



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

“Enseñar la explotación de la
tierra, no la del hombre”

MODELO DINÁMICO PARA LA TEMPERATURA Y HUMEDAD DE UN INVERNADERO

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO
DE: MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL
DEL AGUA

PRESENTA:

Ing. CAMACHO GARCÍA CARLOS ALBERTO

DIRECTOR:

Dr. IRINEO L. LÓPEZ CRUZ.

Chapingo, México. Noviembre de 2005.



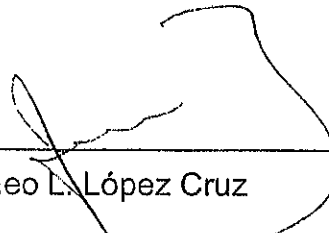
MODELO DINÁMICO PARA LA TEMPERATURA Y HUMEDAD DE UN INVERNADERO.

Tesis realizada por Carlos Alberto Camacho García, bajo la dirección del comité asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

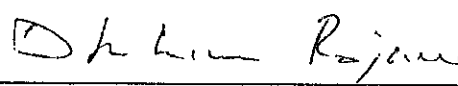
MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

COMITÉ ASESOR:

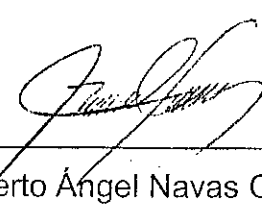
DIRECTOR:


Dr. Irineo L. López Cruz

ASESOR:


Dr. Abraham Rojano Aguilar

ASESOR:


Dr. Gilberto Ángel Navas Gómez



Chapingo, México, Diciembre de 2005.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo, en especial al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua de los Departamentos de Irrigación e Ingeniería Mecánica Agrícola, mi mas sincero agradecimiento por otorgarme el apoyo necesario para la realización de mis estudios de maestría.

Al Dr. Irineo López Cruz quien me motivo en cada momento, y fue fundamental para la realización de este trabajo.

Al Dr. Eugenio Romanchick Kriuchkova por su valioso apoyo.

Con admiración y respeto, a los profesores:

Dr. Abraham Rojano Aguilar.

Dr. Gilberto A. Navas Gómez.

A todos mis amigos del Posgrado con quienes compartí momentos inolvidables.

DATOS BIOGRÁFICOS

El autor es egresado del departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo. Originario de Cintalapa Chiapas.

Como experiencia profesional he tenido prácticas profesionales de maquinaria agrícola en la universidad Agraria de la Habana, Cuba, en el Grupo ABBA (reciclaje de basura), Berlín, Alemania, prácticas sobre reparación y administración de maquinaria en el GESTA, Habana, Cuba (febrero del 2002), como expositor en el taller internacional de modelación, Universidad Autónoma Chapingo.

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fluido frío que se desplaza en convección forzada.	8
Figura 2. Esquema del modelo de variables características del aire conocidas las del resto de elementos.	23
Figura 3. Orientación del invernadero donde se realizó el muestreo de datos.	38
Figura 4. Invernadero del campo Tlapeaxco, Chapingo.	39
Figura 5. Variables de entrada del modelo de Temperatura y Humedad.	40
Figura 6. Temperatura y Humedad relativa interna observada.	41
Figura 7. Humedad absoluta exterior calculada.	41
Figura 8. Humedad absoluta interior observada.	41
Figura 9. Variables de entrada del modelo de Temperatura y Humedad del mes de mayo del 2004 (conjunto de datos de validación).	42
Figura 10. Predicción del modelo de Temperatura antes de la calibración.	56
Figura 11. Regresión lineal de la Temperatura observada y la estimada.	57
Figura 12. Predicción del modelo de la Humedad relativa antes de la calibración.	58
Figura 13. Regresión lineal de la Humedad relativa observada y la estimada antes de la calibración.	59
Figura 14. Simulación de la Humedad absoluta antes de la calibración.	60
Figura 15. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto al área del invernadero (Acl).	62
Figura 16. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto al coeficiente de conductividad térmica del suelo (α_{cl}).	62
Figura 17. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto al factor de calor absorbido por el suelo (α_m).	63
Figura 18. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con	63

respecto a la capacidad de calor del suelo (C_s).

Figura 19. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto al coeficiente de transmisión del invernadero (ε). 64

Figura 20. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto a la energía de vaporización del agua (φ). 64

Figura 21. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto a la constante psicrométrica (γ). 65

Figura 22. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto a la conductancia de la capa límite (gwb). 65

Figura 23. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto a la conductancia estomática máxima ($gws_{\max}$). 66

Figura 24. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto a la conductancia estomática mínima ($gws_{\min}$). 66

Figura 25. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto al parámetro de la tasa de ventilación (κ). 67

Figura 26. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto al coeficiente de transferencia de calor del suelo-suelo (k_d). 67

Figura 27. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto al coeficiente de extinción de la radiación solar (k_e). 68

Figura 28. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto al coeficiente de transferencia de calor del suelo (k_e). 68

Figura 29. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto al índice de área foliar (L). 69

Figura 30. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto al parámetro de la tasa de ventilación (η). 69

Figura 31. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto a la temperatura base del suelo (T_d). 70

Figura 32. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto al parámetro de la tasa de ventilación (θ).	70
Figura 33. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto a la constante psicrométrica aparente (ν).	71
Figura 34. Simulación de la Temperatura observada y la estimada.	73
Figura 35. Regresión lineal de la Temperatura observada y la estimada.	73
Figura 36. Simulación de la Humedad relativa observada y la estimada.	74
Figura 37. Regresión lineal de la Humedad relativa observada y la estimada.	74
Figura 38. Simulación de la Humedad absoluta observada y la estimada.	75
Figura 39. Predicción del modelo de Temperatura.	76
Figura 40. Regresión lineal de la Temperatura observada y la medida.	77
Figura 41. Predicciones del modelo de Humedad relativa para datos del mes de mayo del 2004.	77
Figura 42. Regresión lineal de la Humedad relativa observada y la medida.	78
Figura 43. Estimaciones de la Humedad absoluta para datos del mes de mayo.	78

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades físicas del fluido.	8
Tabla 2. Características del sensor de Temperatura HOBO.	43
Tabla 3. Características del sensor de radiación HOBO.	44
Tabla 4. Características del sensor de Humedad Relativa HOBO.	46
Tabla 5. Especificaciones del sensor de dirección y velocidad del viento HOBO.	47
Tabla 6. Integrales de las funciones de sensibilidad.	72

NOMENCLATURA

SIMBOLO	UNIDADES	DESCRIPCION	VALOR
A_{cl}	$[m^2]$	Área del invernadero.	1040
A_{win}	$[m^2]$	Área de las ventanas.	400
α_{cl}	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$	Coeficiente de conductividad térmica del suelo.	10
α_m	$[W \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$	Factor de calor absorbido por el suelo.	0.1
CP_{aire}	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Calor específico del aire.	1000
C_{vapo}	-----	Coeficiente de evapotranspiración.	0-1
C_s	$[J \cdot ^\circ C^{-1} \cdot m^{-2}]$	Capacidad de calor del suelo.	12000
Di	$[kPa]$	Déficit de saturación.	
Δ	$[kPa \cdot ^\circ C^{-1}]$	Pendiente de la curva de saturación.	
ETP	$[kg \cdot s^{-1}]$	Evapotranspiración del cultivo.	
ε	$[\%]$	Coeficiente de transmisión del invernadero.	0.64
F_{vent}	$[m \cdot s^{-1}]$	Flujo de ventilación.	
Φ_{inter}	$[m \cdot s^{-1}]$	Flujo de renovación.	
φ	$[J \cdot g^{-1}]$	Energía de vaporización del agua.	
gD	$[kPa^{-1}]$	Coeficiente de déficit de saturación.	
gwb	$[m \cdot s^{-1}]$	Conductancia de la capa límite.	0.004
gws	$[m \cdot s^{-1}]$	Conductancia estomática.	
gws_{max}	$[m \cdot s^{-1}]$	Conductancia estomática máxima.	0.0155
gws_{min}	$[m \cdot s^{-1}]$	Conductancia estomática mínima.	0.0005
γ	$[kPa \cdot ^\circ C^{-1}]$	Constante psicrométrica.	0.066
H_{sat}	$[kg_{agua} \cdot kg_{aire}^{-1}]$	Humedad absoluta de saturación.	
H_{out}	$[kg_{agua} \cdot kg_{aire}^{-1}]$	Humedad absoluta fuera del invernadero.	
H_{in}	$[kg_{agua} \cdot kg_{aire}^{-1}]$	Humedad absoluta dentro del invernadero.	
k_s	$[W \cdot ^\circ C^{-1} \cdot m^{-2}]$	Coeficiente de transferencia de calor del suelo.	10.75
k_d	$[W \cdot ^\circ C^{-1} \cdot m^{-2}]$	Coeficiente de transferencia de calor del suelo-suelo.	2
k_e	-----	Coeficiente de extinción de la radiación solar.	0.6
κ	$[m \cdot s^{-1}]$	Parámetro de la tasa de ventilación.	500
L	$[m_{hojas}^2 \cdot m_{suelo}^{-2}]$	Índice de área foliar.	1
λ	$[J \cdot kg^{-1}]$	Calor latente de vaporización.	
η	$[\%^{-1}]$	Parámetro de la tasa de ventilación.	3.68

$P_{sat}(T)$	$[kPa]$	Presión de saturación a la temperatura T.	
$Q_{suelo-aire}$	$[W \cdot s^{-1}]$	Calor aportado por el suelo.	
$Q_{suelo-suelo}$	$[W \cdot s^{-1}]$	Calor retenido por el suelo.	
Q_{sm}	$[W \cdot s^{-1}]$	Calor en las capas del suelo.	
Q_{sol}	$[W \cdot s^{-1}]$	Calor debido a la radiación.	
Q_{vent}	$[W \cdot s^{-1}]$	Calor perdido por ventilación.	
Q_{convec}	$[W \cdot s^{-1}]$	Calor perdido por convección.	
Q_{suelo}	$[W \cdot s^{-1}]$	Calor aportado por el suelo.	
Rad_{out}	$[W \cdot m^{-2}]$	Radiación externa.	
Rn	$[J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$	Radiación neta absorbida por las plantas.	
ρ_{aire}	$[kg_{aire} \cdot m^{-3}]$	Densidad del aire.	1.2
S_s	$[W \cdot m^{-2}]$	Radiación en el invernadero.	
T_d	$[^{\circ}C]$	Temperatura base del suelo.	25
T_{in}	$[^{\circ}C]$	Temperatura interna del invernadero.	
T_{out}	$[^{\circ}C]$	Temperatura externa del invernadero.	
T_s	$[^{\circ}C]$	Temperatura del suelo.	
θ	-----	Parámetro de la tasa de ventilación.	4.02
μ_{win}	$[%]$	Apertura de ventanas.	0-100
V_{grh}	$[m^3]$	Volumen del invernadero.	
V_{speed}	$[m \cdot s^{-1}]$	Velocidad del viento.	
ν	$[kPa \cdot ^{\circ}C^{-1}]$	Constante psicrométrica aparente.	3.68
ϖ_{venth}	$[m \cdot s^{-1}]$	Caudal de renovación.	

1. INTRODUCCIÓN

El cultivo bajo invernadero permite obtener producciones de alta calidad y mayores rendimientos, en cualquier momento del año, a la vez que puede alargar el ciclo de cultivo, permitiendo producir en las épocas del año más difíciles y con la finalidad de que el producto alcance los mejores precios. Este incremento del valor de los productos permite que el agricultor pueda invertir tecnológicamente en su explotación mejorando la estructura del invernadero, los sistemas de riego localizado, los sistemas de control del clima, etc., que se reflejan posteriormente en una mejora de los rendimientos y de la calidad del producto final.

En los últimos años algunos agricultores han iniciado la instalación de artefactos que permiten la automatización de la apertura de las ventilaciones, radiómetros que indican el grado de luminosidad en el interior del invernadero, instalación de equipos de calefacción, sensores específicos que favorecen los sistemas de control, entre otros. Por ello en la presente tesis se estudian dos de las variables climáticas más relevantes que intervienen en el en el desarrollo óptimo de los cultivos, y que son pieza fundamental para la obtención de productos de alta calidad: la temperatura y la humedad relativa. Estas serán modeladas bajo las condiciones de un invernadero típico mexicano, con la finalidad de predecir su comportamiento y poder establecer sobre ello un control eficiente, permitiendo con ello darle a las plantas el ambiente óptimo para su desarrollo, y lo que es más importante, la obtención de un producto de alta calidad, con el mínimo costo energético posible.

En meteorología, se denomina tiempo al conjunto de valores de las magnitudes físicas que caracterizan al estado atmosférico en un momento y un lugar determinado, y se denomina clima al estado a largo plazo de la atmósfera, es decir, la secuencia más probable de esas variables a lo largo de un determinado tiempo [Barry 1985]. El clima es como el tiempo promedio en un determinado lugar. En el ámbito de cultivos protegidos, el término “clima de un invernadero” se utiliza para indicar el conjunto de magnitudes físicas ambientales que se producen en un invernadero y que afectan el crecimiento y desarrollo de un cultivo en un determinado instante.

Un invernadero es un recinto en el que se pueden mantener constantes la temperatura, la humedad y otros factores ambientales para favorecer el cultivo de plantas [Bot, 1983], por tanto su finalidad es proporcionar unas condiciones ambientales que se aproximen a las óptimas para un cultivo en las distintas fases de su desarrollo vegetativo e incluso la obtención de producción en estaciones diferentes a las normales. En realidad, es una superficie cerrada con un determinado material que permite la transmisión de un determinado porcentaje de la radiación solar, y que confina total o parcialmente una zona de la atmósfera, la cual produce el denominado efecto invernadero debido a que el material de cubierta transmite un amplio porcentaje de radiación solar (visible e infrarrojo cercano) pero no transmite las longitudes de onda superiores (infrarrojo medio y lejano). Gran parte de la radiación es absorbida por los sólidos que se encuentran

en el invernadero (en principio, el suelo y el cultivo) aumentando su temperatura, lo que provoca que reemitan energía en forma de radiación térmica que la cubierta no transmite al exterior.

La producción de hortalizas en México está en proceso de crecimiento motivada por una demanda constante del mercado interno y fundamentalmente externo. Dentro de las hortalizas más relevantes en México el jitomate tiene una importancia preponderante ya que ocupa más de un 60 % de la superficie total de invernaderos. La industria de invernaderos en México presenta un grado de desarrollo tecnológico muy bajo si se compara con aquella de los países desarrollados. A diferencia de países como Holanda Canadá e Israel en donde el control computarizado de invernaderos es una práctica común, en nuestro país lo predominante es un control manual del ambiente, algunos pocos invernaderos están equipados con dispositivos mecánicos y solo unos cuantos cuentan con sistemas computarizados. Dadas las exigencias del mercado principal de exportación, donde nuestro país tiene que competir con los países avanzados, una opción es tecnificar su producción de hortalizas en invernaderos de tal forma que se pueda mejorar la calidad del producto la cual ha sido una de las razones de la pérdida de una buena porción del mercado estadounidense.

En términos generales, se puede decir que en los invernaderos mexicanos se ha caracterizado por la aplicación de conocimientos empíricos predominantemente y muy poco ha estado basada en la aplicación de conocimientos científicos.

En el presente trabajo se desarrolló un modelo matemático capaz de describir y predecir el comportamiento de la temperatura y la humedad dentro del invernadero tomando en cuenta la variación de los factores ambientales externos y propiedades de diseño del invernadero, he aquí la importancia de la toma de datos de las diferentes variables climáticas que llevan a la exactitud del modelo.

Los modelos matemáticos nos dan una visión más amplia de los procesos que ocurren dentro del invernadero y nos permiten comprenderlos, y saber cuales son los mas importantes para un buen desarrollo del cultivo, la producción de hortalizas puede hacerse de tal forma que el control del clima en el invernadero permita optimizar la producción, es decir, obtener la más alta productividad minimizando los costos de operación del invernadero y del cultivo. Como ha sido mostrado recientemente, una opción para la producción en condiciones de invernadero es la aplicación de la teoría de control óptimo [Van Henten, 1994] en la operación y manejo del ambiente. La aplicación de cualquier estrategia de control requiere de modelos matemáticos tanto del cultivo como del invernadero.

Durante los últimos 20 años mucho conocimiento científico ha sido acumulado y expresado en modelos matemáticos del invernadero. Sin, embargo la modelación matemática del ambiente físico de los invernaderos de nuestro país es casi inexistente, de aquí la necesidad de comenzar a incursionar en el ámbito de los modelos y su utilización en estrategias de control, si se quiere tener una producción competitiva a nivel de los países más desarrollados.

En la presente investigación se propone la estructura de un modelo matemático para la temperatura y humedad dentro de un invernadero, en base a los procesos físicos más importantes que ocurren en un invernadero. Las ecuaciones de estado se deducen de un balance de masa y energía. Se propone un procedimiento para evaluar la calidad predictiva del modelo matemático, que es el análisis de sensibilidad local. Se estiman los parámetros más importantes del modelo empleando mediciones de las variables de entrada y perturbaciones en un invernadero.

2. OBJETIVOS

- ❖ Proponer la estructura de un modelo matemático para Temperatura y Humedad dentro de un invernadero.
- ❖ Implementar el modelo de Temperatura y Humedad en un programa computacional (MATLAB-SIMULINK).
- ❖ Llevar a cabo un análisis de sensibilidad local del modelo de Temperatura y Humedad del invernadero.
- ❖ Estimar parámetros del modelo para mejorar su calidad predictiva.
- ❖ Validar el modelo con nuevos conjuntos de datos.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. Leyes de transferencia de calor.

