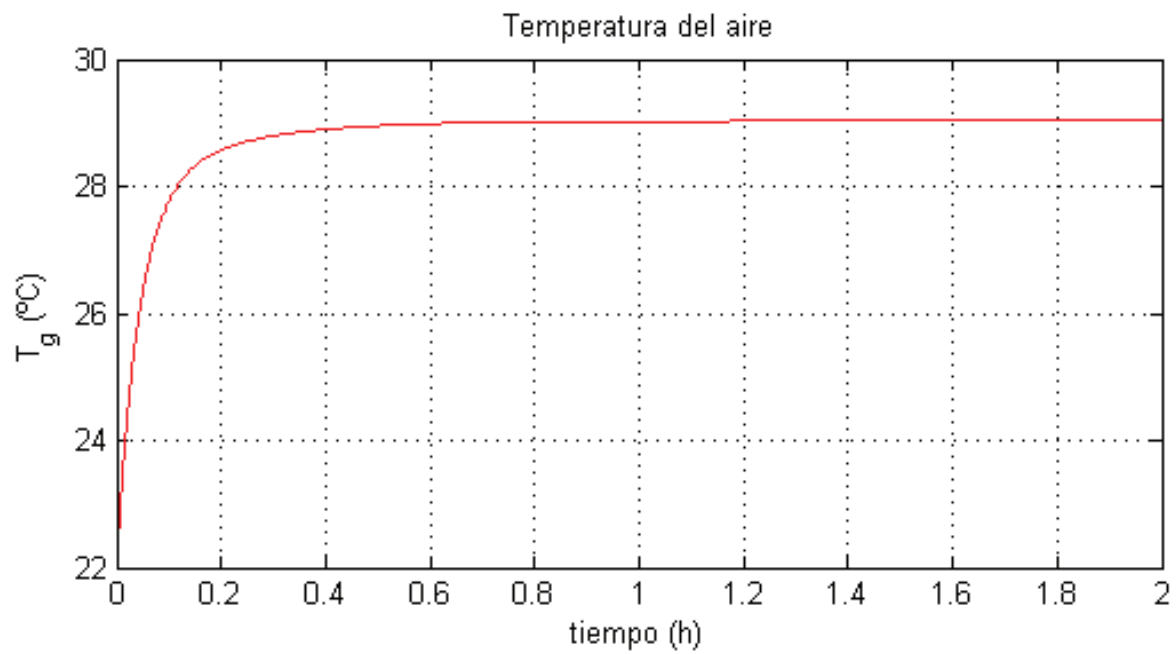


Figura 3.4: Respuesta de referencia del invernadero,  $T_g$ .

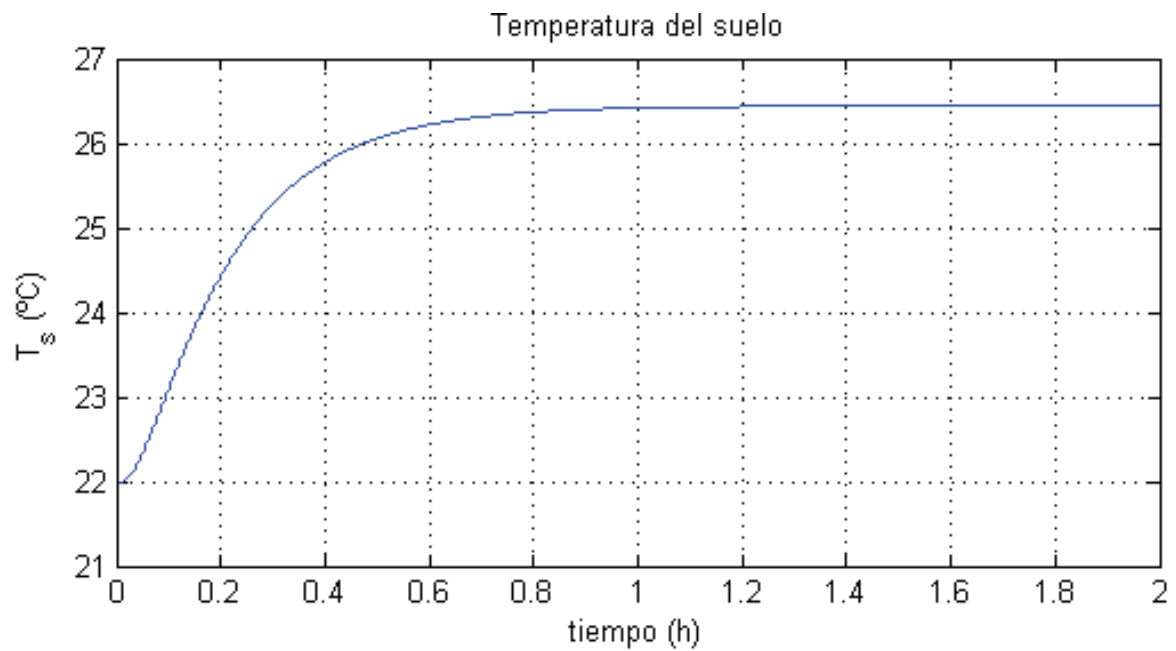


Figura 3.5: Respuesta de referencia del invernadero,  $T_s$ .

igualan los del medio ambiente.

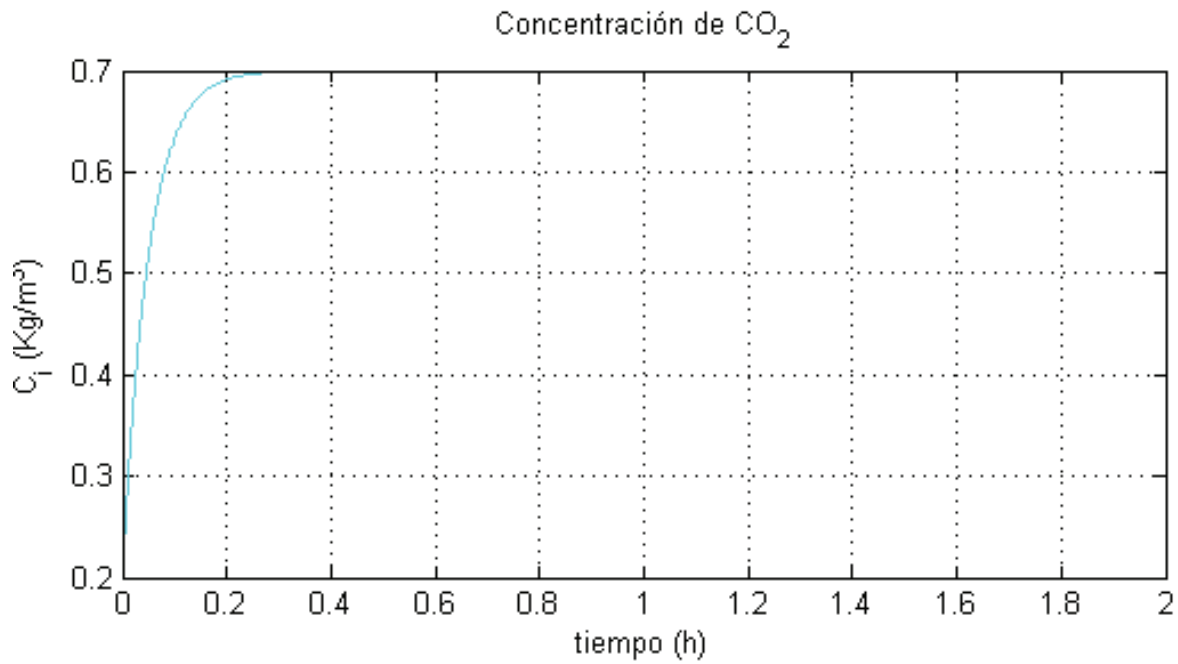


Figura 3.6: Respuesta de referencia del invernadero, Ci.

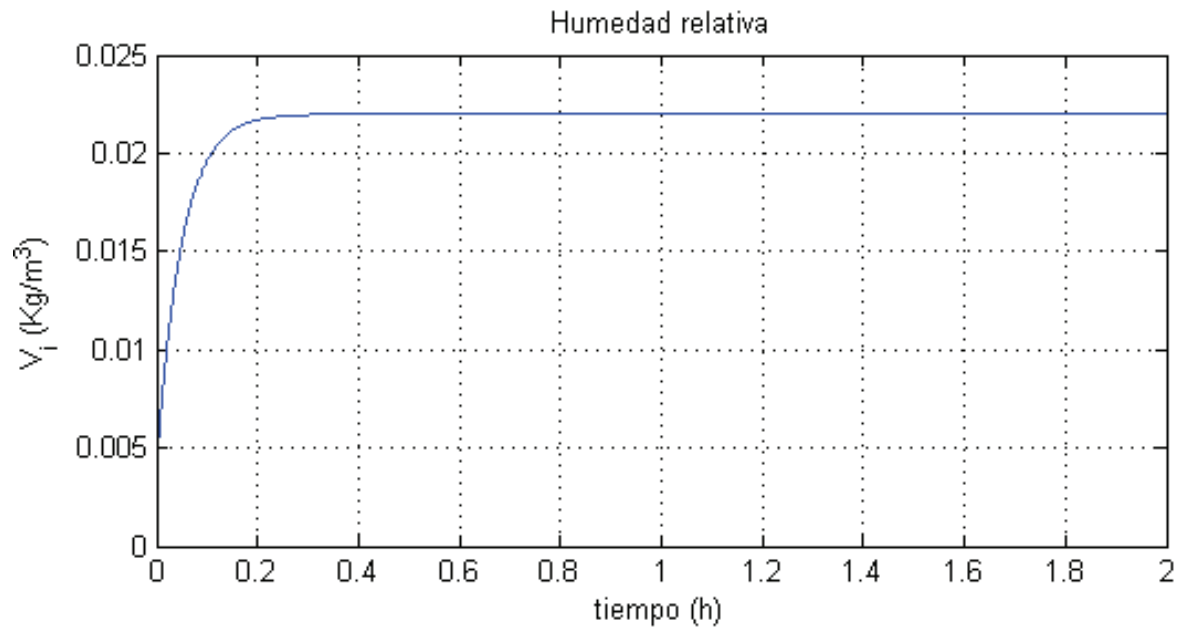


Figura 3.7: Respuesta de referencia del invernadero, Vi.

**Radiación solar, G.**

Variado el valor de la radiación solar de 190 a 300 ( $\frac{W}{m^2}$ ) observamos que afecta directamente a la temperatura del aire y del suelo dentro del invernadero, nuevamente el valor de CO<sub>2</sub> y de humedad

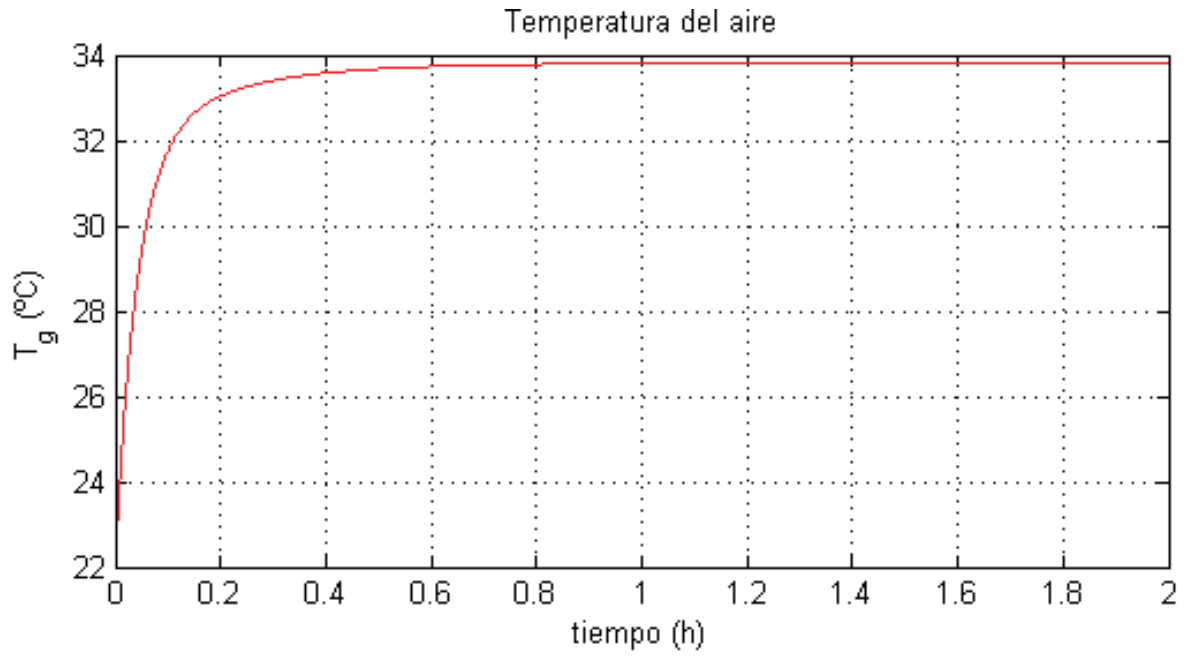


Figura 3.8: Efecto de la temperatura exterior sobre  $T_g$ .