3.1.1. Conducción.

La ley de transferencia de calor por conducción recibe el nombre de “ley de Fourier” en honor al científico que la formuló [Burghardt, 1982]. En ésta se establece que el flujo térmico conductivo q_λ , es producto (a) de la conductividad térmica del material, λ ; (b) del área normal al flujo de calor, A ; y (c) del gradiente de temperatura dT/dx , a través del área.

La conductividad térmica es una propiedad del material, como el calor específico, y constituye una medida de la eficacia con la que puede conducir energía térmica. La Ley de Fourier para el caso de flujo unidimensional (en watts, W), en coordenadas rectangulares, es:

$$q_\lambda = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

las unidades de cada término son,

$$\lambda : W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$$

$$A : m^2$$

$$\frac{dT}{dx} : K \cdot m^{-1}$$

EL signo en la ecuación (1) se debe a que conviene a que el flujo de calor resulte positivo. puesto que el gradiente de temperatura es negativo en la dirección + x, ya que va de caliente a frío, y por lo mismo decrece la temperatura. los valores de la conductividad térmica dependen de la estructura molecular y son mayores para una fase sólida (que es una estructura de fase más compacta) menores para la fase líquida, y menores en mayor grado cuando se trata de la fase gaseosa.

Antes de utilizar la ecuación (1), se debe saber si el flujo de calor es constante en el tiempo (régimen de estado estable o permanente), o si varía en el tiempo (régimen de estado no estable transitorio).

Las variables T y x se pueden separar en la ecuación (1):

$$q_\lambda dx = -\lambda A dT \quad (2)$$

Integrando desde $x = 0$ y $T = T_h$, hasta $x = L$ y $T = T_c$

$$\int_0^L q_{\lambda} dx = -\int_{T_h}^{T_c} \lambda A dT = \int_{T_c}^{T_h} \lambda A dT \quad (3)$$

Las cantidades A , λ y q_{λ} son constantes de manera que

$$q_{\lambda} = \lambda A \frac{(T_h - T_c)}{L} = \frac{T_h - T_c}{R_{\lambda}} \quad (4)$$

donde

$$R_{\lambda} = \frac{L}{\lambda A} \quad (5)$$

cantidad que se conoce como resistencia térmica conductiva. Se observa que el flujo de energía térmica es igual al cociente de una diferencia de temperatura y la resistencia térmica.

3.1.2. Radiación.

La ley que corresponde a la transferencia de calor por radiación fue descubierta por dos investigadores: J. Stefan, quien la determinó en forma experimental, y L. Boltzmann, quien la dedujo desde el punto de vista teórico, con base en la mecánica estadística. La ley establece que el flujo de calor radiante A , multiplicada por la temperatura absoluta de la superficie, elevada a la cuarta potencia, T^4 . Una constante, la llamada constante de Stefan-Boltzmann, σ , convierte la proporción en ecuación. De manera que resulta (en watts, W) lo siguiente [Burghardt, 1982]:

$$q_r = \sigma A T^4 \quad (6)$$

Un cuerpo negro (o una superficie negra) es la que absorbe toda la radiación que incide sobre él. El valor de la constante de Stefan-Boltzmann es $5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$. La ecuación (6) describe la emisión de calor radiante que realiza un cuerpo negro; sin embargo, no indica cuál será la transferencia radiativa neta de calor entre dos superficies en interacción. Consideremos que la superficie 1, a la temperatura T_1 se encuentra completamente encerrada por otra superficie negra 2, a la temperatura T_2 . La transferencia neta de calor radiante es:

$$q_r = \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (7)$$

donde todas las temperaturas son absolutas [K]. Desafortunadamente, los cuerpos o superficies reales no son absorbentes ni radiadores perfectos, sino que emiten, para la misma temperatura de la superficie; una fracción de la radiación de cuerpo negro. Esta fracción se denomina emitancia (o emisividad), ϵ .

$$\varepsilon = \frac{\text{radiación de la superficie real a la temperatura } T}{\text{radiación de cuerpo negro a la temperatura } T}$$

Las superficies reales reciben el nombre de “superficies grises”. De manera que la intensidad de transferencia neta entre una superficie gris a la temperatura T_1 , y una superficie negra circundante a la temperatura T_2 , es:

$$q_r = \sigma A_1 \varepsilon_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (8)$$

3.1.3. Convección.

La transferencia de calor por convección es una combinación de los fenómenos de conducción térmica, movimiento de un fluido y la mezcla de éste. Existen dos tipos de convección: la llamada convección libre, en la que los cambios de densidad originan el movimiento de masas en el fluido, y la convección forzada, en la que un dispositivo mecánico (bomba o ventilador) produce el movimiento del fluido. La expresión que corresponde al flujo convectivo de calor no tiene carácter de ley física, sino que es solo una ecuación empírica. El flujo térmico convectivo, q_c , es el producto de tres términos [Burghardt, 1982].

1. El área de la superficie de contacto entre sólido y fluido, A .
2. La diferencia entre la temperatura de la superficie sólida, T_s , y la temperatura del fluido a cierta distancia de dicha superficie, T_∞ .
3. El coeficiente de convección térmica (promedio), $\bar{h}_c$.

$$q_c = \bar{h}_c A (T_s - T_\infty) \quad (9)$$

La ecuación (9) define rigurosamente al coeficiente de convección térmica $\bar{h}_c$, pero es además la ecuación que se utiliza convencionalmente para describir el flujo convectivo del calor. las unidades de los términos son:

$$\bar{h}_c : W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$$

$$A : m^2$$

$$T : K$$

la ecuación (9) también se puede expresar en términos de una resistencia térmica convectiva, R_c .

$$q_c = \frac{T_s - T_\infty}{R_c} \quad (10)$$

La comparación de las ecuaciones (10) y (9) da por resultado la expresión respectiva de R_c :

$$R_c = \frac{I}{\bar{h}_c A} \quad (11)$$

Para calcular un flujo convectivo de calor existe una amplia gama de valores (Tabla 1) que puede tener $\bar{h}_c$, ya que dicha cantidad relaciona las propiedades físicas del fluido y la velocidad del mismo sobre la superficie del sólido.

Tabla 1. Propiedades físicas del fluido.

Casos	$\bar{h}_c$, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
Convección libre, aire	5-25
Convección forzada, aire	10-200
Convección libre, agua	20-100
Convección forzada, agua	50-10000

La figura 1 ilustra los perfiles de velocidad y de temperatura de un fluido frío que se desplaza en convección forzada sobre una superficie sólida plana caliente. Es posible formular varias observaciones. La velocidad disminuye conforme se reduce la distancia desde la superficie sólida, siendo igual a cero en la capa de fluido inmediata a la superficie. La transferencia de calor del sólido al fluido se realiza por conducción, pues la capa del fluido adyacente tiene velocidad nula. Esto debe ser igual a la transferencia de calor por convección hacia el resto del fluido:

$$\frac{q_c}{A} = \lambda_f \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = \bar{h}_c (T_s - T_\infty) \quad (12)$$

donde λ_f es la conductividad térmica del fluido. El flujo de calor es directamente proporcional a la conductividad térmica del fluido y al gradiente de temperatura sobre la superficie. El gradiente térmico es directamente proporcional a la velocidad del fluido, de manera que velocidades más altas dan lugar a mayores gradientes de temperatura.

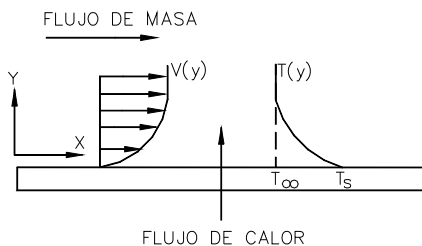


Figura 1. Fluido frío que se desplaza en convección forzada.

En la transferencia de calor por convección intervienen la velocidad de flujo, las propiedades del fluido y el coeficiente convectivo global. El índice adimensional que corresponde a la velocidad es el número de Reynolds, Re . En el caso de flujo a través de un ducto o conducto, el número de Reynolds, Re_D , se define como:

$$Re_D = \frac{v\rho D}{\mu} = \frac{vD}{\gamma} \quad (13)$$

v = velocidad promedio del flujo $m \cdot s^{-1}$

ρ = densidad del fluido $kg_{aire} \cdot m^{-3}$

D = diámetro interior del conducto m

μ = viscosidad dinámica del fluido $N \cdot s \cdot m^{-2}$

γ = viscosidad cinemática del fluido $m^2 \cdot s^{-1}$

Cuando el conducto es una sección rectangular, la dimensión característica no es el diámetro del conducto o tubo, sino un diámetro equivalente, que se conoce como diámetro hidráulico, D_H , y se define como:

$$D_H = 4 \text{ (área de la sección de flujo / perímetro de contacto)} \quad (14)$$

De manera que en el caso de flujo a través de un conducto que tiene un ancho a y una altura b en su sección transversal libre,

$$D_H = 4 \left[\frac{a \cdot b}{2(a+b)} \right] = \frac{2ab}{a+b} \quad (15)$$

3.2. Procesos físicos del invernadero.

Un invernadero es un sistema termodinámico compuesto por un conjunto de elementos sólidos, líquidos y gaseosos en cuyo interior se genera un microclima cuya complejidad proviene del acoplamiento y simultaneidad de todos los procesos de transporte de materia y energía.

En las ecuaciones de balance de energía y masas en un determinado volumen, el cambio con el tiempo o la concentración de una determinada materia es función de los flujos de energía de masa de entrada, los de salida y la producción propia de ese determinado volumen. Por tanto, hay que formular estos flujos de tal manera que se relacionen con las variables que se desean calcular. Los procesos involucrados serán descritos a continuación:

- Procesos básicos de transferencia de calor:

- Conducción .
 - Convección.
 - Absorción, reflexión y transmisión de radiación solar.
 - Emisión, absorción, reflexión y transmisión de radiación térmica.
- Procesos básicos de transferencia de masa y calor combinados:
 - Condensación de vapor de agua.
 - Evaporación de vapor de agua.
 - Transpiración del cultivo.
 - Efectos de los sistemas de actuación:
 - Ventilación natural.
 - Sistemas de calefacción.

3.2.1. Procesos de conducción.

Se define la conductividad térmica como el proceso que tiene lugar desde una zona de un cuerpo de mayor temperatura a otra zona de menor temperatura, o bien desde un cuerpo de mayor temperatura a otro distinto de menor temperatura y en contacto físico directo con él o a través de cuerpos intermedios que establezcan una unión material [Chapman, 1984]. Es la forma de transmisión de calor propia de los sólidos. Se rige por la ley de Fourier, que para una determinada dirección establece que el flujo de calor debido a la conducción, $Q_{cnd,x}$ [W] es proporcional a la superficie del sólido, $c_{area,solido}$, y a la diferencia de temperatura entre las dos caras del objeto ($V_{t,x}$ y $V_{t,x+esp}$), e inversamente proporcional al espesor del material, $c_{esp,solido}$:

$$Q_{cnd,x} = c_{cnd,solido} \frac{c_{area,solido}}{c_{esp,solido}} (V_{t,x} - V_{t,x+c_{esp,solido}}) \quad (16)$$

donde $c_{cnd,solido}$ es conductividad térmica que depende exclusivamente del material del objeto.

En un invernadero el proceso de conducción se produce en los principales sólidos donde exista un gradiente de temperatura en su volumen. Los principales procesos de conducción son:

- Conducción de calor a través del material de la cubierta (plástico o vidrio). Entre la superficie exterior e interior de la cubierta existe una diferencia de temperatura, por lo que debe producirse un proceso de conducción en su interior. Debido a que se trata de un material cuyo espesor es de unas

pocas micras, este flujo de energía no se suele considerar ya que es cuantitativamente menor que el resto de flujos y se puede ignorar.

- Conducción entre las distintas capas que componen el suelo o sustrato del invernadero. El flujo de energía entre las distintas capas del suelo se considera unidimensional a lo largo de la dirección z (profundidad del sustrato). Si las capas del suelo se consideran como láminas o placas planas, la cantidad de calor transmitido por conducción desde la primera capa de suelo a una profundidad $c_{p,s2}$, con temperatura $V_{t,s2}$ y con el coeficiente de conductividad constante, $c_{cnd,s2}$, la solución de la ecuación de Fourier considerando régimen permanente y flujo unidimensional, es la que se indica en la siguiente ecuación:

$$Q_{cnd,t} = c_{cnd,s2} c_{area,ss} \frac{V_{t,s2} - V_{t,s1}}{c_{p,s2} - c_{p,s1}} \quad (17)$$

3.2.2. Procesos de convección.

Se define la convección térmica como el proceso por el cual se transmite el calor desde una superficie a un fluido en movimiento en contacto con dicha superficie [Montero, 1993]. La convección la originan los fluidos (gases y líquidos) en los que las partículas próximas a la superficie se calientan y al desplazarse se calientan por conducción, a aquellas que se encuentran en su camino, a la vez que dejan su posición a otras partículas mas frías. Existen dos tipos de convección térmica:

- Convección natural o libre el movimiento del fluido se produce porque la transmisión de calor a través suyo ocasiona diferencias de temperatura dentro del fluido y por tanto diferencias de densidad. La diferencia de temperaturas entre la superficie y el fluido es el factor determinante.
- Convección forzada. El movimiento del fluido es producido por causas mecánicas externas como un ventilador. El principal parámetro de este tipo de convección es la velocidad del fluido.

Cuando un fluido se mueve a lo largo de una superficie sólida, se observa que su velocidad varía desde un valor nulo inmediatamente adyacente a la pared, hasta un valor finito en un punto a cierta distancia de ésta [Chapman, 1984]. Por tanto, existe una región en la que la viscosidad del fluido desempeña un papel relevante, denominada capa límite. Dentro de esta región el efecto de la pared es muy importante y fuera de ella, puede despreciarse. Por otra parte, dentro de esta capa el flujo del fluido puede ser:

- Flujo laminar. Las capas próximas al fluido se deslizan unas con respecto a otras pero no se mezclan en la dirección de la normal a las líneas de corrientes del fluido. El flujo de aire es paralelo a la superficie.
- Flujo turbulento. El flujo intermedio es paralelo a la superficie, aunque se le suponga un movimiento de fluctuación en las direcciones paralelas y normal a aquella. El flujo de aire es desordenado con remolinos que caracterizan a la turbulencia.

Todos estos parámetros se pueden reunir en un parámetro denominado coeficiente de convección térmica $[W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}]$, V_{cnv} , utilizando la ley de enfriamiento de Newton [Chapman, 1984], por la cual, la cantidad de calor transmitida por unidad de tiempo debido a la convección $[W]$, Q_{cnv} , desde la superficie al fluido es proporcional a la superficie $[m^2]$, c_{area} , y a la diferencia de temperatura entre el sólido, $V_{t,fluido}$:

$$Q_{cnv} = V_{cnv} c_{area} (V_{t,solido} - V_{t,fluido}) \quad (18)$$

como se puede observar el coeficiente de convección se trata de una conductancia térmica y no de una propiedad del material. Además, es variable ya que depende de las propiedades del fluido (densidad, conductividad térmica, calor específico y viscosidad), su velocidad, espesor y tipo de la capa límite y de otros factores adicionales. Este parámetro es difícil de determinar y por ello se suele recurrir al análisis dimensional y a la experimentación para poder calcularlo. El análisis dimensional agrupa las variables implicadas en el proceso de transmisión de calor en los números adimensionales de Nusselt, Prandtl, Grashof y Reynolds. Existen criterios basados en combinaciones de estos números que permiten determinar el tipo de flujo de transporte que se produce en cada instante (distingue entre natural y forzada, y dentro de esta clasificación entre laminar y turbulento) [Rodríguez, 2002]. En cualquiera de los casos, el coeficiente de convección es función de la diferencia de temperatura entre el fluido y el sólido y de la velocidad del fluido, $V_{vv,fluido}$:

$$V_{cnv} = f1(V_{t,solido} - V_{t,fluido}) + f2(V_{vv,fluido}) \quad (19)$$

En función del tipo de régimen de funcionamiento, $f1$ y $f2$ presentaran ecuaciones distintas.

3.2.3. Procesos de absorción, reflexión y transmisión de radiación solar.

La energía que llega a un cuerpo puede ser absorbida, reflejada o transmitida. Estas fracciones de energía son interpretadas como propiedades de los cuerpos y se denominan absorptividad, reflectividad y transmitividad [Rodríguez, 2002].

Dependiendo del comportamiento del material que forma el objeto respecto a la energía incidente de una determinada longitud de onda, se definen los siguientes valores monocromáticos adimensionales:

- $C_{alo,material}$. Coeficiente de absorción para una determinada longitud de onda.
- $C_{rlo,material}$. Coeficiente de reflexión para una determinada longitud de onda.
- $C_{tlo,material}$. Coeficiente de transmisión para una determinada longitud de onda.