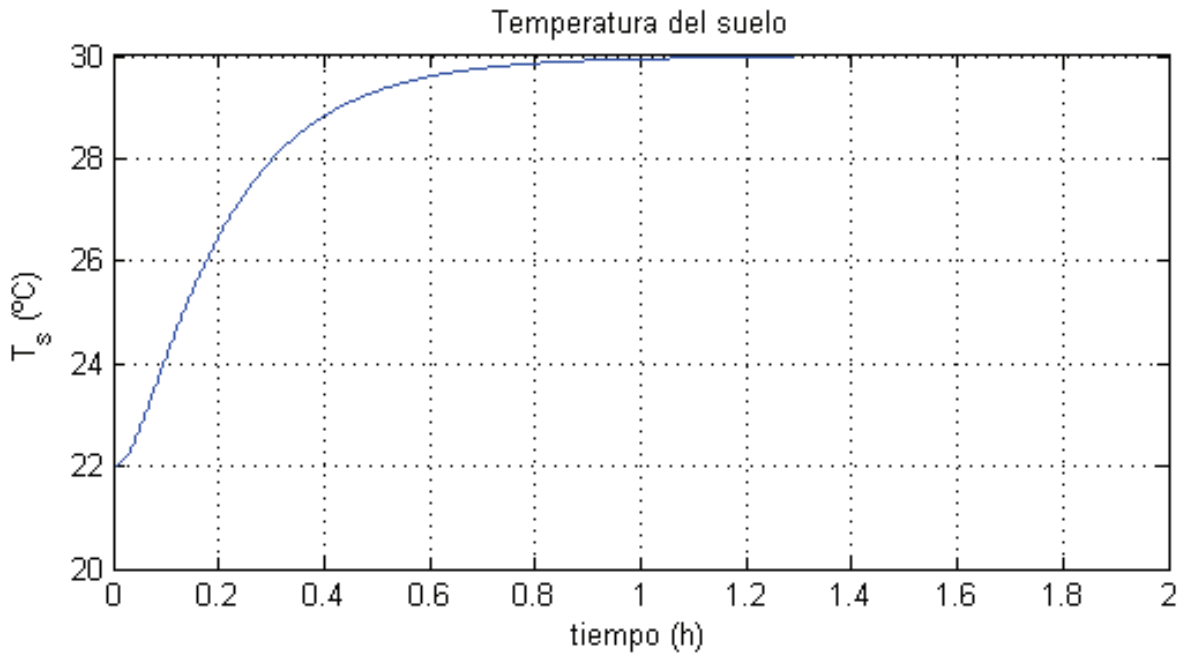


Figura 3.9: Efecto de la temperatura exterior sobre  $T_s$ .

relativa no presentan cambios. La simulación de esta prueba se puede apreciar en las figuras de la 3.12 a la 3.15.

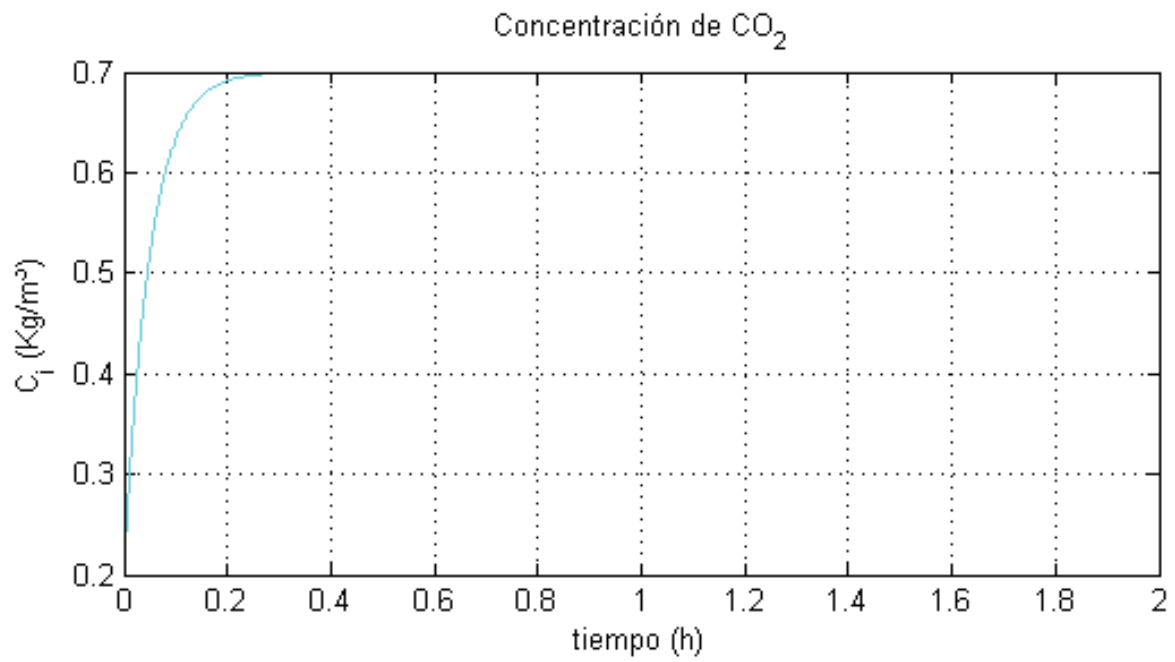


Figura 3.10: Efecto de la temperatura exterior sobre C<sub>i</sub>.

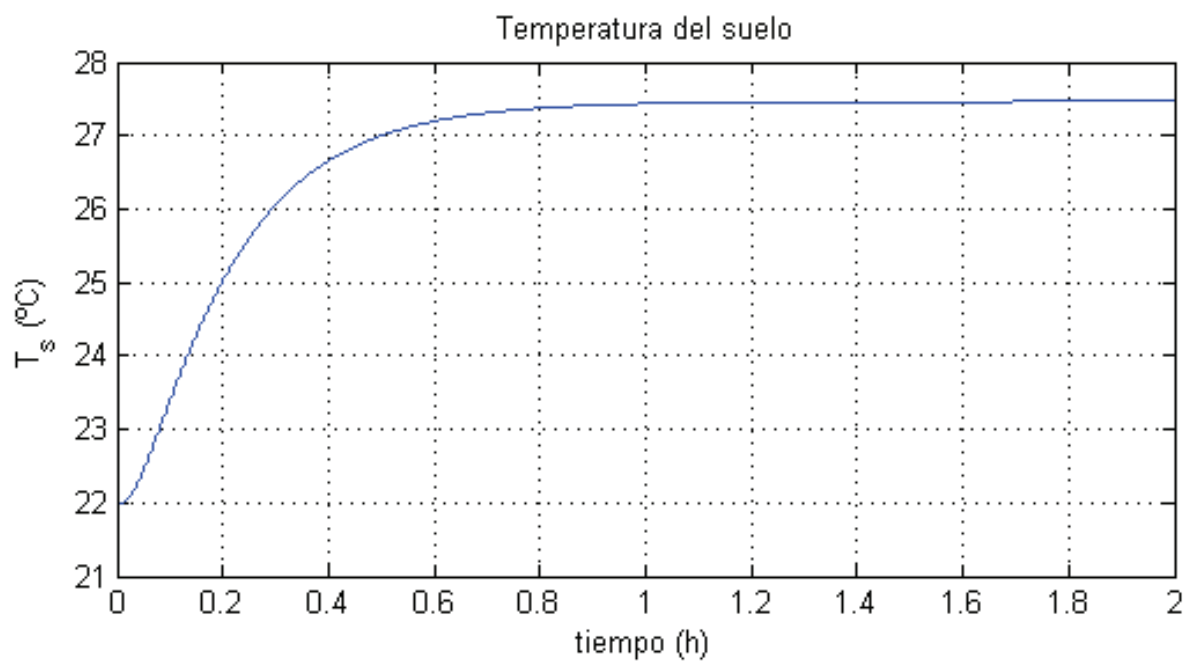


Figura 3.13: Efecto de la radiación solar sobre T<sub>s</sub>.

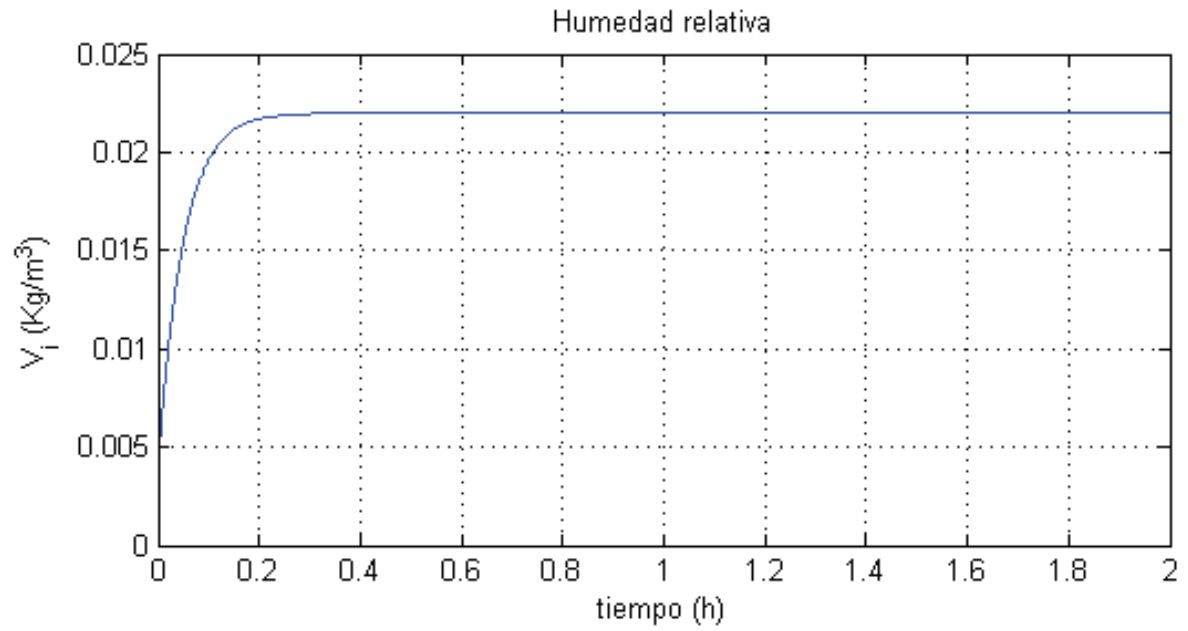


Figura 3.11: Efecto de la temperatura exterior sobre  $V_i$ .

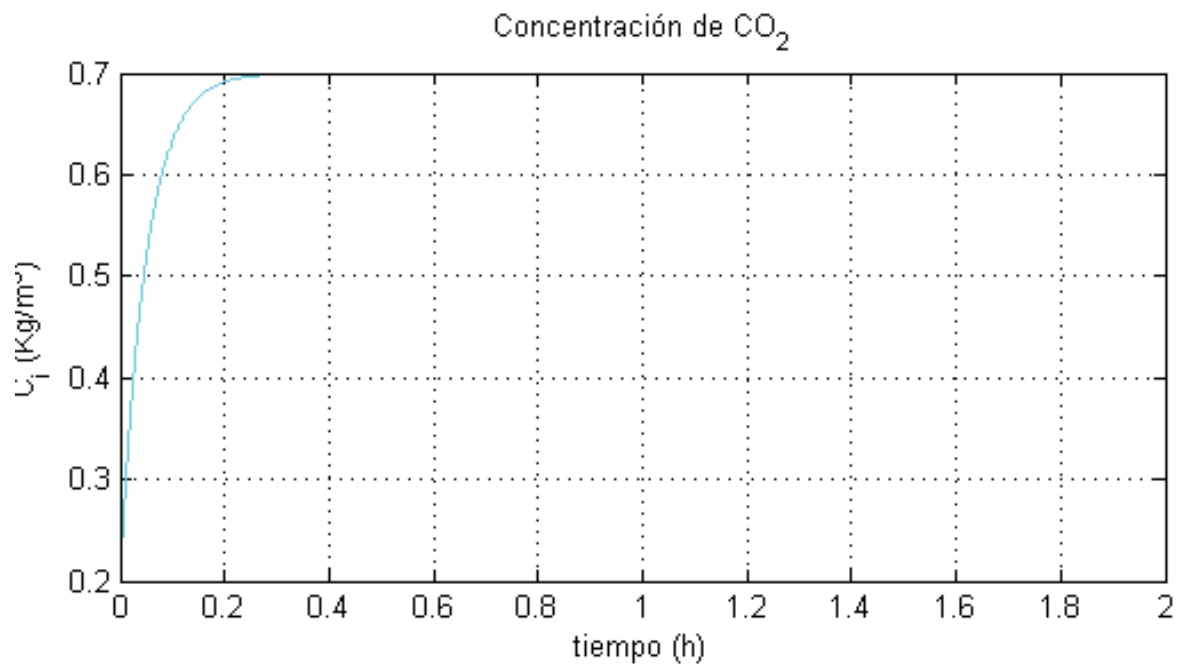


Figura 3.14: Efecto de la radiación solar sobre  $C_i$ .

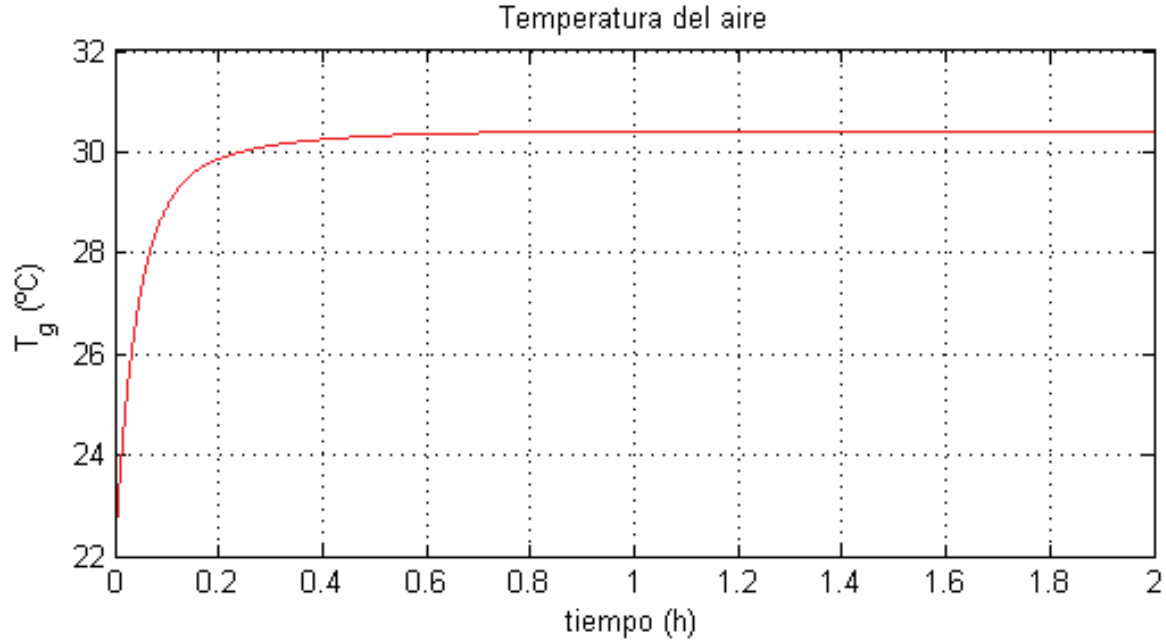


Figura 3.12: Efecto de la radiación solar sobre T<sub>g</sub>.

### Concentración de CO<sub>2</sub>, C<sub>o</sub>

Para esta prueba se consideró un aumento en la concentración de CO<sub>2</sub> del medio ambiente hasta 1 ( $\frac{Kg}{m^3}$ ), podemos apreciar en la figura que no provocó cambio alguno en el desempeño del sistema, pues el valor de CO<sub>2</sub> dentro del invernadero se estabiliza al valor del exterior, mientras que las demás variables no sufrieron cambios. Las figuras de la 3.16 a la 3.19 muestran los resultados.



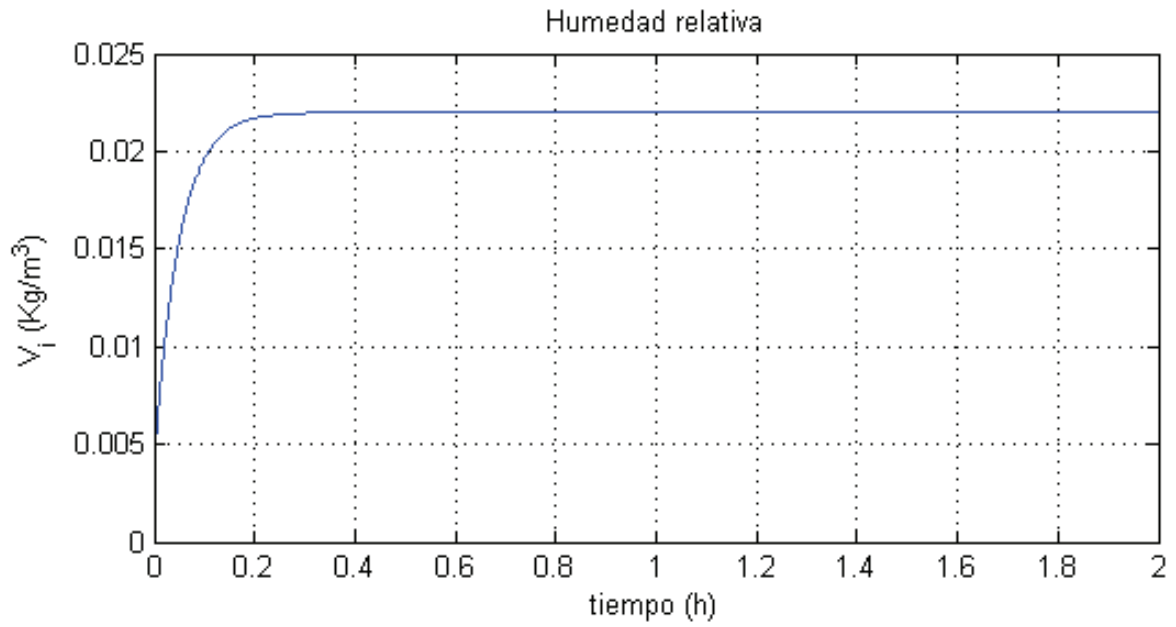


Figura 3.15: Efecto de la radiación solar sobre  $V_i$ .

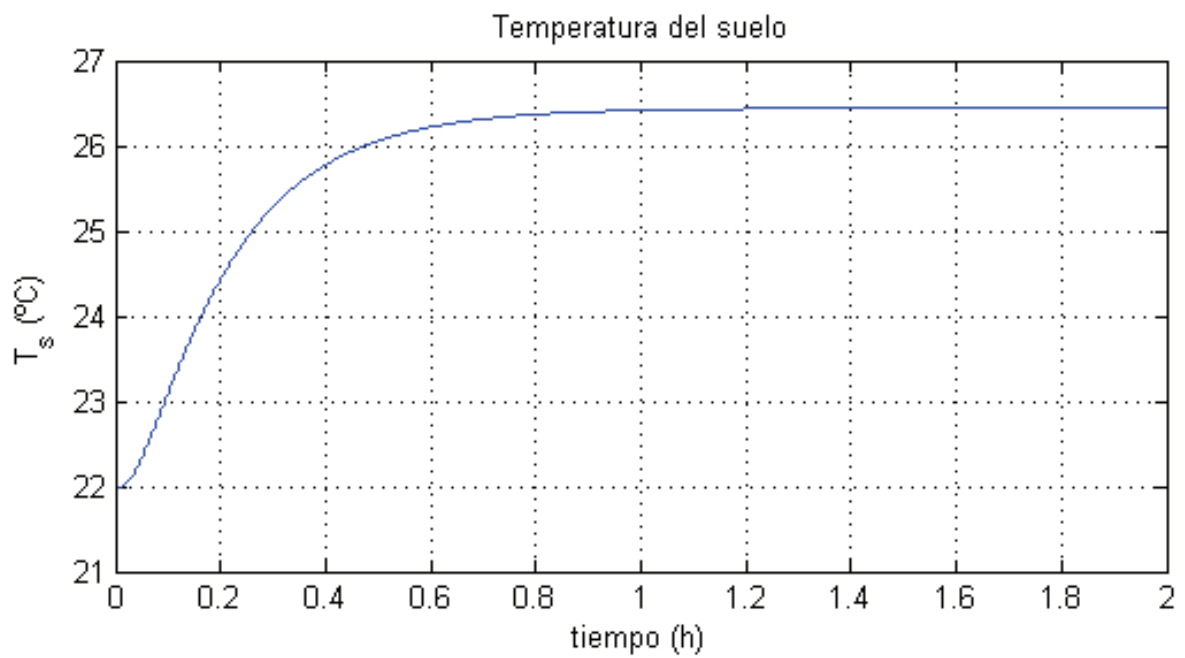


Figura 3.17: Efecto de la concentración de  $\text{CO}_2$  sobre  $T_s$ .

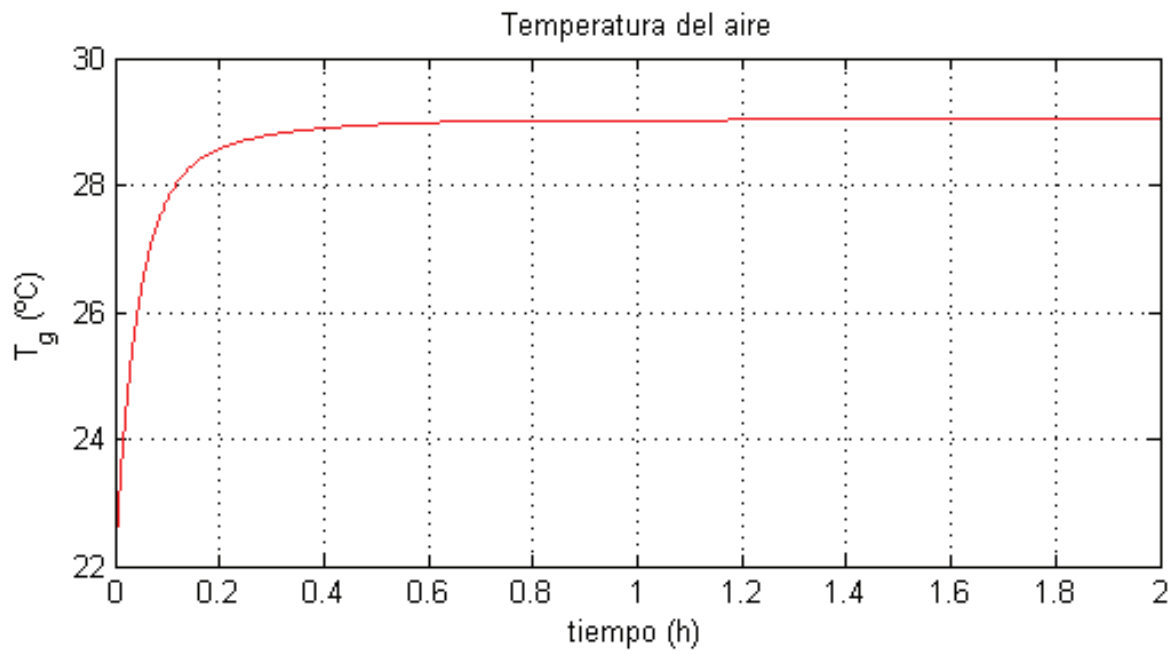


Figura 3.16: Efecto de la concentración de  $\text{CO}_2$  sobre  $T_g$ .