Por la conservación de la energía se cumple que:

$$C_{alo,material} + C_{rlo,material} + C_{tlo,material} = 1 \quad (20)$$

en función de estos coeficientes, los cuerpos se clasifican en:

Cuerpo	C_{alo}	C_{rlo}	C_{tlo}	Propiedades
Negro	1	0	0	Absorbe toda la energía que le llega
Blanco	0	1	0	Refleja toda la energía que le llega
Diatérmico	0	0	1	Transmite toda la energía que le llega
Mate	-	0	-	No refleja ninguna energía que le llega

Un sistema sometido a una determinada radiación absorbe parte de ella, almacenando energía y por tanto aumentando su temperatura. La energía almacenada en el objeto, $Q_{alo,material} [W \cdot m^{-2}]$ se calcula como una fracción, $C_{alo} [-]$ de la energía que alcanza al objeto, $Q_{rad,material} [W \cdot m^{-2}]$, utilizando la siguiente expresión:

$$Q_{alo,material} = C_{alo,objeto} * Q_{rad,material} \quad (21)$$

En el caso de los gases, estas propiedades están sometidas a la dimensión geométrica y forma de la masa a través de la cual pasa la radiación. Los gases más elementales como el hidrógeno, oxígeno y mezclas de ellos, como el aire, poseen una transmitividad igual a uno, por lo que son inertes a la radiación ya que su absorptividad es nula.

En un invernadero, la principal fuente de energía natural es la radiación solar, comprendida entre una longitud de onda de 0.3 y 2.5 μm . Se divide en ultravioleta (0.300-0.380 μm), visible (0.380-0.760 μm) e infrarroja solar (0.760-2.500 μm). La radiación fotosintéticamente activa (PAR), que influye directamente en la fotosíntesis y por tanto en el crecimiento del cultivo, es una parte de la radiación solar entre los 0.4 y los 0.7 μm . En un invernadero, todos los sólidos absorben radiación solar por lo que si se considera el aire como inerte a la radiación solar, se observan los siguientes procesos relacionados:

- Cubierta. Absorción, reflexión y transmisión de radiación solar por parte de la cubierta en función de las propiedades del material que la forma, de la orientación del invernadero y de la pendiente del mismo.
- Cultivo. Absorción, reflexión y transmisión de radiación solar transmitida a través de la cubierta por parte del cultivo en función del estado del mismo y de la orientación de las hojas. Para analizar la radiación que alcanza el cultivo, éste se puede modelar de varias formas [Daudet, 1993]:
 - Modelo de la “hoja grande”. Se considera el cultivo como un todo y la radiación solar incide verticalmente.
 - Modelo homogéneo. Se consideran dos clases de hojas: hojas con sombras que solo reciben radiación difusa y hojas que reciben radiación difusa y directa.
 - Modelo heterogéneo. Se considera la geometría de la estructura del cultivo en dos o tres dimensiones.

Es evidente que existen perfiles verticales de radiación en el cultivo pero como no se suele disponer de medidas a distintas alturas, se considera el cultivo del invernadero como una única hoja grande, existiendo un solo valor de radiación para toda la superficie foliar.

- Superficie del suelo. Absorción y reflexión de la radiación solar transmitida a través del cultivo por parte de la primera capa de suelo. Si se trata de tierra o sustrato la transmisividad suele ser nula por lo que absorbe toda la radiación que la alcanza.

Con respecto al suelo se pueden considerar las siguientes alternativas:

- Si no hay cultivo y:
 - Si no existe malla sombra o no se encuentra extendida, absorbe la parte correspondiente de radiación solar que transmite la cubierta.
 - Si existe malla de sombreo y se encuentra extendida, absorbe la parte correspondiente de radiación solar que transmite la malla de sombreo que es una fracción que transmite la cubierta.
- Si hay cultivo y:
 - Si no existe malla de sombreo o no se encuentra extendida, absorbe la parte correspondiente de radiación solar que transmite el cultivo (función del estado de crecimiento del cultivo) que es una fracción de la que transmite la cubierta.
 - Si existe malla de sombreo y se encuentra extendida, absorbe la parte correspondiente de radiación solar que transmite el cultivo, que es una fracción de la que transmite la cubierta y la malla de sombreo.

Es importante tener en cuenta la calidad de la radiación solar ya que al atravesar la atmósfera puede ser reflejada (por las nubes), absorbida (vapor de agua) o dispersarse (por el polvo y partículas suspendidas). Además la radiación que alcanza al suelo se absorbe en parte y el resto se refleja hacia la atmósfera. El resultado de estos efectos es la descomposición de la radiación solar incidente, denominada radiación global, en tres componentes [Duffie, 1979]:

- Radiación directa. Radiación solar recibida sin cambio de dirección.
- Radiación difusa. Radiación solar recibida después de que la reflexión y la difusión por la atmósfera hayan cambiado su dirección.
- Radiación del albedo. Radiación procedente del suelo y debido a la reflexión de la radiación incidente en él.

3.2.4. Procesos de absorción de radiación térmica.

Si un cuerpo es calentado y se le aísla físicamente, se observa que la temperatura disminuye con el tiempo, perdiendo energía. Se produce un mecanismo de transmisión de calor denominado radiación térmica que es la radiación electromagnética emitida por un cuerpo en virtud de su temperatura comprendida en una longitud de onda entre 5 y 50 μm . Esta energía, $Q_{rad} [W \cdot m^{-2}]$, se calcula en función de la temperatura del objeto, $V_{t,objeto} [K]$, utilizando la ley de Stefan-Boltzman formulada con la siguiente expresión [Chapman, 1984]:

$$Q_{rad} = V_{eol,objeto} \cdot C_{SB} \cdot V_{f,objeto}^4 \quad (22)$$

donde C_{SB} es la constante de Boltzman de valor $5.67 \times 10^{-8} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$ y $V_{eol,objeto}$ es emitancia de radiación térmica (onda larga) del cuerpo [-] dependiendo su valor de las características del cuerpo y de su temperatura. Asimismo, cuando la energía térmica que emite un cuerpo alcanza a otro objeto, es absorbida, reflejada y transmitida dependiendo de la naturaleza de la radiación incidente y de la sustancias de la que está compuesto el cuerpo, caracterizada por los coeficientes de absorción, $V_{aol,objeto}$, reflexión, $V_{rol,objeto}$, y transmisión, $V_{tol,objeto}$, de radiación de onda larga. Si existen j cuerpos a diferentes temperaturas, $V_{t,objeto i}$ desde $i=1$ hasta j , cada uno con una emisividad distinta, $V_{eol,objeto i}$, el balance de radiación térmica en el cuerpo i , $Q_{rad,objeto i}$, se puede calcular como la diferencia de la radiación térmica que absorbe del resto procedente de cuerpos:

$$Q_{rad,objeto i} = V_{eol,objeto i} \cdot C_{SB} \cdot V_{t,objeto i}^4 - V_{aol,objeto i} \cdot C_{SB} \sum_{k=1}^j V_{FF,ki} \cdot V_{eol,objeto k} \cdot V_{t,objeto k}^4 \quad (23)$$

donde $V_{FF,ki}$ es la fracción de energía que emite el cuerpo k alcanzando al cuerpo i si tener en cuenta cual es transferida por reflexión o radiación de otras superficies que puedan estar presentes.

3.2.5. Procesos de evaporación y condensación de vapor de agua.

Cuando se producen cambios de fase, como en la condensación y la evaporación, se genera una combinación de transferencia de calor y masa. La evaporación tiene lugar cuando se transmite energía a una superficie capaz de evaporarse si la presión de vapor de agua se encuentra por debajo del valor de saturación (humedad absoluta del aire saturado de vapor de agua a la temperatura del aire). Cuando se evapora agua en una superficie, el vapor de agua se transporta al aire (aumentando su humedad) y absorbe energía de la superficie denominado calor latente de vaporización, disminuyendo la temperatura de la misma, si por el contrario, el vapor de agua se condensa, el aire pierde humedad y la superficie donde se condensa recibe energía denominada calor latente de condensación. La humedad del aire atenúa la oscilación diurna de temperatura, ya que durante el día se produce la evaporación y durante la noche la condensación.

La condensación de un gramo de vapor aumenta la temperatura de un metro cúbico de aire cerca de 2 °C. La gran diferencia entre el calor específico del aire ($V_{cesp,a}=10^3 [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$) y el calor latente de vaporización del agua ($V_{lt,vap}=2.5 \times 10^6 [J \cdot kg^{-1}]$) hace que los cambios de fase del agua sean importantes en el balance energético de un invernadero [Stanghellini, 1998], en el que se producen los siguientes fenómenos relacionados con los procesos de calor latente:

- Condensación en la cara exterior de la cubierta. El proceso de condensación del vapor de agua del aire exterior sobre la cubierta se produce cuando la temperatura de la superficie externa es inferior a la de saturación de dicho vapor a la presión reinante. La liberación de energía térmica del vapor hace que éste ceda su calor latente de vaporización y, consecuentemente, se condense sobre la cubierta.
- Condensación en la cara interna de la cubierta. En la superficie interna de la cubierta se produce un fenómeno de condensación similar al descrito anteriormente con respecto a la superficie exterior, siempre que la humedad de saturación del aire a la temperatura de la cubierta sea mayor o igual a la humedad absoluta del aire en el invernadero. Es importante evitar la condensación sobre esta superficie de la cubierta ya que el vapor de agua condensado se suele desprender por la acción de la gravedad, cayendo sobre el cultivo, lo que favorece la aparición de enfermedades fungosas perjudiciales para las plantas.
- Evaporación en la superficie del suelo. La superficie del suelo no es una superficie libre de agua que se va evaporando sino que la va extrayendo de las capas inferiores; por tanto se producen dos mecanismos: la difusión del agua de las capas inferiores al suelo y la evaporación.

- Condensación sobre las hojas y frutos. En las hojas y los frutos se produce un fenómeno de condensación siempre que la humedad de saturación del aire a la temperatura de la hoja o el fruto sea mayor o igual a la humedad absoluta del aire en el invernadero.

3.2.6. Proceso de transpiración del cultivo.

El agua representa mas del 70% del peso fresco de los tejidos vegetales y valores superiores al 90% en órganos de crecimientos como hojas y frutos. El agua forma una fase líquida continua en toda la planta que se prolonga hasta el suelo o sustrato donde se conecta a través de la superficie de las raíces. En los cultivos hortícolas, la cantidad de agua retenida en los tejidos de la planta representa una fracción muy pequeña de la cantidad total absorbida por las raíces. La mayor parte del agua se escapa por las hojas a la atmósfera en forma de vapor, lo que constituye el fenómeno de la transpiración.

La tasa de transpiración presenta una periodicidad diaria que se puede relacionar con las condiciones climáticas del ambiente donde se encuentra. De noche, los valores de las tasas de transpiración son muy bajos, incrementándose tras la salida del sol, alcanzando un máximo a finales de la mañana o principios de la tarde, para caer gradualmente hasta alcanzar los valores típicos nocturnos. Las diferencias entre el día y la noche son muy notables, que en una sola hora del día puede transpirar mas agua que en toda la noche [Gil, 1995].

De las variables climáticas que fluctúan diariamente, la radiación solar incidente es la que mejor se correlaciona con la transpiración, pero existe relación con la temperatura y la humedad relativa, además con otros factores en menor medida como la velocidad del viento o el contenido de agua del suelo. Una de las principales razones por las que la radiación es la variable que se relaciona mejor con la transpiración es porque se trata del factor que suministra energía al proceso. Por otra parte, una superficie mojada cede mas vapor de agua cuanto mayor sea el gradiente de presión de vapor. La transpiración puede considerarse como un proceso de difusión en el que su intensidad depende tanto del suministro de energía para vaporizar el agua como del gradiente de concentración o presión de vapor y de las resistencias a las pérdidas de agua.

La descripción del transporte de agua de la hoja hacia la superficie se basa en su propia morfología. El agua se evapora en las cavidades internas y tiene que atravesar la epidermis y los estomas. El agua se evapora en las cavidades internas a presión de saturación y a temperatura de la hoja. El vapor de agua encuentra una resistencia para salir al exterior en las cavidades, la cutícula y los estomas en la capa límite de la superficie de la hoja. La transpiración depende tanto de factores ambientales como de factores de la propia planta, aunque un cambio en estos factores no produce necesariamente un cambio proporcional en la tasa de transpiración ya que la intensidad esta controlada por más de un factor [Azcon-Bieto, 1996].

3.3. Modelación matemática.

En general existen tres tipos de modelos matemáticos: modelos empíricos, modelos mecanísticos (dinámicos) y modelos teleonómicos. Los modelos empíricos son descripciones directas de datos y proporcionan relaciones observables entre las variables de un sistema sin alguna explicación de los mecanismos subyacentes. Son un poderoso medio para describir y resumir datos. Ejemplo de modelo empírico son los modelos de regresión simple o múltiple. Otro ejemplo lo constituyen las redes neuronales artificiales. Los modelos teleonómicos son aplicables a comportamientos dirigidos por objetivos y se formulan en términos de metas. Los modelos mecanísticos son modelos determinísticos y explicativos de un sistema. Normalmente, un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias es definido para describir el comportamiento de las variables de estado del sistema, las variables que representan las propiedades o atributos del sistema considerado. Los modelos mecanísticos son mas apropiados para expresar hipótesis matemáticamente y proporcionan así una descripción cuantitativa y explicación de los procesos más importantes que ocurren en un sistema físico-biológico. El desarrollo de un modelo matemático mecanístico requiere de suficiente comprensión de los procesos físicos químicos y biológicos que ocurren en un sistema y su uso demanda una validación apropiada.

Un modelo dinámico para el clima de un invernadero es definido mediante la ecuación diferencial:

$$\dot{x} = f(x, u, p), x(t_0) = \beta \quad (24)$$

donde $x \in R^m$, $p \in R^q$ y $\beta \in R^n$.

El vector de estados (x) contiene las variables que caracterizan los procesos físicos más importantes dentro del invernadero, en este caso temperatura y humedad relativa, el vector de las entradas (u) contiene las variables climáticas externas: temperatura, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento, apertura de ventanas, y el vector (p) contiene los parámetros del modelo, coeficientes o constantes físicas.

Las ecuaciones de balance de masa y energía se describen a continuación:

$$M|_{t+\Delta t} - M|_t = \int_t^{t+\Delta t} \dot{m}_{in} dt - \int_t^{t+\Delta t} \dot{m}_{out} dt \quad (25)$$

$$M|_{t+\Delta t} - M|_t = \int_t^{t+\Delta t} (\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}) dt \quad (26)$$

Donde M representa la masa total en el sistema, mientras que $\dot{m}_{in}$ y $\dot{m}_{out}$ representan las tasas de entrada y salida del sistema respectivamente [Bequette, 1998]. Se puede escribir el lado derecho de la ecuación 26, con el teorema del valor medio del cálculo integral, como:

$$\int_t^{t+\Delta t} (\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}) dt = (\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}) \Big|_{t+\alpha\Delta t} \Delta t \quad (27)$$

Donde $0 < \alpha < 1$. la ecuación 26 puede ser escrita:

$$M|_{t+\Delta t} - M|_t = (\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}) \Big|_{t+\alpha\Delta t} \Delta t \quad (28)$$

Dividiendo por Δt :

$$\frac{M|_{t+\Delta t} - M|_t}{\Delta t} = (\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}) \Big|_{t+\alpha\Delta t} \quad (29)$$

Y usando el teorema del valor medio del cálculo diferencial ($0 < \beta < 1$) para el lado izquierdo:

$$\frac{M|_{t+\Delta t} - M|_t}{\Delta t} = \frac{dM}{dt} \Big|_{t+\beta\Delta t} \quad (30)$$

La cual queda:

$$\frac{dM}{dt} \Big|_{t+\beta\Delta t} = (\dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}) \Big|_{t+\alpha\Delta t} \quad (31)$$

Tomando el límite Δt como cero, se tiene:

$$\frac{dM}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \quad (32)$$

Y representando la masa total como $M = V\rho$, $\dot{m}_{in}$ como $F_{in}\rho$ y $\dot{m}_{out}$ como $F_{out}\rho$, donde ρ es la densidad de la masa (masa/volumen) y F es un índice de flujo volumétrico (volumen/tiempo), y se obtiene:

$$\frac{dV\rho}{dt} = F_{in}\rho - F_{out}\rho \quad (33)$$

Si una cantidad de energía por unidad de tiempo (Q_{ent}) entra a un volumen, entonces la cantidad de energía en el volumen (Q_{Tot}) se incrementa. Y por supuesto si un flujo de energía (Q_{sal}) sale, Q_{Tot} decrecerá. La relación en la cual se compara la entrada y la salida de flujos es llamada balance. Se puede llevar a cabo un balance de masa o energía para cualquier volumen. No solo los flujos de energía entrantes y salientes contribuyen a incrementar o decrementar la energía en un volumen, sino también la producción de energía (Q_{pro}) en el volumen. De estas consideraciones el balance de energía sobre cualquier volumen puede ser descrito como:

$$Q_{Tot} = Q_{ent} - Q_{sal} + Q_{pro} \quad (34)$$

Y el cambio en el tiempo de la energía por unidad de tiempo en el volumen total se expresa:

$$\frac{dQ_{Tot}}{dt} = Q_{ent} - Q_{sal} + Q_{pro} \quad (35)$$

Este es determinado por los términos del lado derecho, los cuales son respectivamente, los flujos entrantes Q_{ent} , los flujos salientes Q_{sal} y la producción de energía Q_{pro} por unidad de tiempo en el volumen considerado.

La cantidad de energía Q_{Tot} en el volumen está directamente relacionada con la temperatura T del volumen a través de su capacidad calorífica CP_{aire} , la densidad en ese volumen ρ_{aire} y dicho volumen V_{grh} :

$$Q_{Tot} = V_{grh} \cdot \rho_{aire} \cdot CP_{aire} \cdot T \quad (36)$$

De esta forma, la razón de cambio de la energía interna es trasladada a razón de cambio de la temperatura que se puede expresar como:

$$V_{grh} \rho_{aire} CP_{aire} \frac{dT}{dt} = Q_{ent} - Q_{sal} + Q_{pro} \quad (37)$$

3.3.1. Complejidad de las variables climáticas.

La dinámica de las variables climáticas es muy compleja debido a [Rodríguez 2000]:

- Presencia de distintas escalas de tiempo de interés, desde minutos hasta meses.