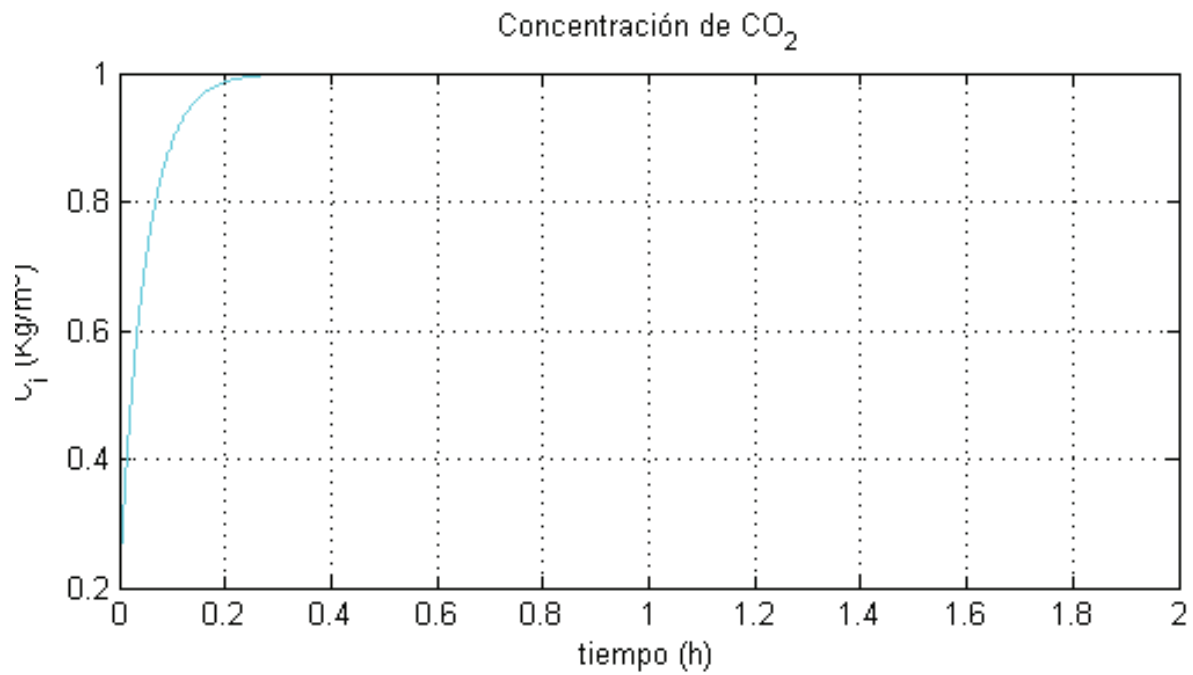


Figura 3.18: Efecto de la concentración de  $\text{CO}_2$  sobre  $C_i$ .

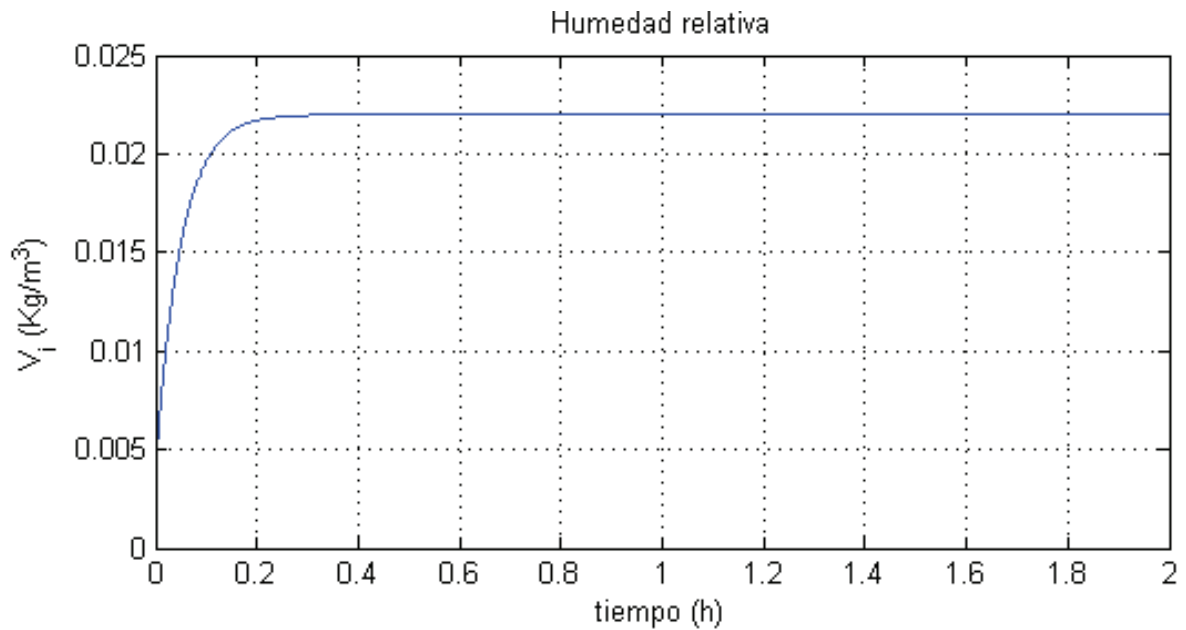


Figura 3.19: Efecto de la concentración de  $\text{CO}_2$  sobre  $V_i$ .

### **Humedad relativa.**

En las figuras 3.20 a la 3.23 se muestran los resultados de la simulación representando un aumento en la humedad relativa del exterior. El efecto de la diferencia de concentración de vapor de agua entre el ambiente y el invernadero causa un descenso de temperatura del aire de este último. Este efecto es causado por las modificaciones que Iga realizó al modelo de Tap. Este efecto se puede explicar por medio de la carta psicrométrica. Recordando que una mezcla de aire y vapor que se encuentre en un estado no saturado, puede pasar a un estado saturado al variar la temperatura o variar la presión parcial del vapor de agua, sin embargo en este caso la saturación es ocasionada por la diferencia de humedades entre el exterior y el interior del invernadero, como causa del equilibrio que busca tener el sistema existe una disminución en la temperatura del aire del invernadero.

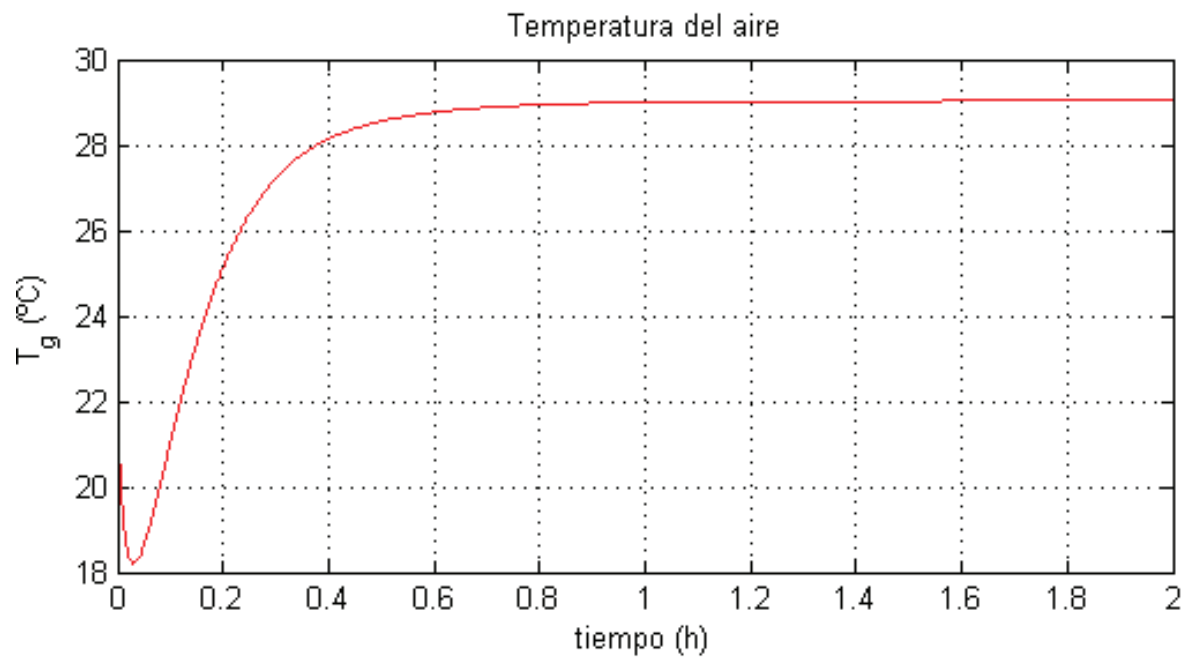


Figura 3.20: Efecto de la humedad relativa sobre  $T_g$

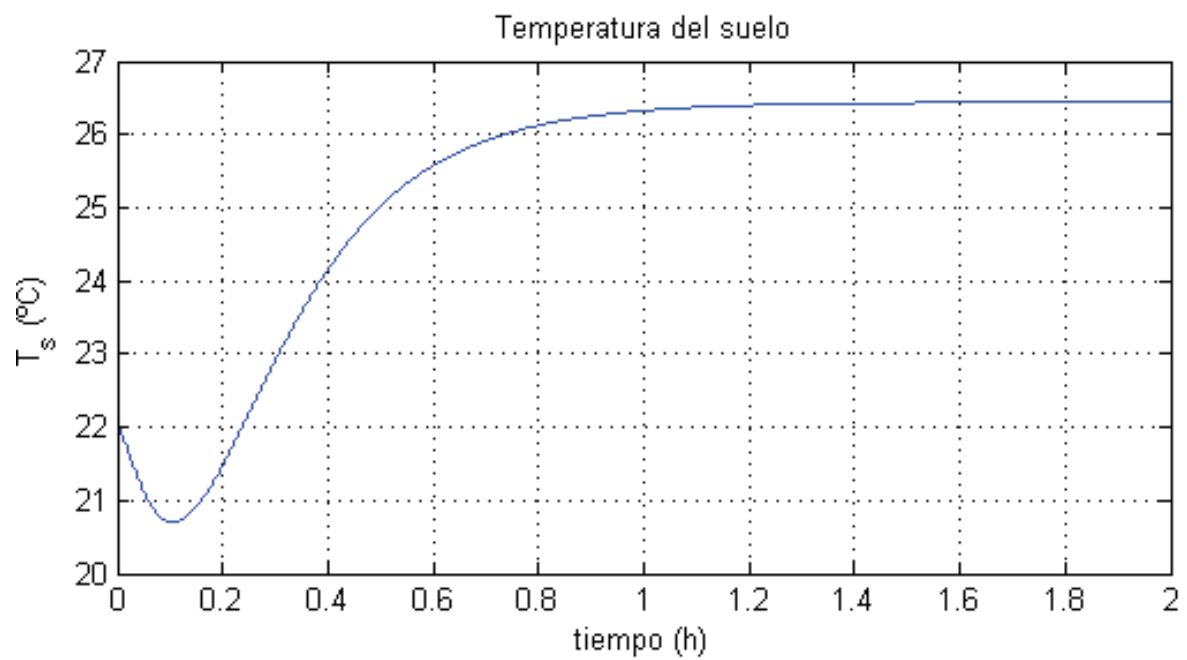


Figura 3.21: Efecto de la humedad relativa sobre  $T_s$

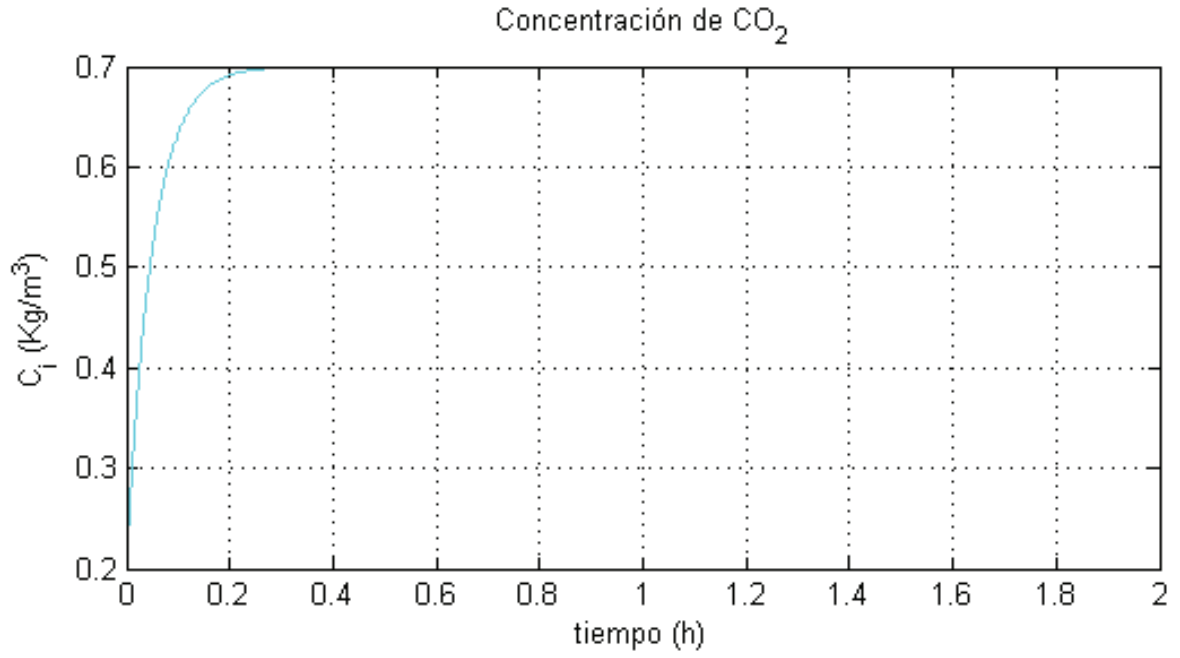


Figura 3.22: Efecto de la humedad relativa sobre Ci

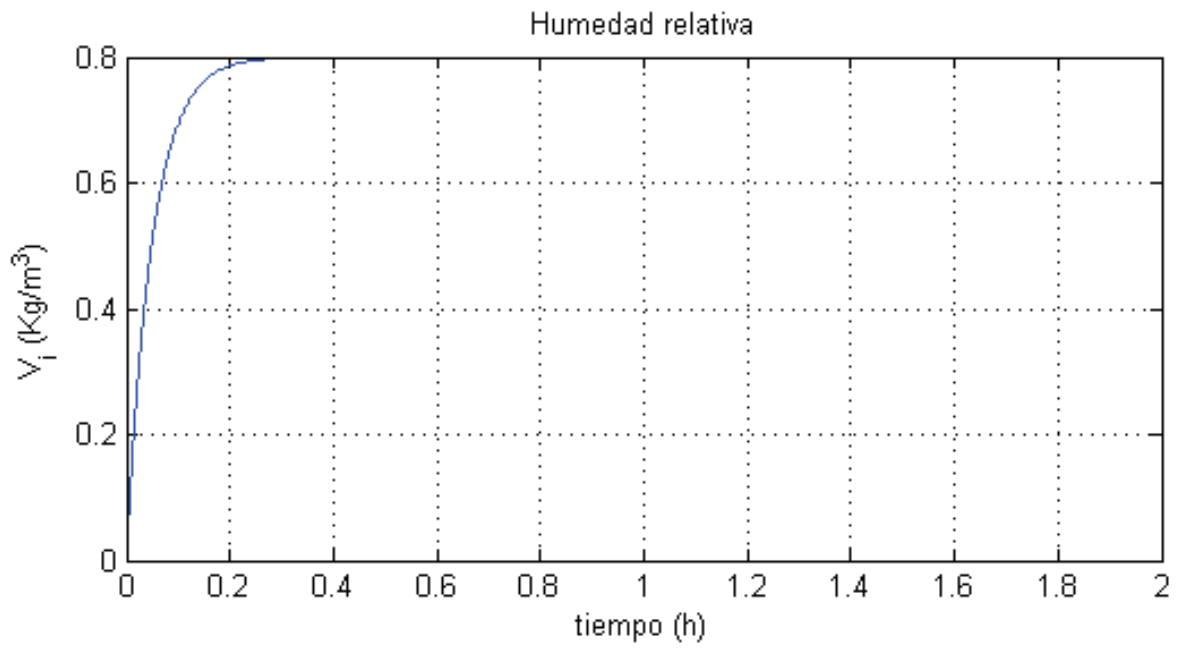


Figura 3.23: Efecto de la humedad relativa sobre Vi

### Velocidad del viento, $w$ .

Tal como se aprecia en las figuras de la 3.24 a la 3.27, un aumento en la velocidad del viento de 7 a 15 ( $\frac{m}{s}$ ), tiene un efecto en el tiempo de estabilización del sistema, tanto la temperatura del aire, la concentración de dióxido de carbono y la humedad relativa se estabilizan más rápido, por ejemplo la temperatura del aire del invernadero alcanza su valor final en 0.4 (h), mientras que en la prueba de referencia se estabiliza en 0.8 (h). El segundo efecto es sólo en el valor final de la temperatura del aire, pues es menor respecto a la que se alcanza en la prueba de referencia, existiendo una diferencia de 1 ( $^{\circ}C$ ) entre éstas.

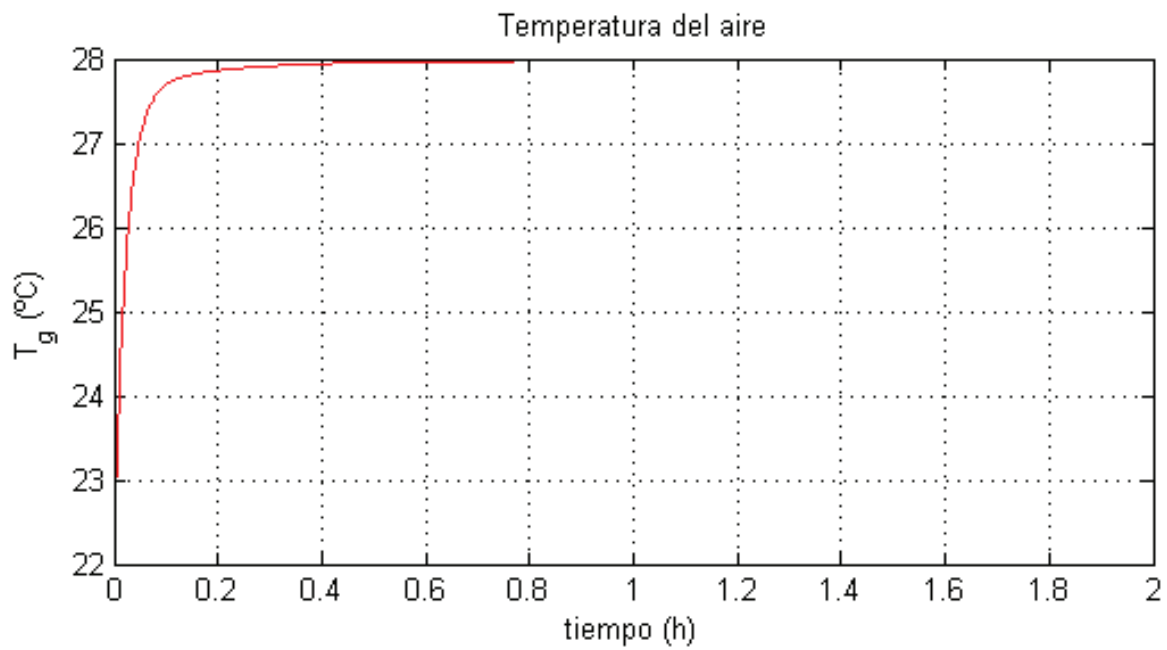


Figura 3.24: Efecto de la velocidad del viento sobre  $T_g$ .

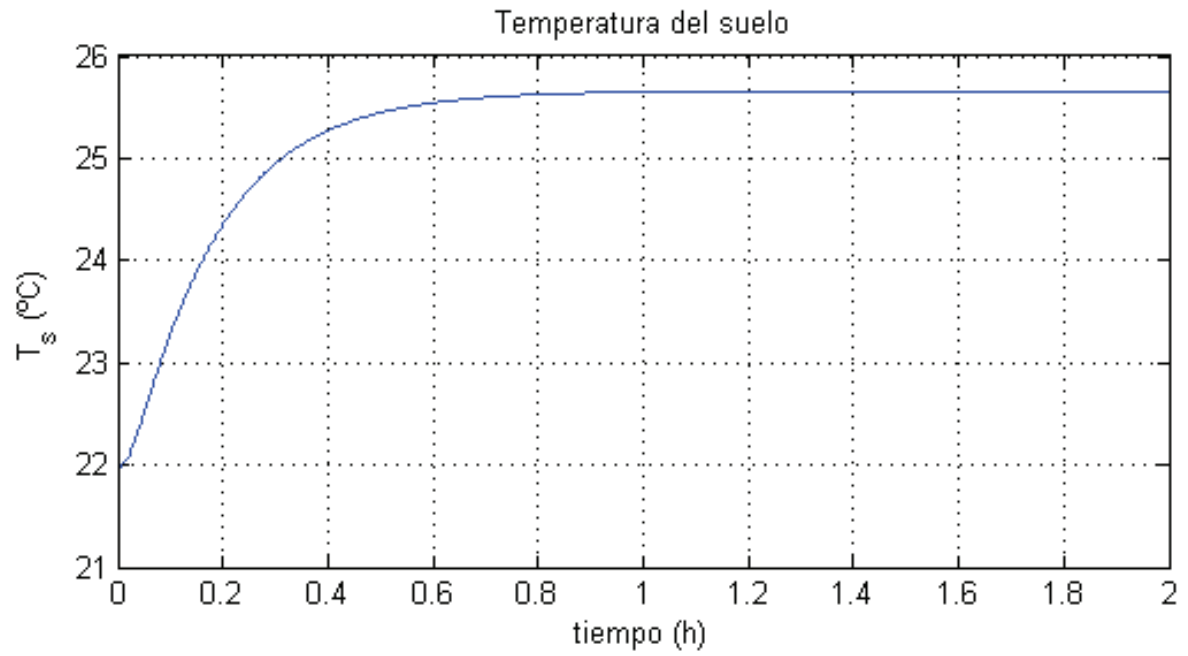


Figura 3.25: Efecto de la velocidad del viento sobre  $T_s$ .

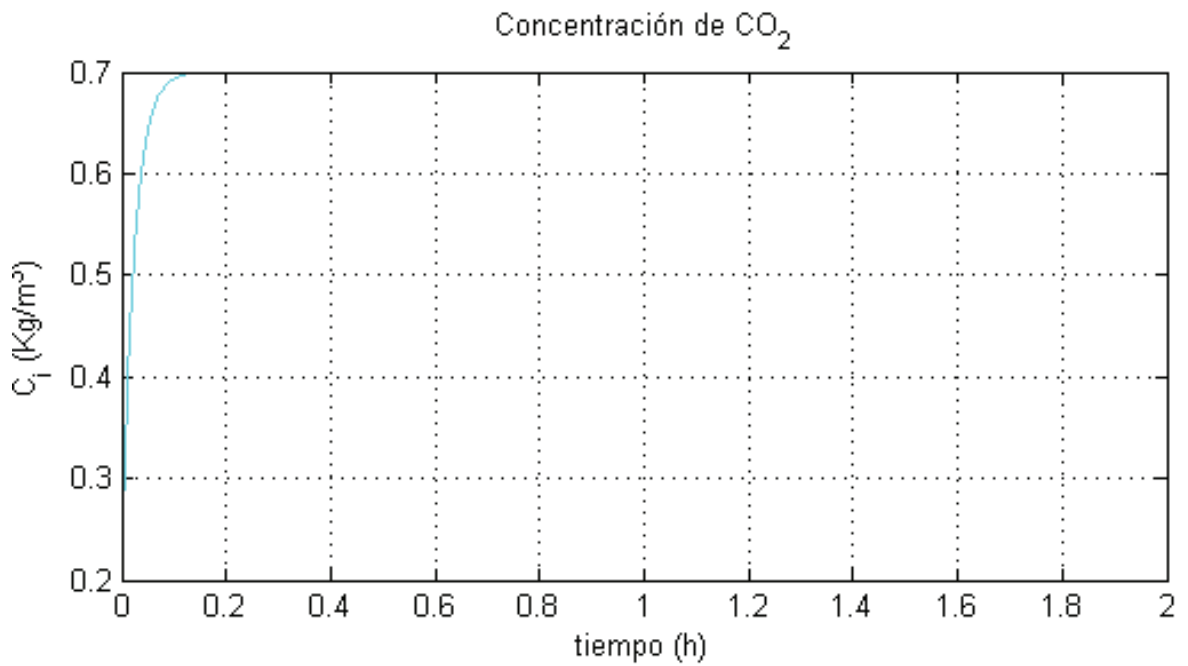


Figura 3.26: Efecto de la velocidad del viento sobre  $C_i$ .