- Presencia de no linealidades de los procesos, tanto estáticas como dinámicas.
- Variabilidad en el tiempo de parámetros.
- Presencia de fuertes perturbaciones (medibles y no medibles).
- Alto grado de correlación de las variables.
- Combinación de variables continuas y discretas.
- Presencia de dinámicas desconocidas y, por tanto, no modelables.
- Dinámica cambiante con las características del invernadero y con la zona geográfica.

Se trata de un problema muy complejo de analizar y aunque los procesos físicos que tienen lugar en un invernadero son conocidos, hay que realizar una serie de hipótesis de partida de cada uno de los elementos y de los procesos. Las hipótesis aceptadas por la mayoría de los autores son las siguientes:

- Cubierta. Se considera formada por un material homogéneo con propiedades termodinámicas y ópticas constantes en el tiempo y con una capacidad calorífica despreciable. Se considera una temperatura en cada superficie.
- Cultivo. Se considera un subsistema con densidad de vegetación uniforme que absorbe y transmite la radiación solar y térmica. Se suele despreciar su capacidad térmica y se supone la temperatura uniforme en todo su volumen.
- Aire. Se considera homogéneo en cuanto a propiedades termodinámicas excepto en aquellos modelos que incluyan ventilación forzada.
- Suelo. Se le considera como un medio dividido en un número finito de capas horizontales que se suponen homogéneas en cuanto a sus propiedades termodinámicas y composición química. El flujo de calor se suele considerar unidireccional, presidiendo del estudio del movimiento del agua.

3.3.2. Modelos del clima del invernadero.

Para modelar el clima que se genera en el interior de un invernadero basándose en los principios físicos y químicos que lo producen, hay que utilizar métodos de balance de energía y masa en todos los elementos que lo constituyen. Por lo tanto, lo primero que hay que determinar es la identificación de cada uno de estos subsistemas (figura 2). Que básicamente son los siguientes cuatro:

- Cubierta. Se trata de un medio sólido y homogéneo que transmite parcialmente la radiación solar y térmica. Su principal objetivo es aislar la atmósfera interna de las condiciones meteorológicas exteriores.

- Cultivo. Es un organismo vivo que constituye un sistema termodinámico abierto que extrae energía del medio que lo rodea y aporta masa (vapor de agua).
- Aire. Es un medio gaseoso que sirve de unión entre los distintos elementos sólidos del invernadero.
- Suelo y sustrato. Se trata de un medio poroso donde se puede distinguir una fase sólida (tierra), una fase líquida (agua) y una fase gaseosa (aire y vapor de agua). Es el responsable de la inercia térmica del invernadero, absorbiendo energía durante el día y emitiéndola durante la noche. A su vez el subsistema suelo se divide en:
 - *Superficie* donde se produce el acoplamiento con el resto del invernadero.
 - *Capas inferiores* que separan las capas del suelo que poseen distintas características térmicas entre las que se producen procesos de conducción.

Si se conocen las condiciones exteriores al invernadero (temperatura del aire exterior, velocidad del viento radiación, etc.) y los parámetros del invernadero (propiedades ópticas y térmicas de la cubierta, volumen del aire, superficie, etc.); el análisis de los balances de energía pueden llevarse a cabo, permitiendo calcular la temperatura del aire. Para lo que es preciso conocer las expresiones de cálculo de cada uno de los términos del balance y resolver simultáneamente las ecuaciones. Este conjunto de expresiones matemáticas que describen el comportamiento del invernadero, constituyen lo que se le llama un modelo climático [Bot, 1983]. la utilidad de los modelos es múltiple: permiten comprender como se produce el clima del invernadero en función de las condiciones meteorológicas exteriores, sirven para interpretar las observaciones del clima y del comportamiento de los cultivos, suministran información de base para el diseño de invernaderos y equipos de climatización, y sirven de base para lograr el control automático del clima.

Existen modelos bastante complicados (modelos “generalizados”), como el propuesto por Bot [Bot, 1983] donde se necesitan conocer y estimar un gran número de parámetros para la obtención del balance de energía y masa del invernadero. Por otro lado existen modelos simplificados, basados en la linealización del intercambio de calor sensible y latente, que usan solamente un número limitado de parámetros, los cuales pueden ser calculados o estimados por ecuaciones propuestas en bibliografía.

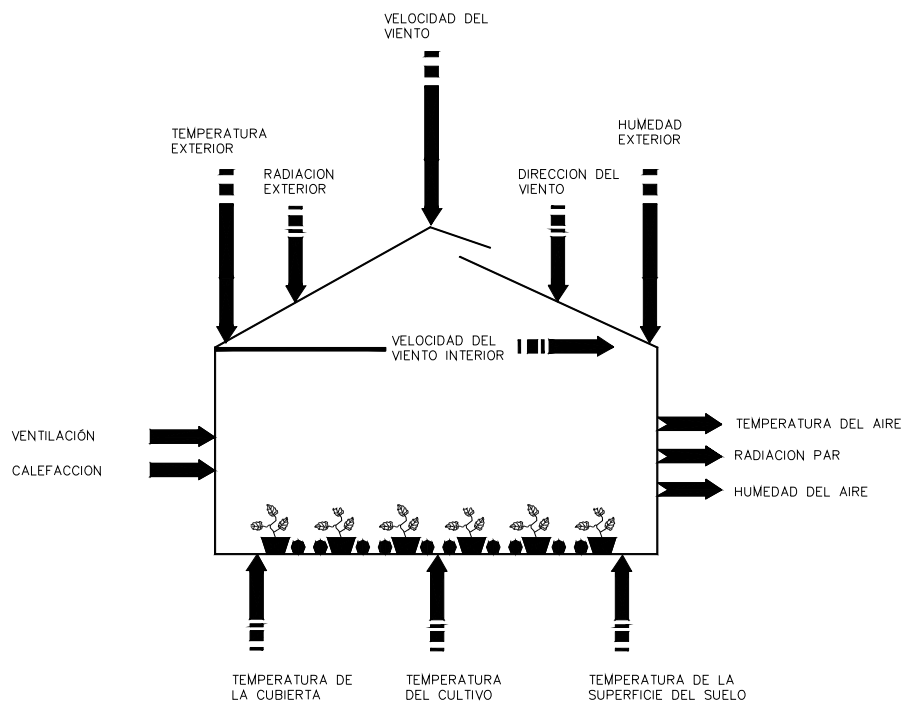


Figura 2. Esquema del modelo de variables características del aire conocidas las del resto de elementos.

Bot [1983] propuso uno de los primeros modelos dinámicos para un invernadero. Este modelo simula el clima instantáneo dentro de un invernadero como una función del clima externo, las propiedades físicas de la construcción y materiales del invernadero así como los mecanismos de calefacción y ventilación. El modelo incorpora una pantalla térmica, el aire arriba y bajo esta, de la vegetación y capas de suelo horizontal son homogéneas. La presión de vapor sobre la superficie del suelo, dentro de las hojas, sobre la pantalla térmica y sobre el interior de la cubierta, iguala las presiones de vapor saturado locales. Estas fueron calculadas a partir de sus temperaturas correspondientes. El ajuste entre las variables de estado medidas y simuladas fue bastante aceptable.

Udink ten Cate [1983] propuso un modelo basado en funciones de transferencia en vez de espacio de estados. En este modelo se transforma a lineal el sistema no-lineal del invernadero mediante el uso de un punto de linealización y asumiendo principalmente respuestas de primer orden. Tchamitchian desarrolló un modelo para propósitos de control óptimo basado en el modelo original de Udink ten Cate. Se ha observado que los modelos propuestos por Bot y Udink son aproximadamente equivalentes pero el modelo del segundo es más fácil de simular [Tap, 2000]. Bakker estudió el efecto de humedad del aire sobre la producción y calidad de varias hortalizas en invernaderos holandeses [Bakker, 1991]. Estimó la influencia de la humedad sobre la fotosíntesis de la hoja mediante su efecto sobre la conductancia de los estomas. Encontró que la humedad no

influye en forma significativa la conductancia de la hoja. Un resultado importante fue el observar que el mayor efecto de la humedad sobre la producción ocurre mediante su impacto sobre la intercepción de la luz (mediante número de hojas y expansión foliar) y el decrecimiento del índice de área foliar (mediante deficiencia de Ca) y un efecto marginal sobre la actividad fotosintética.

Stanghellini analizó varios aspectos físicos del invernadero para estudiar la relación del microclima con la transpiración [Stanghellini, 1998]. Estudió el balance de energía del invernadero y el comportamiento termodinámico del follaje del cultivo. Desarrolló submodelos matemáticos para la transferencia de calor del follaje, la transferencia de radiación entre el follaje y su resistencia a la transferencia de vapor. Las ecuaciones propuestas mostraron una reproducción aproximada de la temperatura y transpiración de un cultivo de jitomate en invernadero, cuando estas variables fueron medidas a intervalos de pocos minutos.

3.3.3. Modelo de Van Henten.

En este modelo del clima del invernadero [Van Henten, 1994], el interior del invernadero se considera como un tanque perfectamente mezclado que consiste esencialmente en un componente homogéneo, el aire del invernadero. El clima del invernadero es representado por tres variables de estado, la temperatura del aire en el interior X_t [$^{\circ}\text{C}$], la concentración de dióxido de carbono X_c [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] y humedad absoluta X_h [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]. Por simplicidad, los elementos de construcción del invernadero, el cultivo y el suelo no se modelan como elementos separados pero su influencia está implícita en el modelo.

Los cambios dinámicos en el clima del invernadero son determinados por energía y flujo de masas, originados de diferencias en energía y masas contenidas entre el aire interior y el exterior o de control o de energías externas de las energías totales. En este modelo, las entradas del control son la temperatura del sistema de calefacción U_t [$^{\circ}\text{C}$], la apertura de las ventanas cenitales y las laterales de barlovento de la ventilación, U_{1s} y U_{ws} [%] y la tasa de aporte de dióxido de carbono U_c [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$]. Se asume que los cambios instantáneos en la temperatura de los sistemas de calefacción pueden ser alcanzados, aunque en la práctica la dinámica ocurrirá en los sistemas de calefacción. Entradas externas, o perturbaciones, son la radiación solar V_i [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$], la velocidad del viento V_w [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], la temperatura V_t [$^{\circ}\text{C}$], la humedad absoluta V_h [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] y la concentración de dióxido de carbono V_c [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] fuera del invernadero.

El modelo del clima del invernadero describe el comportamiento dinámico de las variables de estado con las siguientes ecuaciones diferenciales:

$$\frac{dX_t}{dt} = \frac{1}{c_{cap,q}} (Q_{pi,ai} - Q_{ai,ou} + Q_{rad}) \quad (38)$$

$$\frac{dX_c}{dt} = \frac{1}{c_{cap,c}} (U_c - \phi_{c,ai,pl} - \phi_{c,ai,ou}) \quad (39)$$

$$\frac{dX_h}{dt} = \frac{1}{c_{cap,h}} (\phi_{h,pl,ai} - \phi_{h,ai,ou}) \quad (40)$$

donde $c_{cap,q}$ [$J \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$], $c_{cap,c}$ [m], $c_{cap,h}$ [m] son el coeficiente de capacidad de calor y el coeficiente del balance de masas del aire de invernadero respectivamente. En este modelo, el calor y la transferencia de masas en el invernadero son descritas por metro cuadrado de suelo.

El balance de energía del aire del invernadero es afectado por el aporte de energía de los sistemas de calefacción, $Q_{pi,ai}$ [$W \cdot m^{-2}$], las pérdidas de energía al aire exterior debido a la transmisión a través de la cubierta del invernadero y al intercambio natural de la ventilación a través de las ventanas, $Q_{ai,ou}$ [$W \cdot m^{-2}$], y la entrada de calor que llega al invernadero por el sol, Q_{rad} [$W \cdot m^{-2}$].

El balance de dióxido de carbono del aire del invernadero es determinado por la tasa de dióxido de carbono que se suministra, U_c [$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$], el dióxido de carbono absorbido por el follaje, $\phi_{c,ai,pl}$ [$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$], y el intercambio con el aire externo, $\phi_{h,ai,ou}$ [$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$]. En el invernadero considerado, el suelo fue cubierto con plástico y por lo tanto la emisión de dióxido de carbono del suelo debido a la respiración de las raíces de las plantas y de los organismos del suelo no son considerados en este modelo.

Finalmente, el balance de humedad es afectado por la transpiración del follaje, $\phi_{h,pl,ai}$ [$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$], y el intercambio con el aire externo, $\phi_{h,ai,ou}$ [$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$]. La condensación del agua en la superficie interna de la cubierta, aunque siendo significativa durante algunas partes del día y de la noche, se no se consideran en este modelo.

Otro fenómeno de transporte de masas y energía, por ejemplo en la cubierta y el suelo del invernadero, se piensan poco importantes para el objetivo de la investigación y también son ignorados.

La energía individual y los flujos de masas se modelan como sigue. El transporte de energía convectiva de los tubos de calefacción al invernadero es descrito por:

$$Q_{pi,ai} = c_{pi,ai} (U_t - X_t) \quad (41)$$

donde $c_{pi,ai}$ [$W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$] es el coeficiente de transferencia de calor expresado por metro cuadrado de suelo. La entrada de calor del sol es gobernada por:

$$Q_{rad} = c_{rad} V_i \quad (42)$$

con el coeficiente c_{rad} de la transmisividad de la cubierta, la intercepción de la radiación solar transmitida por los componentes estructurales del invernadero y la conversión de la energía solar absorbida por el follaje en una carga de calor sensible en el aire del invernadero.

La pérdida de energía hacia el aire exterior es descrita por:

$$Q_{ai,ou} = (\phi_{vent} c_{cap,q,v} + c_{ai,ou}) (X_t - V_t) \quad (43)$$

donde $c_{ai,ou}$ [$W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$] es el coeficiente de transferencia térmica para el transporte de energía de la cubierta del invernadero y ϕ_{vent} [$m \cdot s^{-1}$] es el flujo de ventilación natural de las ventanas, ambos expresados por metro cuadrado de suelo. $c_{cap,q,v}$ [$J \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$] es la capacidad de calor por unidad de volumen de aire.

El flujo de ventilación natural de las ventanas, ϕ_{vent} , es calculado para la velocidad del viento y la apertura de las ventanas de barlovento de acuerdo a De Jong (1990) citado por Van Henten. Usando las mediciones de De Jong, para el invernadero específico utilizado en esta investigación, la curva se expresa con la siguiente relación:

$$\phi_{vent} = c_{window} \left[\frac{c_{1s,1} U_{1s}}{1 + c_{1s,2} U_{1s}} + c_{ws,1} + c_{ws,2} U_{ws} \right] V_w + c_{leak} \quad (44)$$

donde U_{1s} y U_{ws} [%] tienen valores entre 0 y 100 %, $c_{1s,1}$, $c_{1s,2}$, $c_{ws,1}$ y $c_{ws,2}$ parámetros de la función de ventilación, c_{window} igual a la cantidad de apertura por metro cuadrado de suelo y c_{leak} [$m \cdot s^{-1}$] es un término de salida. Puesto que la contribución de la ventilación inducida por diferencias de temperatura entre el aire interior y el exterior es solamente significativa a velocidades del viento muy bajas, se desprecia en este modelo. La toma de dióxido de carbono neto del follaje debido a la fotosíntesis, aumenta la respiración y la respiración de mantenimiento es descrita por:

$$\phi_{c,ai,pl} = \phi_{phot} - \frac{1}{c_\alpha} \phi_{resp} - \frac{1 - c_\beta}{c_\alpha c_\beta} r_{gr} X_s \quad (45)$$

donde el crecimiento del cultivo es descrito por dos variables de estado del modelo de crecimiento de la lechuga, y ϕ_{phot} , ϕ_{resp} y r_{rg} son la fotosíntesis, respiración y la tasa de crecimiento específica respectivamente.

El dióxido de carbono neto absorbido es determinado por la cantidad que absorbe la fotosíntesis, ϕ_{phot} , y la producción de dióxido de carbono por la respiración de crecimiento, $((1-c_\beta)/c_\alpha c_\beta)r_{gr}X_s$, y la respiración de mantenimiento, ϕ_{resp}/c_α . Puesto que el crecimiento y la respiración de mantenimiento se expresan en términos de material no estructural usado, el dióxido de carbono relacionado con la producción es obtenido dividiendo el consumo de la respiración del material no estructural por el factor de conversión c_α .