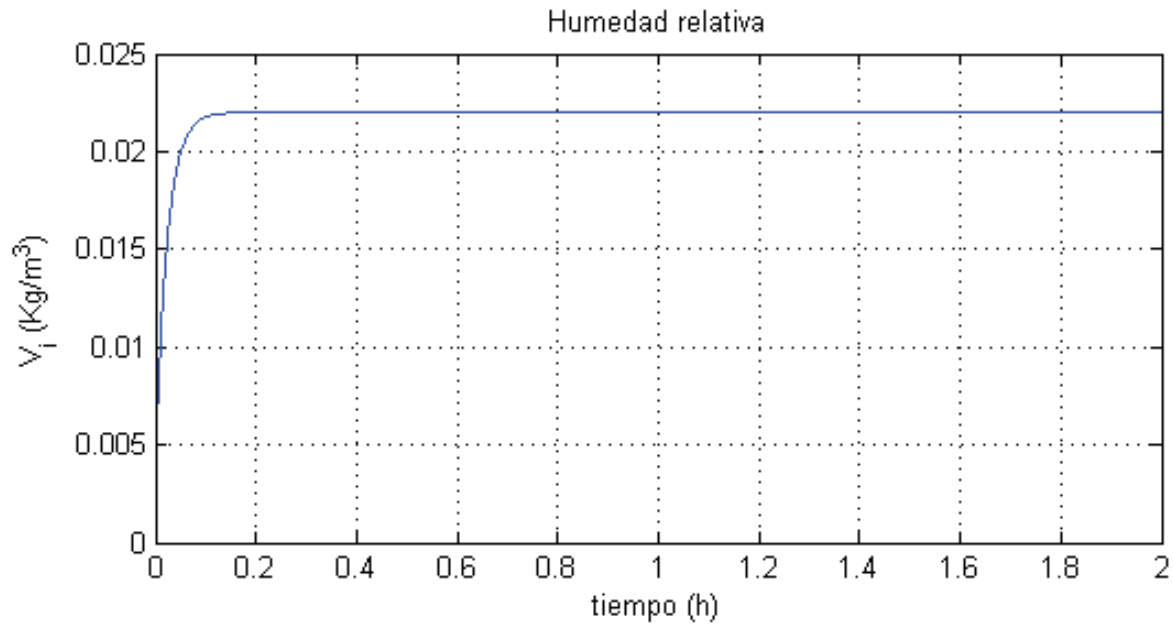


Figura 3.27: Efecto de la velocidad del viento sobre  $V_i$ .

### Aperturas de las ventanas.

La apertura de las ventanas se simuló en el 12 % y en comparación con la prueba de referencia en la que se tenían abiertas al 100 % se aprecia que la temperatura en la que se estabiliza el interior del invernadero es de 34 (°C), lo cual representa un aumento con respecto a la simulación de referencia en la que se estabilizó en 29 (°C), por otro lado el tiempo de asentamiento de todas las variables sufrieron un aumento. Lo anterior se puede apreciar en las figuras de la 3.28 a la 3.31.



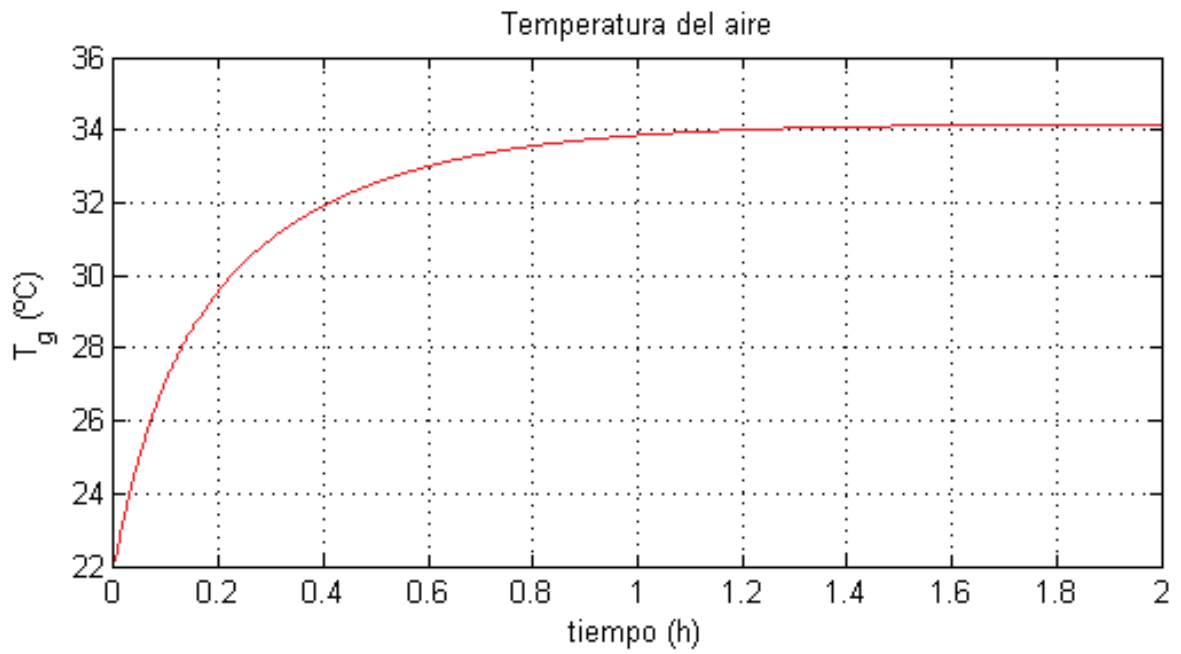


Figura 3.28: Efecto de la apertura de las ventanas sobre  $T_g$ .

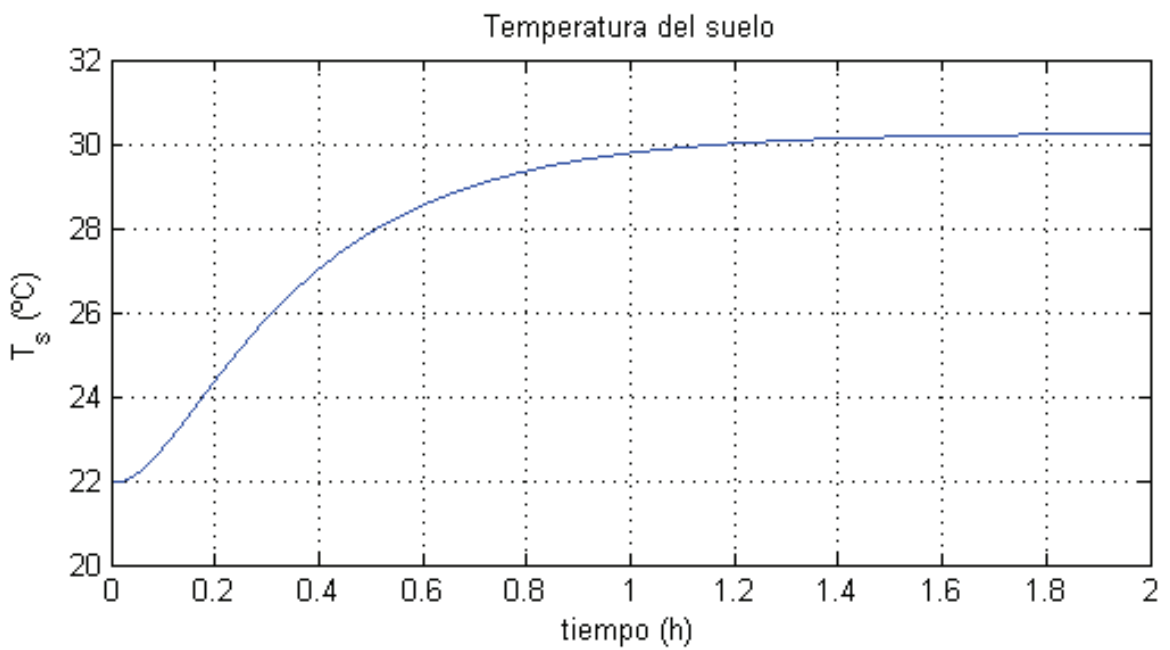


Figura 3.29: Efecto de la apertura de las ventanas sobre  $T_s$ .

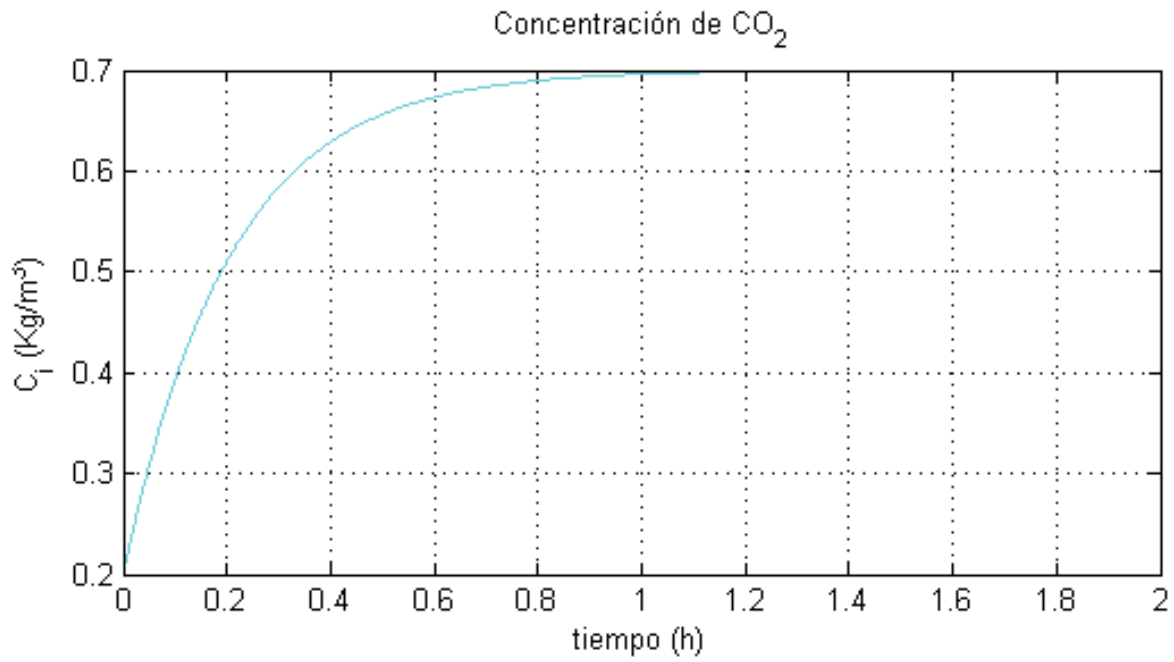


Figura 3.30: Efecto de la apertura de las ventanas sobre Ci.

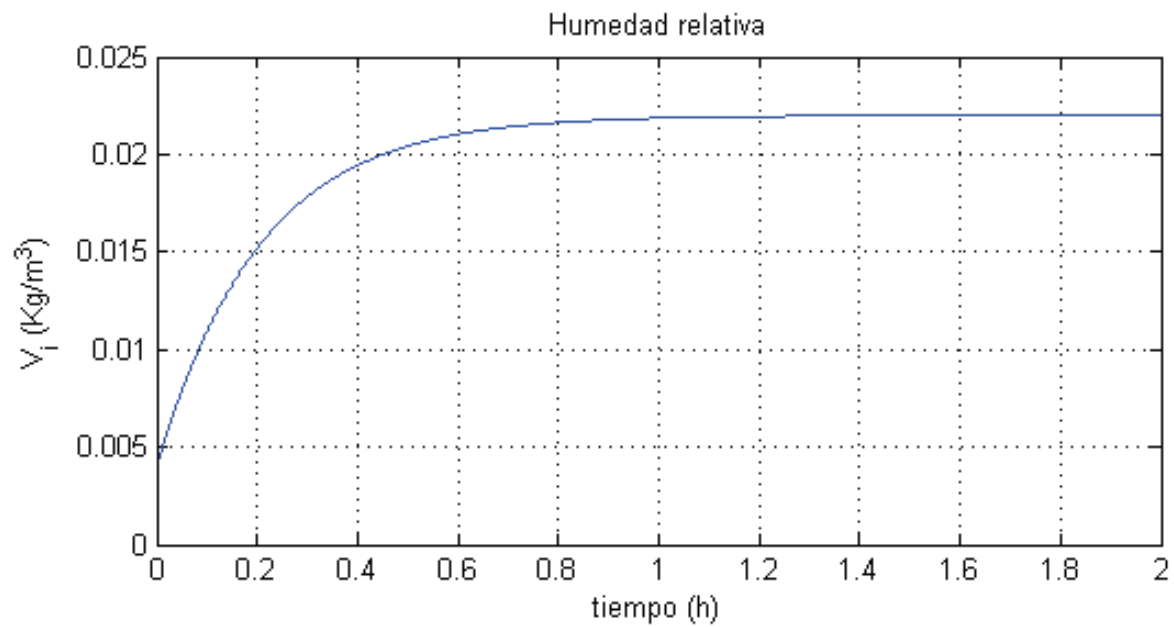


Figura 3.31: Efecto de la apertura de las ventanas sobre Vi.

Se resumen los resultados de las simulaciones anteriores en el cuadro 3.5.1.

Cuadro 3.5.1: Resultados de las simulaciones para el invernadero.

Variación	$T_g(^{\circ}\text{C})$	$T_s(^{\circ}\text{C})$	$C_i(\text{Kg}/\text{m}^3)$	$V_i(\text{Kg}/\text{m}^3)$
$T_o$	34	30	0.7	0.023
$G$	30.5	27.5	0.7	0.023
$C_o$	29	26.5	1	0.023
$V_o$	29	26.5	0.7	0.8
$w$	28	25.7	0.7	0.023
$r_{ww}, r_{wl}$	34	30	0.7	0.023

### 3.6. Simulaciones del cultivo.

En la figura 3.32 se muestran los resultados de las simulaciones realizadas con el modelo lineal del cultivo.

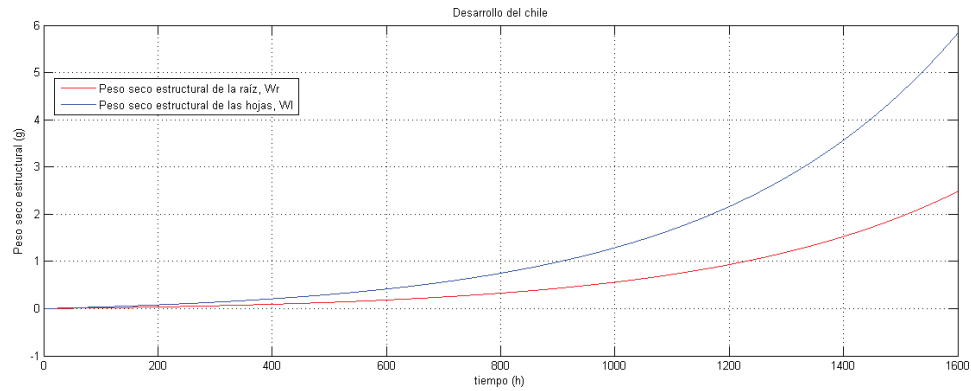
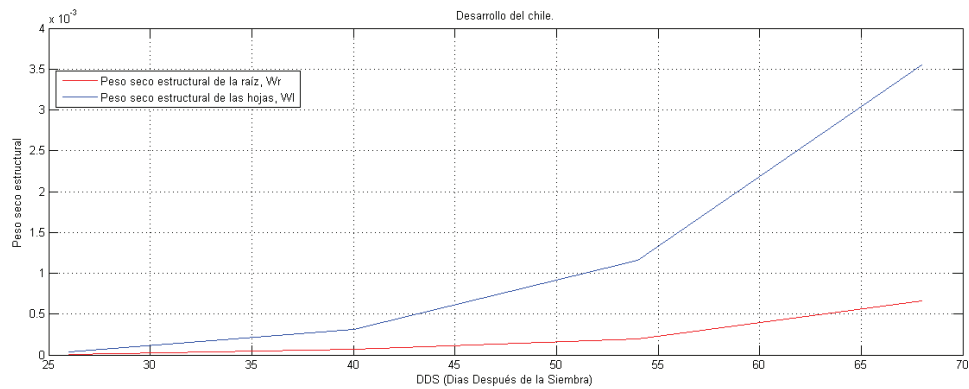


Figura 3.32: Temperatura del aire del invernadero con cultivo.

En la figura se muestran los datos experimentales obtenidos por Azofeifa y Moreira (2004).



Cuadro 3.6.1: Datos experimentales obtenidos por Azofeifa y Moreira (2004).

### 3.7. Análisis de los resultados obtenidos.

Cada variable externa afecta de manera directa al clima interno del invernadero, algunos de los resultados obtenidos son un tanto triviales, por ejemplo es obvio que al existir un aumento en la concentración de  $\text{CO}_2$  o de vapor de agua en el ambiente existirá un aumento en las concentración interna, sin embargo se aprecia que cualquier modificación que estos valores tengan afectará directamente a la temperatura del aire dentro del invernadero y como consecuencia a las demás variables de estado. Por otro lado se hace notoria la importancia del sistema de ventilación, pues de manera simple se pueden modificar las condiciones internas en función de la apertura de las ventanas. El sistema de ventilación varía mucho con la estructura o tipo de invernadero, esto nos indica que aunque en el modelo presentado se modelaron los principales procesos térmicos, cada tipo de invernadero debe ser modelado tomando en cuenta sus peculiaridades. Las simulaciones del modelo del cultivo y la gráfica de los datos experimentales se comportan de manera similar, podríamos decir que la dinámica del sistema si es representado por el modelo propuesto, sin embargo los valores finales varían, esta variación es resultado de la simplificación de considerar a la derivada como simples incrementos.

## Capítulo 4

# Conclusiones y trabajos a futuro.

Se realizó una amplia investigación sobre los modelos de invernaderos y hortalizas, con lo cual se cumplió el objetivo de documentar los modelos de invernaderos existentes en la literatura. Para tener el modelo del invernadero vacío se tomó como base uno de los más importantes debido a su amplio uso y diversas contribuciones y modificaciones que lo han mejorado.

Analizando los resultados obtenidos se aprecia que el modelo propuesto para el invernadero vacío describe la dinámica del sistema, los valores numéricos coinciden en la simulación y en los cálculos; los resultados tienen interpretación física. La validez del modelo está condicionada a comparar los datos medidos en un invernadero y compararlos con los que se calculen con el modelo; para lo cual se requiere un espacio de trabajo (un invernadero) y herramientas de adquisición de datos para ingresar los valores de las condiciones ambientales externas, las cuales son variables a diferencia de las simulaciones donde se consideraron como entradas constantes.

El modelo propuesto para chile jalapeño es una primera aproximación, para obtener un modelo con mejores características se requiere de conocimientos muy específicos sobre el desarrollo de hortalizas, se debe trabajar en el desarrollo de un modelo que sea adecuado para los objetivos de control, para lo cual es necesario un equipo de trabajo que sea conformado por expertos en horticultura (modelado) y de ingenieros que comprendan cuales son los requerimientos de un modelo para fines de control; también es necesario un especialista en el campo de control óptimo para poder generar la funciones de costo, continuando así con un desarrollo nuevo en el campo de control de invernaderos en México. Es importante señalar que los datos que se utilizaron para generar el modelo propuesto fueron obtenidos de un experimento cuyo objetivo era cuantificar el crecimiento del chile a cielo abierto (con cantidades

de fertilizante y nutrientes abundantes), por lo cual es necesario replantear este modelo con datos que se obtengan de un experimento en condiciones de invernadero. Por lo tanto el objetivo referente al modelo del chile jalapeño se cumplió dentro del alcance de conocimientos teóricos del autor del presente trabajo.

Con las simulaciones realizamos un análisis del sistema acerca de sus características en estado estable, información que siempre es valiosa, sin embargo debido a la falta de equipo, no se realizó una comparación de datos obtenidos de mediciones directas en un invernadero y lo que el modelo calcula. Para realizar esto será necesario instrumentar un invernadero y obtener una discretización del modelo, lo cual es muy accesible de realizar en el entorno de LabVIEW, cumpliendo así con el objetivo relacionado con la simulación e iniciando una línea de desarrollo utilizando uno de los paquetes de computo que está ganado campo no solo en proyectos académicos sino que también en aplicaciones prácticas debido a su nivel de integración y diversos dispositivos de adquisición de datos; además que debido a que se separaron en subVI's los modelos del invernadero y del chile, sólo se requiere modificar el VI correspondiente para las mejoras que se realicen a futuro, incluso se puede simular otro cultivo cambiando únicamente el subVI correspondiente.

# ANEXOS.

# Modelado del chile jalapeño a partir de datos experimentales.

Tomando como referencia los datos experimentales de Azofeifa y Moreira (2004) se realizó la obtención del siguiente modelo en variables de estado para el cultivo del chile jalapeño, siendo éste una primera aproximación.

---

## Datos experimentales:

```
 $\phi_{\text{mayo}} = 0.86;$   
 $\phi_{\text{junio}} = 0.87;$   
 $\phi_{\text{julio}} = 0.84;$   
 $\phi_{\text{agosto}} = 0.89;$   
 $T_{\text{mayo}} = 23.1;$   
 $T_{\text{junio}} = 23.1;$   
 $T_{\text{julio}} = 22.9;$   
 $T_{\text{agosto}} = 22.4;$   
 $W_{r0} = 0;$   
 $W_{r1} = 0.000002;$   
 $W_{r2} = 0.000074;$   
 $W_{r3} = 0.000197;$   
 $W_{r4} = 0.000332;$   
 $W_{l0} = 0;$   
 $W_{l1} = 0.00004;$   
 $W_{l2} = 0.00031;$   
 $W_{l3} = 0.00116;$   
 $W_{l4} = 0.00355;$ 
```

---

## Ambiente

```
 $P_m = 101.325;$   
 $M_{air} = 1.29;$ 
```



## Conversión de la humedad relativa.

$$P_{g\text{mayo}} = 2.827;$$

(\*De tablas de vapor saturado a una temperatura de  $T_{\text{mato}}=23.1^{\circ}\text{C}$ \*)

$$P_{v\text{mayo}} = \phi_{\text{mayo}} * P_{g\text{mayo}};$$

$$\omega_{\text{mayo}} = 0.622 * \left( \frac{P_{v\text{mayo}}}{P_m - P_{v\text{mayo}}} \right);$$

$$V_{i1} = \omega_{\text{mayo}} * M_{\text{air}};$$

$$P_{g\text{junio}} = 2.827;$$

(\*De tablas de vapor saturado a una temperatura de  $T_{\text{mato}}=23.1^{\circ}\text{C}$ \*)

$$P_{v\text{junio}} = \phi_{\text{junio}} * P_{g\text{junio}};$$

$$\omega_{\text{junio}} = 0.622 * \left( \frac{P_{v\text{junio}}}{P_m - P_{v\text{junio}}} \right);$$

$$V_{i2} = \omega_{\text{junio}} * M_{\text{air}};$$

$$P_{g\text{julio}} = 2.793;$$

(\*De tablas de vapor saturado a una temperatura de  $T_{\text{mato}}=22.9^{\circ}\text{C}$ \*)

$$P_{v\text{julio}} = \phi_{\text{julio}} * P_{g\text{julio}};$$

$$\omega_{\text{julio}} = 0.622 * \left( \frac{P_{v\text{julio}}}{P_m - P_{v\text{julio}}} \right);$$

$$V_{i3} = \omega_{\text{julio}} * M_{\text{air}};$$

$$P_{g\text{agosto}} = 2.71;$$

(\*De tablas de vapor saturado a una temperatura de  $T_{\text{mato}}=22.4^{\circ}\text{C}$ \*)

$$P_{v\text{agosto}} = \phi_{\text{agosto}} * P_{g\text{agosto}};$$

$$\omega_{\text{agosto}} = 0.622 * \left( \frac{P_{v\text{agosto}}}{P_m - P_{v\text{agosto}}} \right);$$

$$V_{i4} = \omega_{\text{agosto}} * M_{\text{air}};$$

$V_{i1}$

$V_{i2}$

$V_{i3}$

$V_{i4}$

0.0197258

0.0199609

0.019019

0.0195653

## Formación de la ecuación de estados

```

ΔWr1 = Wr1 - Wr0;
ΔWr2 = Wr2 - Wr1;
ΔWr3 = Wr3 - Wr2;
ΔWr4 = Wr4 - Wr3;
Δt1 = (26 - 0) * 24; (*Días después de la siembra en horas*)
Δt2 = (40 - 26) * 24;
Δt3 = (54 - 40) * 24;
Δt4 = (68 - 54) * 24;
rhs1 = ΔWr1 / Δt1;
rhs2 = ΔWr2 / Δt2;
rhs3 = ΔWr3 / Δt3;
rhs4 = ΔWr4 / Δt4;
ec1 = rhs1 == a * T_mayo + b * Vi1 + c * Wr1;
ec2 = rhs2 == a * T_junio + b * Vi2 + c * Wr2;
ec3 = rhs3 == a * T_julio + b * Vi3 + c * Wr3;
(*ec4=rhs4==a*T_agosto+b*Vi4+c*Wr4+d*Wl4;*)
coe1 = Solve[{
  ec1,
  ec2,
  ec3
}];
ΔWl1 = Wl1 - Wl0;
ΔWl2 = Wl2 - Wl1;
ΔWl3 = Wl3 - Wl2;
ΔWl4 = Wl4 - Wl3;
rhs1a = ΔWl1 / Δt1;
rhs2a = ΔWl2 / Δt2;
rhs3a = ΔWl3 / Δt3;
rhs4a = ΔWl4 / Δt4;
ec1a = rhs1a == e * T_mayo + f * Vi1 + g * Wl1;
ec2a = rhs2a == e * T_junio + f * Vi2 + g * Wl2;
ec3a = rhs3a == e * T_julio + f * Vi3 + g * Wl3;
(*ec4a=rhs4a==e*T_agosto+f*Vi4+g*Wl4+h*Wr4;*)
coe2 = Solve[{
  ec1a,
  ec2a,
  ec3a
}];
coe1
coe2

{{a → -1.52124 × 10-7, b → 0.000178069, c → 0.00235029}}
{{e → -3.41567 × 10-7, f → 0.000398392, g → 0.00239191}}