El intercambio del dióxido de carbono y vapor de agua por la ventilación de las ventanas es descrita por:

$$\phi_{c,ai,ou} = \phi_{vent}(X_c - V_c) \quad (46)$$

y

$$\phi_{h,ai,ou} = \phi_{vent}(X_h - V_h) \quad (47)$$

La transpiración del follaje actúa como fuente de vapor de agua al aire del invernadero. Las fuerzas impulsoras de este fenómeno son la diferencia en la presión del vapor de agua entre el aire ambiental y la cavidad sub-stomatal, el cual se asume para ser saturado con respecto al vapor de agua. La presión de saturación de saturación es determinada por la temperatura del follaje la cual en este modelo es tomada como equivalente con la temperatura del aire [Van Henten, 1994]. La transpiración del follaje es descrita por:

$$\phi_{h,pl,ai} = (1 - e^{-c_{a,pl}X_s})c_{v,pl,ai} \left(\frac{c_{v,0}c_{v,1}c_{h2O}}{c_R(X_t + c_{t,abs})} e^{\frac{c_{v,2}X_t}{X_t + c_{v,3}}} - X_h \right) \quad (48)$$

en el cual de acuerdo a Goudriaan (1977) citado por Van Henten

$\frac{c_{v,0}c_{v,1}c_{h2O}}{c_R(X_t + c_{t,abs})} e^{\frac{c_{v,2}X_t}{X_t + c_{v,3}}}$ [$kg \cdot m^{-3}$] describe la concentración del vapor de agua a saturación para una cantidad de aire como una función de la temperatura, $c_{v,pl,ai}$ [$m \cdot s^{-1}$] es el coeficiente de transferencia de masas, c_R [$J \cdot K^{-1} \cdot kmol^{-1}$] es la constante del gas, c_{H2O} [$kg \cdot kmol^{-1}$] es la masa molecular del agua, $c_{t,abs}$ [K] es la temperatura absoluta y $c_{v,0}$ es un parámetro de calibración.

La humedad relativa es calculada de la humedad absoluta con la siguiente ecuación:

$$RH = 100 X_h \left[\frac{c_{v,1} c_{H_2O}}{c_R (X_t + c_{t,abs})} e^{\frac{c_{v,2} X_t}{X_t + c_{v,3}}} \right]^{-1} \quad (49)$$

Descripción de los parámetros del modelo de Van Henten.

Parámetro	Valor	Dimensión	Descripción
$c_{ai,ou}$	6	$[W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}]$	Calibración
$c_{a,pl}$	62.8	$[m^2 \cdot kg^{-1}]$	Calibración
$c_{cap,c}$	4.1	$[m]$	Propiedad física
$c_{cap,h}$	4.1	$[m]$	Propiedad física
$c_{cap,q}$	30000	$[J \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}]$	Calibración
$c_{cap,q,p}$	1000	$[J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}]$	Constante Física
$c_{cap,q,v}$	1290	$[J \cdot m^{-3} \cdot ^\circ C^{-1}]$	Constante Física
c_{H_2O}	18	$[kg \cdot kmol^{-1}]$	Constante Física
$c_{1s,1}$	5.5×10^{-4}	-----	Estim. de De Jong (1990)
$c_{1s,2}$	1.56×10^{-2}	-----	Estim. de De Jong (1990)
$c_{pi,ai}$	5	$[W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}]$	Calibración
c_R	8314	$[J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}]$	Constante física
c_{rad}	0.2	-----	Calibración
$c_{\rho,ai}$	1.29	$[kg \cdot m^{-3}]$	Constante Física
$c_{t,abs}$	273	$[K]$	Constante Física
c_{leak}	0.75×10^{-4}	$[m \cdot s^{-1}]$	Calibración
$c_{v,pl,ai}$	3.6×10^{-3}	$[m \cdot s^{-1}]$	Stanghellini (1987)
$c_{v,O}$	0.85	-----	Calibración
$c_{v,1}$	611	$[J \cdot m^{-3}]$	Goudrian (1977)
$c_{v,2}$	17.4	-----	Goudrian (1977)
$c_{v,3}$	239	$[^\circ C]$	Goudrian (1977)
c_{window}	0.11	-----	Propiedad física
$c_{ws,1}$	2.46×10^{-4}	-----	Estim. de De Jong (1990)
$c_{ws,2}$	4.85×10^{-4}	-----	Estim. de De Jong (1990)

3.3.4. Modelo de Frank Tap.

Tap [Tap, 2000] describe un modelo de tres estados con tres ecuaciones diferenciales de primer orden, la primera es para la temperatura del aire del invernadero, y las unidades se muestran posteriormente:

$$C_g \frac{dT_g}{dt} = k_v(T_0 - T_g) + H + k_r(T_0 - T_g) + k_s(T_s - T_g) + \eta G \quad (50)$$

donde T_0 es la temperatura del aire externa, H es el calor de entrada (un control), T_s la temperatura del suelo del invernadero, G la radiación de onda corta entrante, C_g la capacidad de calor del invernadero, k_v coeficiente de transferencia de calor por ventilación, k_r coeficiente de transferencia de calor de la cubierta, k_s no es una constante pero es una función de la tasa de ventilación Φ_v :

$$k_v = M_{air} c_p \Phi_v \quad (51)$$

donde M_{air} es la densidad del aire y c_p es el calor específico del aire. Φ_v es una función de la velocidad del viento externo (w) y la apertura de ventanas r_w la cual es una variable de control.

$$\Phi_v = \kappa + \theta w + \nu w r_w \quad (52)$$

Donde κ , θ y ν son parámetros de la tasa de ventilación. La temperatura del suelo (T_s) es descrita por:

$$C_s \frac{dT_s}{dt} = -k_s(T_s - T_g) + k_d(T_d - T_s) \quad (53)$$

Donde C_s es la capacidad de calor del suelo del invernadero y k_d es el coeficiente de transferencia de calor de suelo a suelo. El modelo considera dos capas de suelo, la capa mas profunda tiene una temperatura constante T_d . La concentración de CO_2 del aire del invernadero (C_i) es descrita por la tercera ecuación diferencia:

$$\frac{A_g}{V_g} \frac{dC_i}{dt} = \Phi_v(C_0 - C_i) + \varphi_{inj} + R - \mu P \quad (54)$$

V_g/A_g es igual a la altura media del invernadero, C_0 es la concentración de CO_2 , φ_{inj} es el flujo de inyección de CO_2 la cual es una variable de control, R es la

respiración del cultivo, P es la fotosíntesis del cultivo y μ es la fracción de peso molar de CO_2 y H_2O . Los valores de R y P resultan del modelo del cultivo. Descripción de los parámetros del modelo de Tap.

Parámetro	Valor	Dimensión	Descripción
C_g	$32 \cdot 10^3$	$[J \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}]$	Capacidad de calor del invernadero
T_g	-----	$[^\circ\text{C}]$	Temperatura del aire del invernadero
k_v	-----	$[W \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}]$	Coeficiente de transferencia de calor de la ventilación
T_0	273.15	$[^\circ\text{C}]$	Cero absoluto
H	0-200	$[W \cdot \text{m}^{-2}]$	Entrada de calor
k_r	7.9	$[W \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}]$	Coeficiente de transferencia de calor de la cubierta
k_s	5.75	$[W \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}]$	Coeficiente de transferencia de calor del suelo
T_s	-----	$[^\circ\text{C}]$	Temperatura del suelo del invernadero
η	0.7	-----	Factor de conversión de radiación
G	20.3	$[W \cdot \text{m}^{-2}]$	Radiación de onda corta entrante
M_{air}	1.29	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	Densidad del aire
c_p	1010	$[J \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}]$	Calor específico del aire a presión constante
Φ_v	-----	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	Flujo de ventilación
κ	$5.03 \cdot 10^{-5}$	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	Parámetro de la tasa de ventilación
θ	$4.02 \cdot 10^{-5}$	-----	Parámetro de la tasa de ventilación
w	-----	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	Velocidad del viento fuera del invernadero
ν	$3.68 \cdot 10^{-5}$	$[\%^{-1}]$	Parámetro de la tasa de ventilación
r_w	0-100	$[\%]$	Apertura relativa de las ventanas
k_d	2	$[W \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}]$	Coeficiente de transferencia de calor de suelo a suelo
T_d	10	$[^\circ\text{C}]$	Temperatura del suelo profundo
A_g	-----	$[\text{m}]$	Altura del invernadero
V_g	-----	$[\text{m}^3]$	Volumen del invernadero
C_i	-----	$[\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$	Concentración de CO_2 en el invernadero
C_0	-----	$[\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$	Concentración de CO_2 en el exterior
ϕ_{ini}	$0-2.1 \cdot 10^{-3}$	$[\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}]$	Flujo de inyección de CO_2
R	-----	$[\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}]$	Respiración del cultivo
μ	1.4667	-----	Fracción de peso molar de CO_2 y H_2O
P	-----	$[\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}]$	Fotosíntesis del cultivo

3.3.5. Análisis de sensibilidad.

El análisis de sensibilidad es el estudio de cómo pueden ser repartidas la variación de las entradas del modelo, cualitativa o cuantitativamente, para diferentes fuentes de variación, y de cómo el modelo dado depende de la información alimentada en él, sobre esta base, se afirma que el análisis de sensibilidad es un requisito previo para el ajuste de un modelo construido, sea diagnóstico o pronóstico, y en cualquier campo donde se utilizan los modelos.

Los modelos se desarrollan para aproximar o imitar sistemas y procesos de diferente naturaleza (físicos, ambientales, sociales o económicos), y de complejidad variada. Muchos procesos son tan complejos que la experimentación física es una pérdida de tiempo, demasiado costosa, o aún imposible. Consecuentemente, para explorar sistemas y procesos, los investigadores recurren a menudo a los modelos matemáticos o de cómputo.

Un modelo matemático es definido por una serie de ecuaciones, factores de entrada, parámetros, y las variables que caracterizan el proceso investigado [Saltelli, 2000]. La entrada está sujeta a muchas fuentes de incertidumbre incluyendo errores de la medida, ausencia de información y comprensión pobre o parcial de las fuerzas impulsoras y de los mecanismos. Esto impone un límite de confianza en la respuesta o la salida del modelo. Además, los modelos tienen que hacer frente a la variabilidad intrínseca natural del sistema, por ejemplo la ocurrencia de eventos estocásticos.

La buena práctica del modelado requiere que el modelador proporcione una evaluación que de confianza en el modelo, posiblemente determinando las incertidumbres que se asocian al proceso de modelado y al resultado del modelo en si.

Originalmente, el análisis de sensibilidad fue creado simplemente para repartir las incertidumbres en las variables de entrada y los parámetros del modelo. Sobre el curso del tiempo, se han ampliado las ideas de incorporar la incertidumbre al concepto de modelo, incertidumbre en las estructuras del modelo y especificaciones. En general, el análisis de sensibilidad es usado para aumentar la confianza en el modelo y sus predicciones, proporcionando una comprensión de cómo las variables de respuesta del modelo responden a los cambios en las entradas, son los datos usados para calibrarlo, estructuras del modelo, o factores, y a las variables independientes del modelo. El análisis de sensibilidad se liga así al análisis de la incertidumbre, el cual ayuda a cuantificar la incertidumbre total asociada a la respuesta como resultado de incertidumbres en la entrada del modelo.

Dentro del proceso de desarrollo de un modelo matemático, el análisis de sensibilidad tiene la función de ayudar a evaluar la importancia relativa que las variables de entrada y los parámetros del modelo tienen sobre la evolución en el tiempo de las variables de estado del modelo. El análisis de sensibilidad puede

ayudar a entender que partes del modelo necesitan atención especial en el diseño de experimentos. Además permite una adecuada selección de los parámetros a ser estimados mediante un estudio de calibración del modelo.

Generalmente el análisis de sensibilidad es aplicado para evaluar el efecto de los parámetros sobre las salidas del modelo. Más interesante es estudiar las sensibilidades del modelo como una función del tiempo. Se puede estudiar mejor el comportamiento del modelo de esta forma. Aun cuando existen varias formas de calcular las sensibilidades de un modelo matemático, en modelos que tienen como objetivo el desarrollo de estrategias de control, parece más apropiado aplicar el enfoque denominado análisis de sensibilidad de primer orden alrededor de un punto nominal de parámetros. Esto implica la solución de las denominadas ecuaciones de sensibilidad junto con la integración de las variables de estado del modelo dinámico [Van Henten, 1994].

Un modelo dinámico de un invernadero es definido mediante la ecuación diferencial:

$$\dot{x} = f(x, u, p), x(t_0) = \beta \quad (55)$$

donde $x \in R^m$, $p \in R^q$ y $\beta \in R^n$.

El vector de estados (x) contiene las variables que caracterizan los procesos físicos más importantes dentro del invernadero, en este caso temperatura y humedad relativa, el vector de las entradas (u) contiene las variables de temperatura, el cual puede ser parametrizado mediante $u = g(t, \alpha), \alpha \in R^r$. El vector (p) representa los parámetros del modelo. Si $\alpha = \alpha^0, p = p^0, \beta = \beta^0$ denota parámetros nominales dentro de un rango físicamente factible, la ecuación diferencial tiene una solución nominal única $x^0 = x(t, \alpha^0, p^0, \beta^0)$. Entonces el análisis de sensibilidad de primer orden estudia los efectos de pequeñas variaciones en los parámetros α , p y β sobre las trayectorias de los estados. Expandiendo por lo tanto, $x = x(t, \alpha, p, \beta)$ alrededor de los vectores de los parámetros nominales α^0, p^0, β^0 , en una serie de Taylor y reteniendo solamente los términos producidos de primer orden se tiene:

$$\Delta x_i(t, p, \beta) \approx \sum_{j=1}^r \frac{\partial x_i^0}{\partial \alpha_j} \Delta \alpha_j + \sum_{k=1}^p \frac{\partial x_i^0}{\partial p_k} \Delta p_k + \sum_{l=1}^n \frac{\partial x_i^0}{\partial \beta_l} \Delta \beta_l \quad (56)$$

para toda $x_i, i = 1, \dots, n$, donde $\Delta \alpha, \Delta p$ y $\Delta \beta$ representan desviaciones de α^0, p^0, β^0 y $\frac{\partial x_i^0}{\partial \dots}$ denota la derivada parcial de x con respecto a la variable independiente evaluada en su valor nominal. Las sensibilidades de los estados con respecto a cada vector de parámetros expresadas como sigue:

$$S_{ij}^{\alpha}(t) \equiv \frac{\partial x_i^0}{\partial \alpha_j} \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, r; \quad (57)$$

$$S_{ik}^p(t) \equiv \frac{\partial x_i^0}{\partial p_k} \quad k = 1, \dots, q; \quad (58)$$

$$S_{il}^{\beta}(t) \equiv \frac{\partial x_i^0}{\partial \beta_l} \quad l = 1, \dots, n; \quad (59)$$

representan las sensibilidades de las trayectorias de los estados con respecto a pequeñas variaciones en los parámetros de entrada del modelo, los parámetros del sistema y las condiciones iniciales. Las sensibilidades son funciones del tiempo. Su evolución es gobernada por un conjunto de ecuaciones diferenciales denominado el sistema de sensibilidad.

La solución nominal del sistema puede ser representada mediante:

$$x(t, \alpha^0, p^0, \beta^0) = \beta^0 + \int_{t_0}^t f^0 d\tau \quad (60)$$

donde $f^0 = f(x^0, u^0, p^0)$ y usando las definiciones descritas previamente se obtiene la expresión:

$$s_j^{\alpha}(t) = \frac{\partial}{\partial \alpha_j} \left(\beta^0 + \int_{t_0}^t f^0 d\tau \right) = \int_{t_0}^t \left(\frac{\partial f^0}{\partial x^0} \frac{\partial f^0}{\partial \alpha} + \frac{\partial f^0}{\partial \alpha_j} \right) d\tau, \quad j = 1, \dots, q \quad (61)$$

en la cual $\partial f^0 / \partial x^0$ denota la matriz Jacobiana de dimensión $n \times n$ y $\partial f^0 / \partial \alpha^0$ es un vector de dimensión n . Entonces mediante la diferenciación de ambos miembros de la ecuación anterior con respecto al tiempo se obtiene:

$$\dot{s}_j^{\alpha} = \frac{\partial f^0}{\partial x^0} s_j^{\alpha} + \frac{\partial f^0}{\partial \alpha_j}, \quad s_j^{\alpha}(t_0) = 0, \quad j = 1, \dots, r \quad (62)$$

De la misma manera se pueden obtener las ecuaciones de sensibilidad para S^p y S^{β} .

$$\dot{s}_k^p = \frac{\partial f^0}{\partial x^0} s_k^p + \frac{\partial f^0}{\partial p_k}, \quad s_k^p(t_0) = 0, \quad k = 1, \dots, q \quad (63)$$

$$\dot{S}_l^\beta = \frac{\partial f^0}{\partial x^0} S_l^\beta + \frac{\partial f^0}{\partial \beta_l}, l=1,...,n \quad (64)$$

y

$$\dot{S}_{ij}^\beta(t_0) = \frac{\partial \beta_i}{\partial \beta_j} = 1, \text{ si } i = j \quad (65)$$

Usando nomenclatura matricial:

$$\dot{S}_k^P = A \cdot \dot{S}_k^P x M ; \text{ donde } A = \frac{\partial f^0}{\partial x^0}, M = \frac{\partial f^0}{\partial P_k} \quad (66)$$

$$\dot{S}_{ij}^\beta(t_0) = \frac{\partial \beta_i}{\partial \beta_j} = 0, \text{ si } i \neq j, \text{ para } i = 1,...,n \text{ y } j = 1,...,n \quad (67)$$

Usando nomenclatura matricial:

$$\dot{S}_k^P = A \cdot \dot{S}_k^P x M ; \text{ donde } A = \frac{\partial f^0}{\partial x^0}, M = \frac{\partial f^0}{\partial P_k}$$

El vector de sensibilidades S expresa el cambio de la trayectoria de estados por unidad de un pequeño cambio considerado. Para comparar el impacto que cada parámetro tiene sobre las trayectorias del sistema es conveniente expresar las sensibilidades como el cambio fraccional en la trayectoria de los estados que resulta del cambio fraccional en el valor del parámetro. Es decir una medida de sensibilidad relativa definida como sigue:

$$\bar{s}_{ij}^\alpha = s_{ij}^\alpha \cdot \frac{\alpha_j^0}{x_i^0}, \bar{s}_{ij}^p = s_{ik}^p \cdot \frac{p_k^0}{x_i^0}, \bar{s}_{il}^\beta = s_{il}^\beta \cdot \frac{\beta_l^0}{x_i^0} \quad (68)$$

La solución (integración, simulación) de las ecuaciones de sensibilidad pueden ser llevadas a cabo al mismo tiempo que la simulación del modelo original una vez que las derivadas parciales requeridas han sido calculadas analíticamente. Esto generalmente requiere la ayuda de algún software de procesamiento simbólico con el objetivo de eliminar errores.

Otra solución es calcular las derivadas parciales en forma numérica. De cualquier forma, la interpretación de las trayectorias de sensibilidad simuladas es relativamente simple, ya que si en el tiempo t la trayectoria de los estados es muy sensible a una pequeña variación de los parámetros, entonces la función de

sensibilidades S tendrá valores grandes positivos o negativos y viceversa.

3.3.6. Estimación de parámetros.

La calibración de un modelo matemático es el proceso de modificación de los valores de los parámetros del modelo para obtener un mejor ajuste entre la simulación y los datos observados. Generalmente los parámetros sujetos de calibración son aquellos que presentan incertidumbre, que afectan el comportamiento del modelo en forma más sensible, y que afectan el comportamiento del modelo en forma tal que se obtiene mejor ajuste entre las mediciones y datos simulados. En forma general calibración es cualquier procedimiento que permite extraer información cuantitativa con respecto a los parámetros del modelo a partir de observaciones o mediciones usando un modelo de simulación completo [Metselaar, 1999].

Generalmente el problema de calibración de un modelo dinámico se formula como un problema de optimización, en el cual, dado un conjunto de observaciones, el modelo y ciertas restricciones, se trata de determinar los parámetros estimados mediante su ajuste en forma iterativa de tal forma que una función objetivo es optimizada. La función objetivo es la medida de discrepancia la cual sintetiza una función de todas las diferencias entre los valores medidos y los valores observados. Las diferencias son llamadas los residuos.

Existen varios tipos de calibración de modelos; en la llamada calibración de distribución, los residuos son usados para estimar las varianzas y covarianzas de los parámetros. Analizando los residuos es posible identificar varias fuentes de error en el modelo por ejemplo errores en las mediciones, errores en los parámetros fijos o errores estructurales, es decir, en la formulación matemática del modelo. Si los residuos son determinados por errores en las mediciones la calibración de distribución es posible. El problema con la calibración de distribución es que puede ser ejecutada eficientemente solamente si el modelo puede ser aproximado mediante funciones lineales de los parámetros. Además, normalmente los conjuntos de datos son pequeños comparados con el número de parámetros a ser estimados. Por lo tanto una selección de parámetros es necesaria y esto introduce errores en los parámetros fijos de magnitud desconocida. Por eso la calibración de distribución no se puede garantizar. Por lo anterior, el tipo de calibración empleada para estimar parámetros en modelos físicos de un invernadero es una calibración puntual, basada en un número de parámetros seleccionados.

Otro problema presente en estimación de parámetros de un modelo es que algunos parámetros no pueden ser estimados individualmente, es decir, diferentes combinaciones de valores de los parámetros producen valores óptimos de la medida de discrepancia, esto se conoce como problema de identificabilidad de los parámetros [Ljung, 1999]. Para poder identificar en forma más precisa los valores de los parámetros estimados e incrementar así la calidad de la estimación el número de parámetros a ser estimados a partir de los datos es reducido manteniendo fijos una cantidad considerable de ellos. Esto obviamente incrementa

el error generado por los parámetros que se mantienen en su valor nominal, sin embargo la justificación es que en modelos con muchos parámetros, lo cual es frecuente en modelos no-lineales, se trata de reducir el problema de identificabilidad. Es por lo tanto importante en todo método de estimación de parámetros, determinar aquellos parámetros correlacionados para eliminarlos del proceso de calibración.

Otro problema importante con cualquier tipo de calibración de modelos es la dependencia de los valores estimados de los parámetros, del valor inicial empleado para inicializar el proceso de optimización. La sensibilidad de la solución a cambios en las condiciones iniciales es siempre investigada repitiendo la calibración con diferentes valores. Si las soluciones son diferentes entonces el problema tiene muchas soluciones locales, es multimodal. Si diferentes inicializaciones resultan en la misma solución y esta es el valor más bajo que pueda alcanzar la medida de discrepancia, la solución es entonces el óptimo global. En procesos de calibración de modelos de crecimiento de cultivos y en general en modelos de sistemas biológicos se han encontrado dificultades como las siguientes: problemas de identificabilidad de los parámetros (parámetros correlacionados), discontinuidades en la medida de discrepancia como una función de los parámetros y la presencia de óptimos locales.

La calibración puntual es un método de calibración de modelos que produce un vector de valores de los parámetros mediante el uso de un algoritmo de estimación de parámetros [Metselaar,1999]. Las cuestiones que se necesitan resolver en este caso son tres: i) selección de una medida de discrepancia apropiada, ii) selección del conjunto de parámetros a ser estimados y iii) selección del algoritmo de optimización que será empleado.

Generalmente en los estudios de calibración que utilizan un algoritmo de optimización como mínimos cuadrados medios utilizan una función objetivo como la función J igual a la suma ponderada del cuadrado de los errores.

$$J = \sum_{h=1}^L \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N w_h \left(\hat{y}_h(t_i, p) - y_{hj}(t_i) \right)^2, p^* = \arg \min J(p) \quad (69)$$

Donde w_h es el peso relativo de salida, $\hat{y}(t_i, p)$ representa la salida simulada y_h en el tiempo t_i , $y_{hj}(t_i)$ en la j -ésima repetición de la medición y_h en el tiempo t_i .

Uno de los métodos de optimización más empleados es el método de mínimos cuadrados medios (Least Mean Squares) o mínimos cuadrados medios logarítmicos (Logarithmic Least Mean Squares). Sin embargo, esto requiere que la función objetivo posea segunda derivada con respecto a los parámetros. Generalmente este método converge a una solución local y no al óptimo global. Es aconsejable por lo tanto emplear un método robusto para estimación de parámetros tales como los métodos directos de optimización que no presenta la restricción de diferenciabilidad de la función objetivo como el método Simplex de

Nelder y Mead o métodos estocásticos que han demostrado ser poderosos métodos globales de optimización como los algoritmos Controlled Random Search de Price. Esto implica de una función objetivo más general, una buena opción es la siguiente:

$$C_j' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_{i,j}| \quad (70)$$

donde $e_{i,j} = \hat{y}_{i,j} - y_{i,j}$ es el residuo en el tiempo de muestreo i ($i=1,\dots,n$) para la variable de salida j ($j=1,\dots,m$).

$\hat{y}_{i,j}$ denota la salida del modelo para la variable j en el tiempo i .

$y_{i,j}$ representa el valor medido de la variable j en el tiempo i .

4. PROCEDIMIENTO

4.1. Descripción del invernadero.

El invernadero utilizado en la investigación está situado a $19,29^\circ$ latitud norte y $98,53^\circ$ longitud oeste, a una altitud de 2244 msnm, en el campo experimental Tlapeaxco de la Universidad Autónoma Chapingo (figuras 3, y 4), es del tipo conocido como baticenital; son tres túneles de 9 m de ancho, unidos entre si, con ventanas cenitales cada uno, estos invernaderos son ideales para climas cálidos y tropicales sin embargo en México se utilizan con regularidad en climas templados. Las dimensiones del invernadero son: 40 m de largo por 27 m de ancho, con una altura de 5.2 m, teniendo un área cubierta de 1080 m^2 y un volumen aproximado de 4400 m^3 , el tipo de cubierta es polietileno de una capa calibre 700 ultravioleta, con una vida útil de 2 años. Cuenta con ventanas laterales, frontales y cenitales, protegidas con malla antiáfidos de 45×25 hilos, estas ventanas se cierran por medio de malacates y cubren una superficie de 388 m^2 o el 36% de la superficie cultivada, el porcentaje es bastante bueno ya que el valor óptimo del área de ventilación (superficie de ventanas) está comprendido entre el 20 y el 40% de la superficie del invernadero. Además, es conveniente que la superficie de aberturas cenitales suponga como mínimo la mitad de la superficie de ventilación, para así facilitar la renovación del aire por efecto chimenea cuando la velocidad del viento es pequeña. La única forma de controlar la temperatura es con calefacción en los meses fríos y con ventilación natural en los meses cálidos. El invernadero no tenía piso y las plantas estaban sembradas a ras de suelo, que era tezontle. La toma de datos se comenzó el 1 de marzo del 2004 y las plantas estaban pequeñas, se habían transplantado una semana antes de la toma de datos.

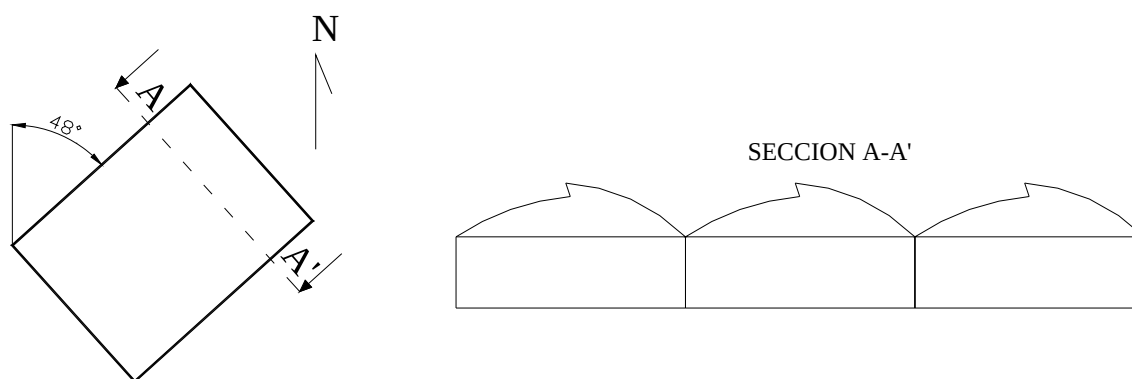


Figura 3. Orientación del invernadero donde se realizó el muestreo de datos.



Figura 4. Invernadero del campo Tlapeaxco, Chapingo.

4.2. Adquisición de datos y sensores.

Las entradas del modelo de Temperatura son la radiación, la temperatura, la velocidad del viento externas y la apertura de ventanas, y las del modelo de Humedad son las anteriores mas la humedad absoluta externa (figura 5). También se presentan la temperatura y la humedad relativa internas (figura 6) medidas, que son las variables a modelar (datos de 18 días del mes de abril del 2004), y los datos con los que se hizo la validación del modelo del 1 al 12 de mayo del 2004 (figura 9) .

Para poder obtener un buen rendimiento del cultivo y buenas calidades en los productos es necesario considerar las condiciones climáticas del invernadero, mantener un rango óptimo de temperatura y humedad relativa para evitar el stress del cultivo y la propagación de enfermedades, para esto es necesario llevar un registro de dichas variables y tomar las medidas pertinentes para mantenerlas en sus rangos óptimos.

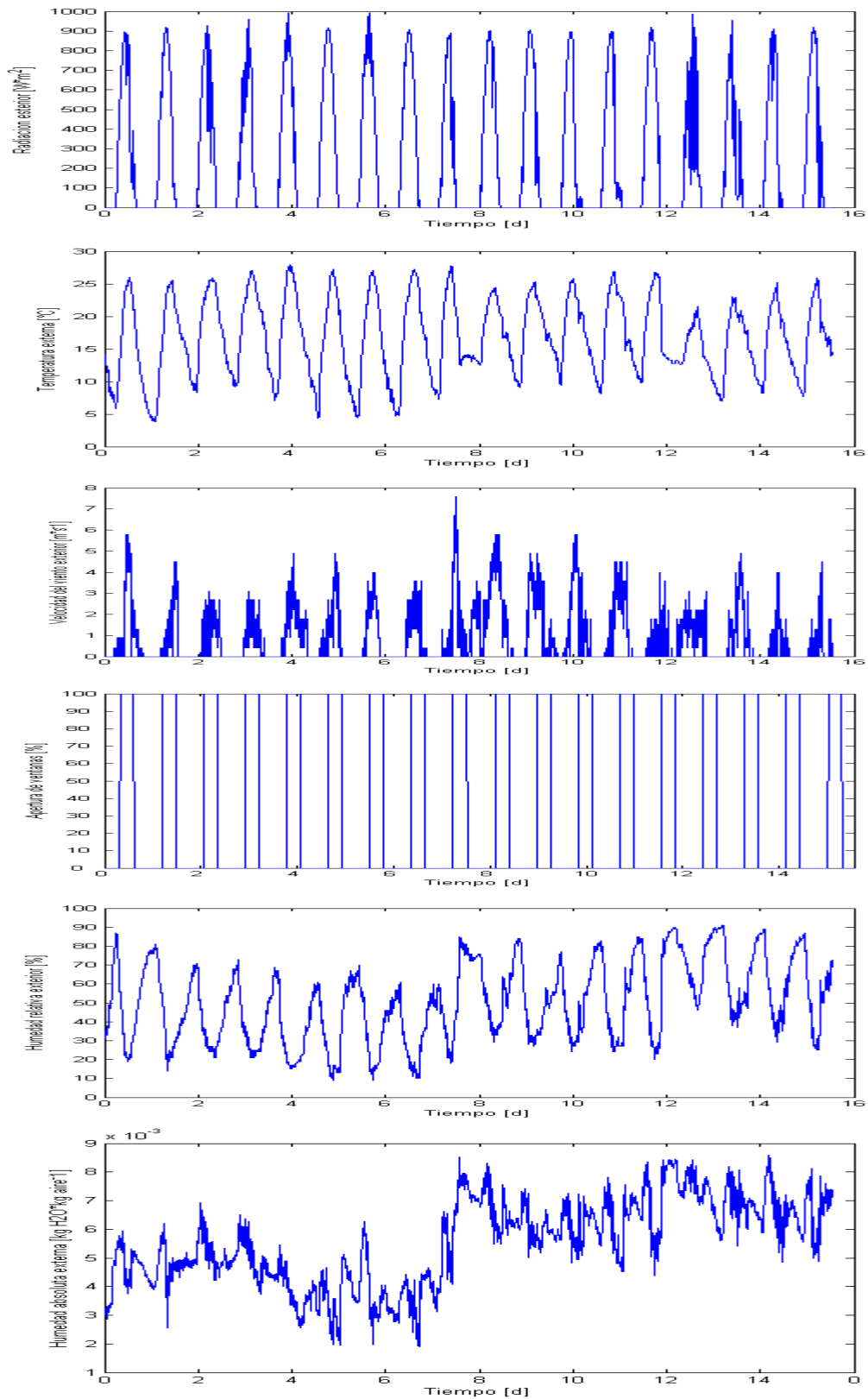


Figura 5. Variables de entrada del modelo de Temperatura y Humedad.

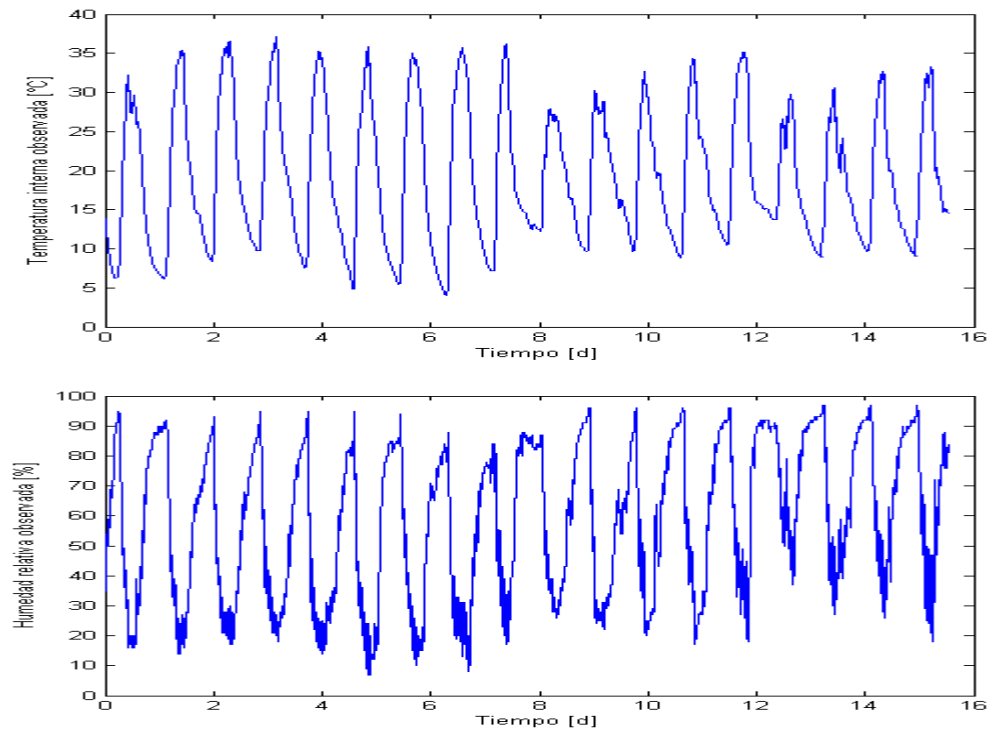


Figura 6. Temperatura y Humedad relativa interna observada.