```

stop  
**STOP**

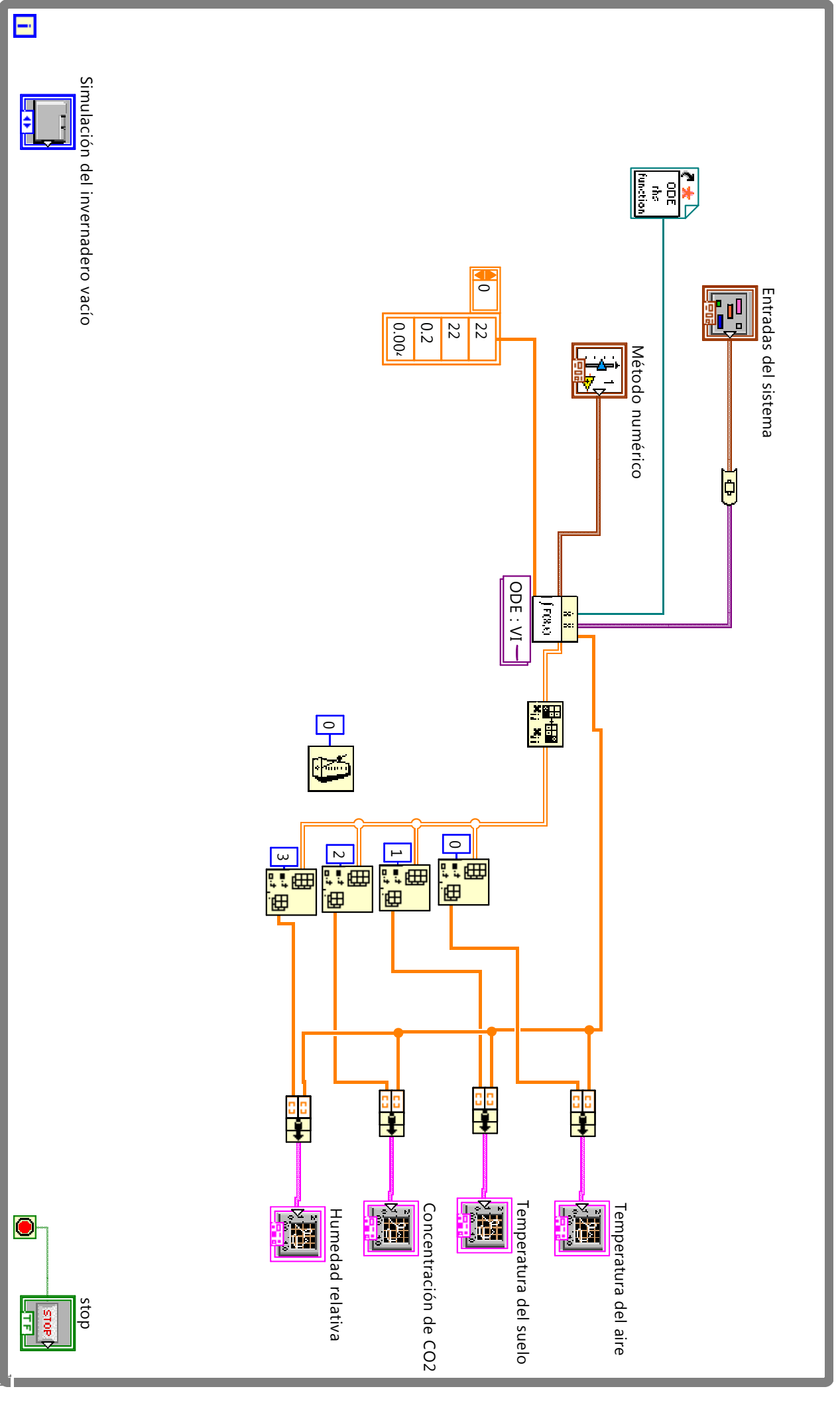
Configuración de parámetros **Tg** **Ts** **Ci** **Vi**

Método numérico

Initial Time	<input type="text" value="0"/>	Final Time	<input type="text" value="10"/>
Continuous Solver	Runge-Kutta 45 (variable)		
Time Step	<input type="text" value="0.1"/>	Initial Time	<input type="text" value="0.01"/>
Minimum Time Step	<input type="text" value="1E-8"/>	Maximum Time Step	<input type="text" value="1"/>
Absolute Tolerance	<input type="text" value="0.001"/>	Relative Tolerance	<input type="text" value="0.001"/>
Discrete Time Step	<input type="text" value="1"/>		

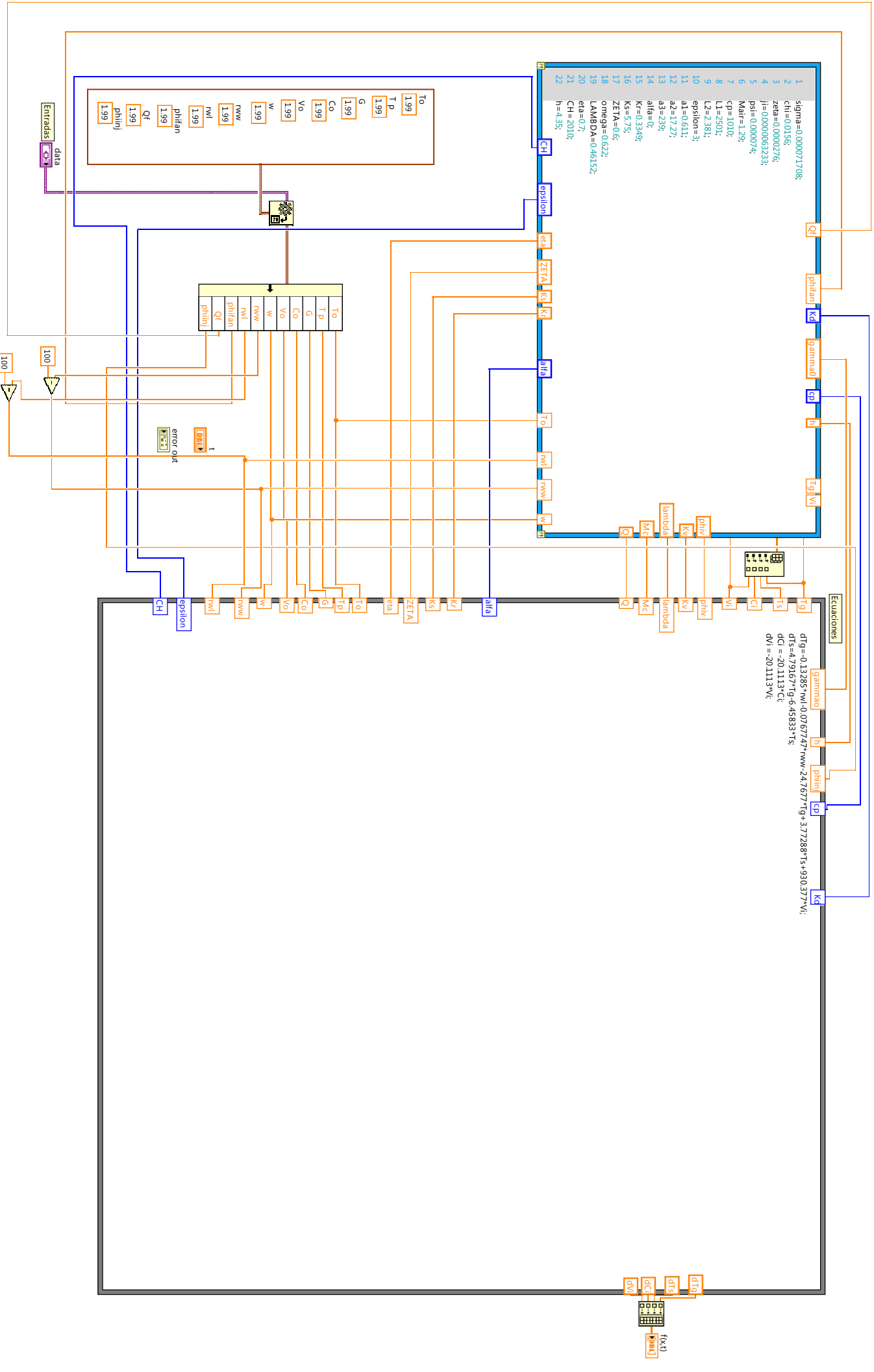
Entradas del sistema

Condiciones del ambiente:		Variables de control:	
To	<input type="text" value="0"/>	Tp	<input type="text" value="0"/>
G	<input type="text" value="0"/>	rww	<input type="text" value="0"/>
Co	<input type="text" value="0"/>	rwl	<input type="text" value="0"/>
Vo	<input type="text" value="0"/>	phifan	<input type="text" value="0"/>
w	<input type="text" value="0"/>	Qf	<input type="text" value="0"/>
	<input type="text" value="0"/>	phiinj	<input type="text" value="0"/>



Simulación del invernadero vacío







# Bibliografía

- Alpi, A. (1994). *Cultivo en invernadero: actual orientación científica y técnica*. Mundi-Prensa.
- Azofeifa, A. & Moreira, M. A. (2004). Análisis de crecimiento del chile jalapeño (*capsicum annum* l. cv. hot), en alajuela, costa rica. *Agronomía Costarricense*, 28(001), 57–67.
- Bot, G. P. A. (1983). *Greenhouse climate: from physical process to a dynamic model*. PhD thesis, Landbouwhogeschool.
- Cárdenas, D. H. (2010). *Diseno de un invernadero para la producción de chile manzano (capsicum pubescens r. y p.) en el municipio de tenancingo, estado de méxico*. PhD thesis, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM.
- García, J. A. S. & Nava, R. J. P. (2009). El chile jalapeño: Su cultivo de temporal en quintanaroo. Campo de investigación Regional Sureste, Campo Experimental Chetumal.
- Iga, J. L. (2006). Modelado del clima en invernaderos: Respuesta de la temperatura a cambios de humedad. *Ingenierías*, IX(33), 7–13.
- Nuez, F. V., Gil, R. O., & Costa, J. C. G. (1995). *El cultivo de pimientos, chiles y ajíes*. Mundi-Prensa.
- Parada, J. D. G. (2010). *Plan municipal de desarrollo rural sustentable, Concepción Papalo, Cuicatlan, Oaxaca*. Gobierno del Estado de Oaxaca.
- Revels, M. H., Huchín, S. A., Velasquez, R. V., Trejo, R. C., & Ruiz, J. T. (2010). Producción de plátula de chile en invernadero. Campo Experimental Valle del Guadiana, CIRNOC-INIFAP.
- Tap, F. (2000). *Economics-based optimal contro of greenhouse tomato crop production*. PhD thesis, Wageningen Agricultural University.l.

Tchamitchian, M. (1992). *Short term dynamic optimal control of the greenhouse climate*. PhD thesis, Wageningen Agricultural University.

ten Cate Udink, A. J. (1983). *Modeling and (adaptative) control of greenhouse climate*. PhD thesis, Wageningen Agricultural University.

van Henten, E. J. (1994). *Greenhouse climate management: an optimal control approach*. PhD thesis, Institute of Agricultural and Environmental Engineering.