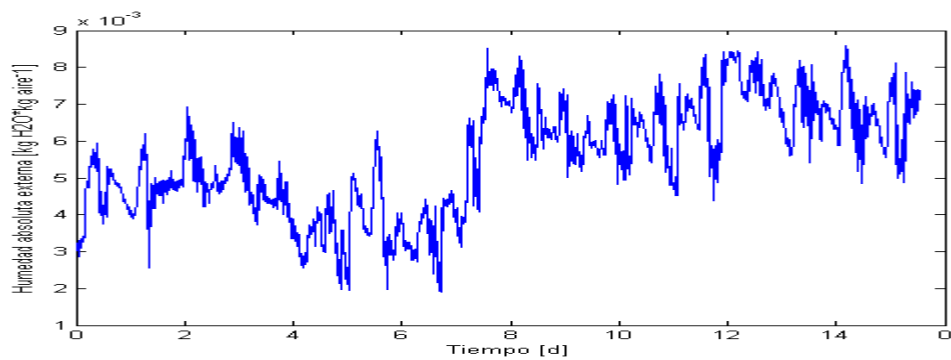


Figura7. Humedad absoluta exterior.

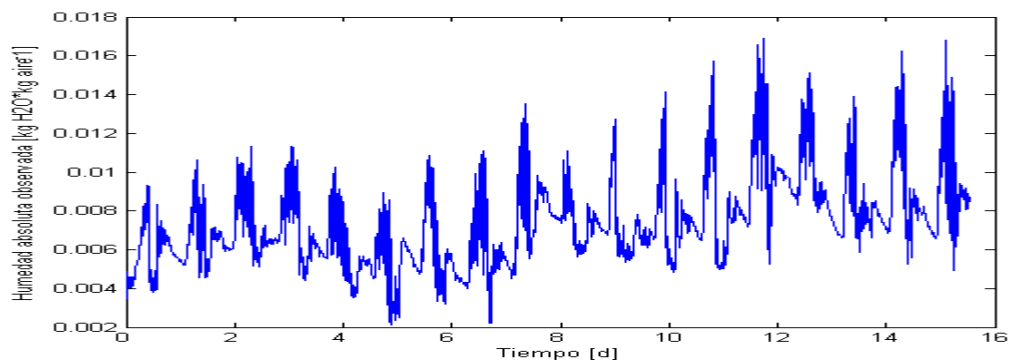


Figura 8. Humedad absoluta interior observada.

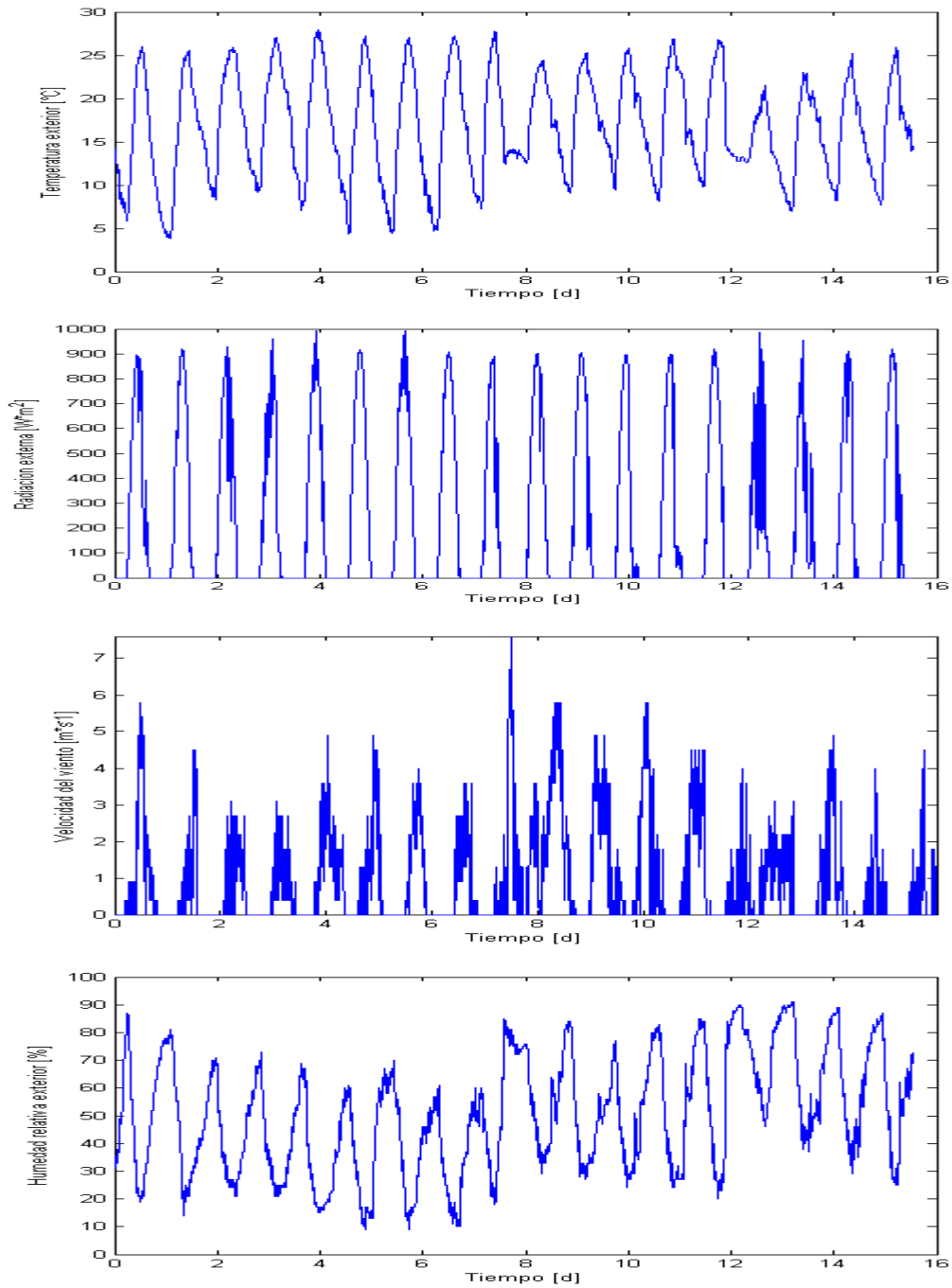


Figura 9. Variables de entrada del modelo de Temperatura y Humedad del mes de mayo del 2004 (conjunto de datos de validación).

4.2.1. Sensores de Temperatura.

Termopar. Este consta de dos metales unidos en una punta y cuya característica es producir una corriente eléctrica proporcional a la temperatura que se le aplica a dichos metales, el principio de medición de temperatura utilizando termopares se basa en tres principios físicos, que son:

Efecto Seebeck: al unir dos cables de materiales diferentes formando un circuito, se presenta una corriente eléctrica cuando una de las juntas es calentada.

Efecto Peltier: cuando una corriente eléctrica fluye a través de una junta de dos metales diferentes, se libera o absorbe calor. Cuando la corriente eléctrica fluye en la misma dirección que la corriente Seebeck, el calor es absorbido en la junta caliente y liberado en la junta fría.

Efecto Thomson: un gradiente de temperatura en un conductor metálico está acompañado por un gradiente de voltaje, cuya magnitud y dirección depende del metal que se esté utilizando.

Para obtener los datos de temperatura se utilizó un sensor de la marca HOBO (tabla 2).

Tabla 2. Características del sensor de Temperatura HOBO.

Especificaciones	
Rango de medición	-40°C a 75 °C (-40 °F a 167 °F)
Exactitud	± 0.7 °C a 25 °C (1.3 °F a 77 °F)
Resolución	0.4 °C a 25 °C (0.7 °F a 77 °F)
Deriva	< 0.1 °C (0.2 °F) por año
Calibración	N/A
Tiempo de respuesta	8 minutos, típico a 90% en 2 m*s ⁻¹ (4.5 mph) de flujo de aire
Rango de funcionamiento de la temperatura	-40 °C a 75 °C (-40 °F a 167 °F)
Cubierta	Acero inoxidable
Dimensiones	1.6 cm x 10 cm (5/8 in x 4 in)
Bits por muestra	8
Medida promedio	No

4.2.2. Sensores de Radiación.

Las medidas de radiación pueden ser las siguientes: radiación global (300 a 2500 nm), radiación fotosintéticamente activa (400 a 700 nm), radiación neta (300 a 25000 nm) e intensidad de la luz (380 a 760 nm).

Los instrumentos para medir la radiación pueden ser clasificados como: radiómetros, fotómetros y medidores quantum. Los radiómetros con cobertura de vidrio pueden medir el espectro de 300 a 3000 nm, estos convierten la energía radiante a calor. Un aumento en la temperatura es medido y calibrado para dar una salida adecuada en unidades tales como W/m^2 . Estos no son considerados sensibles a las longitudes de onda.

Otros transductores, tales como celdas de selenio o fotodiodos pueden ser calibrados para medir la radiación solar, pero su respuesta es no lineal. Medidores quantum, para la medición de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) comprendidos en la banda de 400 a 700 nm, tienen una lámina de silicón la cual tiene un semiconductor a través del cual pasa la corriente. Cuanto mas luz visible incide sobre el silicón, la resistencia decrece y la magnitud de la corriente aumenta.

Los fotómetros no detectan energía radiante por arriba o debajo del espectro visible, estos funcionan de una forma muy similar a los medidores quantum.

Los dispositivos usados en la horticultura para medir la radiación, son generalmente los siguientes:

Piradiómetro: Radiación de onda corta y larga.

Piranómetro: Radiación global, que es la suma de la radiación directa y la difusa.

Medidores quantum: PAR. Para la toma de datos de radiación se utilizó el piranómetro de silicio de la marca HOBO (tabla 3).

Tabla 3. Características del sensor de radiación HOBO.

Especificaciones	Piranómetro de silicio
Rango de medición	0 a 1280 $W \cdot m^{-2}$
Rango espectral	300 a 110 nm
Exactitud	$\pm 10 W \cdot m^{-2}$ o 5 %
Exactitud angular	0 a 80 grados de acimut vertical
Resolución	1.25 $W \cdot m^{-2}$
Deriva	$< \pm 2$ % por año
Grado ambiental	A prueba de mal tiempo
Calibración	Recalibración de fábrica
Rango de temperatura de operación	-40 °C a 75 °C
Peso	120 g

4.2.3. Sensores de Humedad Relativa.

Para medir la humedad relativa en los invernaderos se usan principalmente dos instrumentos:

a) Psicométrico (bulbo seco y bulbo húmedo). La temperatura de dos sensores es necesaria, la del aire y la de una superficie evaporando libremente. Estas son la temperatura de bulbo seco (WBT) y bulbo húmedo (DBT) respectivamente. El sensor WBT esta adjunto a una mecha húmeda de la cual el agua puede evaporar libremente. Para la evaporación del agua el calor es necesario. Este calor es extraído del sensor WBT. Por ejemplo: si la humedad esta bajando, mas agua se evaporará de la mecha y el sensor WBT medirá una temperatura baja. Cuando el DBT y WBT son conocidos, la humedad relativa puede ser leída del diagrama de Mollier. Este tipo de instrumento para medir HR debe tener un mantenimiento constante ya que el deposito de agua que contiene la mecha que va adjunta al sensor de bulbo húmedo siempre debe tener agua suficiente. Requiere de un mínimo de velocidad del aire dependiendo del diámetro del WBT entre 2 y 4 m/s , con una precisión de $\pm 5\%$ en la medición de HR.

b) Capacitivo. Son quizás los mas difundidos en la industria y meteorología, pues son los de fácil producción, bajo costo, y alta fidelidad. El principio en el cual se basa este tipo de sensores, es en el cambio que sufre la capacitancia de un condensador al variar la constante dieléctrica del mismo. Este sensor está formado por una película delgada de polímero como dieléctrico colocado entre dos electrodos vapor-permeables. Cuando el vapor de agua se difunde en el polímero, la constante dieléctrica del polímero cambia y por lo tanto la capacitancia . La capacitancia puede ser medida eléctricamente por comparación con una capacitancia de referencia fija. Donde el valor de la capacitancia esta relacionado directamente con la humedad relativa. Estos dispositivos son del tipo circuito integrado. Actúan como fuentes de voltaje constantes y nos entregan un voltaje proporcional a la humedad relativa. Para realizar las mediciones se utilizó un sensor de la marca HOB0 (tabla 4).

Tabla 4. Características del sensor de Humedad Relativa HOBO.

Especificaciones	
Rango de medición	0 a 100% RH entre 0 °C y 50 °C (32 °F y 122 °F)
Exactitud	± 3%; ± 4% en ambientes condensados
Resolución	0.5 % RH a 25 °C (77 °F)
Deriva	± 1% RH por año
Calibración	N/A
Tiempo de respuesta	8 minutos, típico a 90% en 2 m*s ⁻¹ (4.5 mph) de flujo de aire
Rango de funcionamiento de la temperatura	-40 °C a 75 °C (-40 °F a 167 °F)
Cubierta	Acero inoxidable
Dimensiones	1.6 cm x 10 cm (5/8 in x 4 in)
Bits por muestra	8

4.2.4. Anemómetros y Veletas.

La medición de la velocidad del viento se realiza propiamente con instrumentos conocidos como anemómetros de cazoletas. Está conformado por tres o cuatro medias esferas que giran con la acción del viento. El eje vertical de este mecanismo se apoya en un balero y en un pivote conectado a un sistema de contacto que abre y sierra cada vuelta o media vuelta. Este tipo de anemómetro muestra un error no lineal a velocidades del viento bajas, y un umbral debido a la fricción a velocidades del viento cercanas a cero.

La medición de la dirección del viento se realiza por medio de una veleta la cual indica la dirección hacia donde el viento sopla. El ángulo es determinado de la medida de una resistencia variable. Esta debe ser orientada adecuadamente mediante una brújula. Métodos no tradicionales, tales como dispositivos sónicos, láser y anemómetros de microondas, pueden ser usados también. Para realizar las mediciones de la dirección y velocidad del viento se utilizaron sensores marca HOBO (tabla 5).

Tabla 5. Especificaciones del sensor de dirección y velocidad del viento HOBO.

Especificaciones	Velocidad del viento	Dirección del viento
Rango de medición	0 a 44 $m \cdot s^{-1}$ (0 a 99 mph)	0 a 358 grados, 2 grados banda muerta
Exactitud	$\pm 0.5 m \cdot s^{-1}$ (± 1.1 mph) $\pm 3\%$ 17 a 30 $m \cdot s^{-1}$ $\pm 4\%$ 30 a 44 $m \cdot s^{-1}$	± 5 grados
Resolución	0.19 $m \cdot s^{-1}$	1.4 grados
Umbral	0.5 $m \cdot s^{-1}$	0.5 $m \cdot s^{-1}$
Cociente de humedad	NA	0.4
Distancia constante	Aproximadamente 3 m	0.8 m
Velocidad máxima del viento	54 $m \cdot s^{-1}$	
Rango de temperatura	-40 °C a 75 °C	
Grado ambiental	A prueba de mal tiempo	
Radio del eje	108 mm	
Numero de canales de datos	3	

4.3. Implementación del modelo de Temperatura y Humedad.

La implementación del modelo se hizo en MATLAB-SIMULINK y se describe en el apéndice 2; consta de un programa principal donde se definen las variables del modelo de Temperatura y Humedad y un archivo MEX-file donde se programan las ecuaciones del modelo para que corra mas rápido que es llamado por el programa principal a través de una rutina mdl, se utilizó la rutina de integración Runge Kuta de segundo orden en lenguaje C de paso variable ode23s y una tolerancia relativa de 0.00000001.

4.4. Metodología del análisis de sensibilidad.

Se realizó un análisis de sensibilidad local siguiendo la metodología descrita en el capítulo 3 [Van Henten, 1994], mediante la ecuación 56 en forma matricial, descrita detalladamente con las ecuaciones 71 y 74; y se presentan las gráficas de sensibilidad y la forma numérica con la simulación descrita en el apéndice 3, que fue obtenida mediante la ecuación 75 en el capítulo 5. Se obtuvo una matriz A de dimensión 3x3, y una matriz M de dimensión 3x19; haciendo un total de 60 ecuaciones de sensibilidad, que se muestran en el apéndice 1.

$$\frac{dS_{ij}}{dt} = A_{ij}S_{ij} + m_{ij} \quad \text{donde } i = 1, \dots, 3 \text{ y } j = 1, \dots, 19 \quad (71)$$

$$\frac{dS_{1j}}{dt} = a_{11}S_{1j} + a_{12}S_{2j} + a_{13}S_{3j} + m_{1j} \quad (72)$$

$$\frac{dS_{2j}}{dt} = a_{21}S_{1j} + a_{22}S_{2j} + a_{23}S_{3j} + m_{2j} \quad (73)$$

$$\frac{dS_{3j}}{dt} = a_{31}S_{1j} + a_{32}S_{2j} + a_{33}S_{3j} + m_{3j} \quad (74)$$

$$I = \int_{t_0}^{t_f} |S_{real}| dt \quad (75)$$

4.5. Procedimiento de estimación de parámetros.

Se utilizó un algoritmo de optimización como mínimos cuadrados medios con una función objetivo como la función J igual a la suma ponderada del cuadrado de los errores (ecuación 76). Pero no se obtuvo el resultado esperado, tal vez por algún error en la programación; y sabiendo cuales son los parámetros más importantes del modelo resultado del análisis de sensibilidad se hizo un ajuste manual del modelo obteniendo buenos resultados en la temperatura y no así en la humedad.

$$J = \sum_{h=1}^L \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N w_h \left(\hat{y}_h(t_i, p) - y_{hj}(t_i) \right)^2, p^* = \arg \min J(p) \quad (76)$$

Donde w_h es el peso relativo de salida, $\hat{y}(t_i, p)$ representa la salida simulada y_h en el tiempo t_i , $y_{hj}(t_i)$ en la j -ésima repetición de la medición y_h en el tiempo t_i .

4.6. Procedimiento de validación del modelo.

La validación del modelo se hizo con datos colectados del 1 al 12 de mayo del 2004, que es un conjunto de datos diferentes a los que se realizó la calibración que fueron datos del 1 al 18 de abril ver figura 15.

5. RESULTADOS Y DISCUSION

5.1. Estructura del modelo.

5.1.1. Modelo para la temperatura del aire.

Lo primero que se debe tener en cuenta que cualquier parte del invernadero puede actuar como cuerpo individual o volumen. Cuando el transporte de energía o masa son considerados, la ley de conservación es válida para cualquier volumen.

Si una cantidad de energía por unidad de tiempo (Q_{ent}) entra a un volumen, entonces la cantidad de energía en el volumen (Q_{Tot}) se incrementa. Y por supuesto si un flujo de energía (Q_{sal}) sale, Q_{Tot} decrecerá. La relación en la cual se compara la entrada y la salida de flujos es llamada balance. Se puede llevar a cabo un balance de masa o energía para cualquier volumen. No solo los flujos de energía entrantes y salientes contribuyen a incrementar o decrementar la energía en un volumen, sino también la producción de energía (Q_{pro}) en el volumen. De estas consideraciones el balance de energía sobre cualquier volumen puede ser descrito como:

$$Q_{Tot} = Q_{ent} - Q_{sal} + Q_{pro} \quad (77)$$

Y el cambio en el tiempo de la energía por unidad de tiempo en el volumen total se expresa:

$$\frac{dQ_{Tot}}{dt} = Q_{ent} - Q_{sal} + Q_{pro} \quad (78)$$

Este es determinado por los términos del lado derecho, los cuales son respectivamente, los flujos entrantes Q_{ent} , los flujos salientes Q_{sal} y la producción de energía Q_{pro} por unidad de tiempo en el volumen considerado.

La cantidad de energía Q_{Tot} en el volumen está directamente relacionada con la temperatura T del volumen a través de su capacidad calorífica CP_{aire} , la densidad en ese volumen ρ_{aire} y dicho volumen V_{grh} :

$$Q_{Tot} = V_{grh} \cdot \rho_{aire} \cdot CP_{aire} \cdot T \quad (79)$$

De esta forma, la razón de cambio de la energía interna es trasladada a razón de cambio de la temperatura que se puede expresar como:

$$V_{grh} \rho_{aire} CP_{aire} \frac{dT}{dt} = Q_{ent} - Q_{sal} + Q_{pro} \quad (80)$$

El balance de energía del volumen del invernadero queda de la siguiente manera considerando tan la temperatura del suelo para una capa:

$$V_{grh} \rho_{aire} CP_{aire} \frac{dT_{in}}{dt} = Q_{sol} - Q_{vent} - Q_{convec} + Q_{suelo} = f1 \quad (81)$$

Donde la radiación solar Q_{sol} que entra al sistema se describe por:

$$Q_{sol} = \varepsilon \cdot A_{cl} \cdot Rad_{out} \quad (82)$$

Pérdida de calor mediante ventilación (Q_{vent}).

$$Q_{vent} = F_{vent} \cdot \rho_{aire} \cdot CP_{aire} (T_{in} - T_{out}) \quad (83)$$

El flujo de ventilación (F_{vent}) de acuerdo con Tap [2000].

$$F_{vent} = (\kappa + \theta \cdot V_{speed} + \eta \cdot V_{speed} \cdot A_{win}) \quad (84)$$

La pérdida de calor por convección (Q_{convec}):

$$Q_{convec} = \alpha_{cl} \cdot A_{cl} (T_{in} - T_{out}) \quad (85)$$

Calor aportado por la capa del suelo (Q_{suelo}):

$$Q_{suelo} = k_s \cdot A_{cl} (T_s - T_{in}) \quad (86)$$

Las unidades son:

V_{grh}	$[m^3]$	Volumen del invernadero.
ρ_{aire}	$[kg_{aire} \cdot m^{-3}]$	Densidad del aire.
CP_{aire}	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Calor específico del aire.
T_{in}	$[^{\circ}C]$	Temperatura interna del invernadero.
T_{out}	$[^{\circ}C]$	Temperatura externa del invernadero.
Q_{sol}	$[W \cdot s^{-1}]$	Calor debido a la radiación.
Q_{vent}	$[W \cdot s^{-1}]$	Calor perdido por ventilación.
Q_{convec}	$[W \cdot s^{-1}]$	Calor perdido por convección.

Q_{suelo}	$[W \cdot s^{-1}]$	Calor aportado por el suelo.
F_{vent}	$[m \cdot s^{-1}]$	Flujo de ventilación.
κ	$[m \cdot s^{-1}]$	Parámetro de la tasa de ventilación.
θ	-----	Parámetro de la tasa de ventilación.
V_{speed}	$[m \cdot s^{-1}]$	Velocidad del viento.
η	$[\%^{-1}]$	Parámetro de la tasa de ventilación.
A_{win}	$[m^2]$	Área de las ventanas.
A_{cl}	$[m^2]$	Área del invernadero.
ε	$[\%]$	Coefficiente de transmisión del invernadero.
Rad_{out}	$[W \cdot m^{-2}]$	Radiación externa.
α_{cl}	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	Coefficiente de conductividad térmica del suelo.
k_s	$[W \cdot ^\circ C^{-1} \cdot m^{-2}]$	Coefficiente de transferencia de calor del suelo.

La ecuación de la temperatura del suelo considerando una sola capa y una temperatura base.

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{1}{C_s} [-Q_{suelo-aire} + Q_{suelo-suelo} + Q_{sm}] = f^3 \quad (87)$$

Intercambio de calor entre el suelo y el aire ($Q_{suelo-aire}$):

$$Q_{suelo-aire} = k_s \cdot A_{cl} (T_s - T_{in}) \quad (88)$$

Donde el intercambio de calor entre la superficie del suelo y una capa inferior ($Q_{suelo-suelo}$):

$$Q_{suelo-suelo} = k_d (T_d - T_s) \quad (89)$$

Radiación absorbida por la capa del suelo (Q_{sm}):

$$Q_{sm} = \alpha_m \cdot Rad_{out} \cdot \varepsilon \quad (90)$$

Las unidades son:

$Q_{suelo-aire}$	$[W \cdot s^{-1}]$	Calor aportado por el suelo.
$Q_{suelo-suelo}$	$[W \cdot s^{-1}]$	Calor retenido por el suelo.
Q_{sm}	$[W \cdot s^{-1}]$	Calor en las capas del suelo.
C_s	$[J \cdot ^\circ C^{-1} \cdot m^{-2}]$	Capacidad de calor del suelo.

Rad_{out}	$[W \cdot m^{-2}]$	Radiación externa.
k_s	$[W \cdot ^\circ C^{-1} \cdot m^{-2}]$	Coeficiente de transferencia de calor del suelo.
k_d	$[W \cdot ^\circ C^{-1} \cdot m^{-2}]$	Coeficiente de transferencia de calor del suelo-suelo
ε	$[\%]$	Coeficiente de transmisión del invernadero.
A_{cl}	$[m^2]$	Área del invernadero.
T_{in}	$[^\circ C]$	Temperatura interna del invernadero.
T_s	$[^\circ C]$	Temperatura del suelo.
T_d	$[^\circ C]$	Temperatura base del suelo.
α_m	$[W \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$	Factor de calor absorbido por el suelo.

5.1.2. Modelo para la humedad absoluta.

Dos de las variables que forman parte del proceso son las humedades interior y exterior, el contenido de H_2O en el aire del invernadero puede expresarse de distintas formas: como humedad absoluta $[kg_{agua} \cdot kg_{aire}^{-1}]$, como humedad relativa (HR en $[\%]$) o como déficit de saturación (Di $[kPa]$). Dependiendo de su utilización se expresará de una forma u otra, en cualquier caso se puede pasar de una representación a otra aplicando las expresiones siguientes:

La humedad absoluta corresponde a:

$$H = \frac{kg_{H_2O}}{kg_{aire}} \quad (91)$$

La humedad relativa se mide en tanto por cien y corresponde a:

$$HR = 100 \frac{H_{in}}{H_{sat}} \quad (92)$$

Donde x_{sat} es la humedad absoluta de saturación a la temperatura T que puede ser calculada mediante la expresión:

$$H_{sat} = 0.611 \frac{p_{sat}(T)}{P} \quad (93)$$

$p_{sat}(T)$ y P son la presión de saturación a la temperatura T y presión absoluta respectivamente medidas en $[kPa]$ Si no se mide la presión se suele tomar, en el

contexto de un invernadero, la presión de una atmósfera $P=98.1$ [kPa]. La presión de saturación a una temperatura determinada se calcula con:

$$p_{sat}(T) = 0.61064 \left(1 + 1.4142136 \sin(5.81776 * 10^{-3} T) \right)^{8.827} \quad (94)$$

La temperatura se mide en [°C]

El déficit de saturación D (expresado en [kPa]) se obtiene mediante:

$$D = p_{sat}(T) \left[1 - \frac{HR}{100} \right] \quad (95)$$

La ecuación diferencial del modelado de la humedad se obtiene usando la ecuación de balance de masas donde intervienen varios flujos (todos se miden en $[kg \cdot s^{-1}]$):

1.- Flujo de renovación debido a la abertura de la ventana (Φ_{inter}).

2.- La evapotranspiración del cultivo (ETP).

Dando como resultado la siguiente ecuación diferencial:

$$\rho_{aire} \cdot V_{grh} \frac{dH_{in}}{dt} = \Phi_{inter} + C_{vapo} \cdot ETP = f_2 \quad (96)$$

donde:

$$C_{vapo} = 1 \quad \text{si} \quad H_{in} < H_{sat}$$

$$C_{vapo} = 0 \quad \text{si} \quad H_{in} = H_{sat} \quad (97)$$

ρ_{aire}	$[kg_{aire} \cdot m^{-3}]$	Densidad del aire.
H_{in}	$[kg_{H_2O} \cdot kg_{aire}^{-1}]$	Humedad absoluta interior.
V_{grh}	$[m^3]$	Volumen del invernadero.
C_{vapo}	-----	Coficiente de
--	evapotranspiración.	

Esta ecuación es válida mientras $H_{in} < H_{sat}$ (equivalente a $HR_i < 100\%$), el volumen de aire tiene una capacidad máxima de agua dependiendo de la temperatura a la que se encuentre.

El flujo de renovación Φ_{inter} , se obtiene:

$$\Phi_{inter} = \varpi_{venth} \cdot \rho_{aire} (H_{out} - H_{in}) \quad (98)$$

donde:

ρ_{aire}	$[kg_{aire} \cdot m^{-3}]$	Densidad del aire.
H_{in}	$[kg_{H_2O} \cdot kg_{aire}^{-1}]$	Humedad absoluta interior.
ϖ_{venth}	$[m^3 \cdot s^{-1}]$	Caudal de renovación.
H_{out}	$[kg_{H_2O} \cdot kg_{aire}^{-1}]$	Humedad absoluta exterior.

El cálculo del caudal de renovación de aire ϖ_{venth} se tomó del modelo de Tap [2000], y se representada como sigue:

$$\varpi_{venth} = (\kappa + \varphi \cdot V_{speed} + \nu \cdot V_{speed} \cdot \mu_{win}) \quad (99)$$

donde:

κ	$m \cdot s^{-1}$	Parámetro de la tasa de ventilación.
φ	$J \cdot g^{-1}$	Energía de vaporización del agua.
V_{speed}	$m \cdot s^{-1}$	Velocidad del viento.
ν	$kPa \cdot ^\circ C^{-1}$	Constante psicrométrica aparente.
μ_{win}	%	Apertura de ventanas.

La evapotranspiración se formula tomando como base la ecuación de Penman-Monteith:

$$E = \frac{A_{cl} (\Delta \cdot Rn + 2L \cdot \rho_{aire} \cdot CP_{aire} \cdot D_i \cdot gwb)}{\left(\Delta + \gamma \left(1 + \frac{gwb}{gws} \right) \right) \lambda} \quad (100)$$

Calor latente de vaporización:

$$\lambda = (3.1468 - 0.002365(T + 273.16))10^6 \quad (101)$$

Donde T_{in} será la temperatura interna del invernadero en $[^\circ C]$.

Pendiente de la curva de saturación:

$$\Delta = p_{sat}(T + 0.5) - p_{sat}(T - 0.5) \quad (102)$$

Radiación en el invernadero:

$$S_s = \varepsilon \cdot Rad_{out} \quad (103)$$

donde Rad_{out} [$J \cdot m^2 \cdot s^{-1}$] es la radiación exterior y ε es el coeficiente de transmisión de calor de las paredes del invernadero.

Radiación neta absorbida por las plantas:

$$Rn = (1 - \exp(-ke \cdot L))S_s \quad (104)$$

donde ke representa al coeficiente de extinción de la radiación solar.

Cálculo de la conductancia estomática:

$$gws = gws_{min} + (gws_{max} - gws_{min}) \left[1 - \exp\left(-\frac{Ss}{160}\right) \right] gD \quad (105)$$

$$gD = 1 \quad \text{si} \quad Di < 0.361$$

$$gD = \frac{0.39}{0.029 + Di} \quad \text{si} \quad Di \geq 0.361 \quad (106)$$

donde:

ρ_{aire}	[$kg_{aire} \cdot m^{-3}$]	Densidad del aire.
A_{cl}	[m^{-2}]	Área del invernadero.
Δ	[$kPa \cdot ^\circ C^{-1}$]	Pendiente de la curva de saturación.
Rn	[$J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$]	Radiación neta.
L	[$m_{hojas}^2 \cdot m_{suelo}^{-2}$]	Índice foliar.
CP_{aire}	[$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]	Calor específico del aire.
gwb	[$m \cdot s^{-1}$]	Conductancia capa límite.
Di	[kPa]	Déficit de saturación.
γ	[$kPa \cdot ^\circ C^{-1}$]	Constante psicrométrica.
gws	[$m \cdot s^{-1}$]	Conductancia estomática.
λ	[$J \cdot kg^{-1}$]	Calor latente de vaporización.

5.2. Simulación de la Temperatura y Humedad.

La figuras 10,12 y 14 nos muestra el ajuste del modelo de temperatura y humedad antes de la calibración tomando como condiciones iniciales datos obtenidos del muestreo (mes de abril del 2004), la entradas del modelo fueron la radiación solar, la temperatura, la velocidad del viento y la apertura de ventanas, los parámetros del modelo se tomaron de literatura.

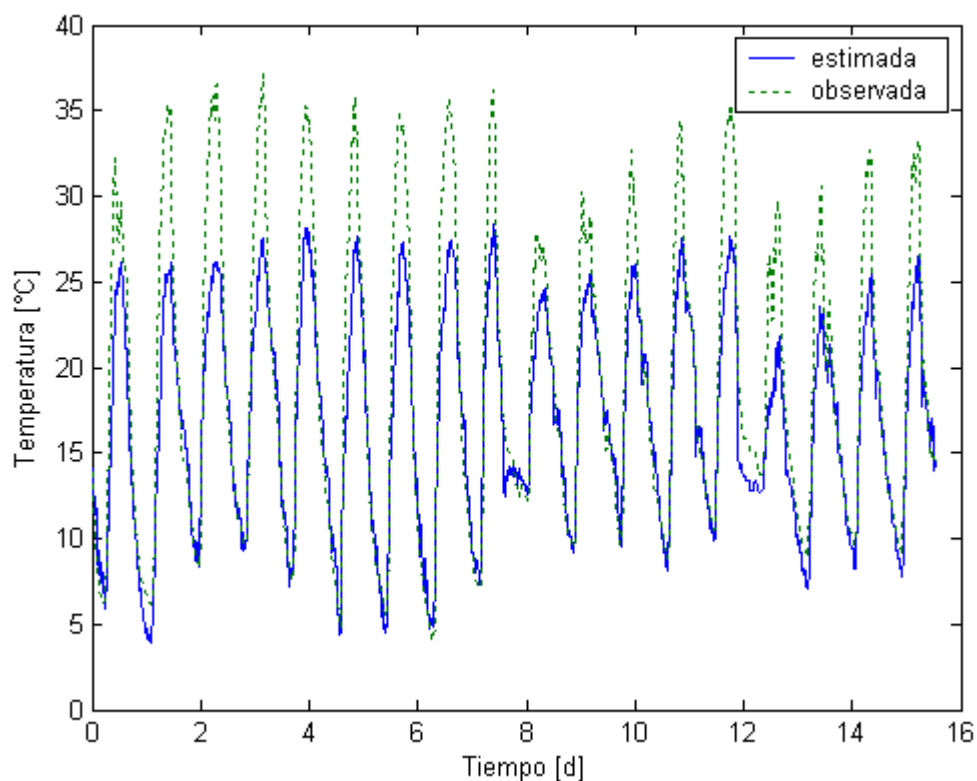


Figura 10. Predicción del modelo de temperatura antes de la calibración.

Se puede observar que es necesario un ajuste del modelo para mejorar su calidad predictiva.

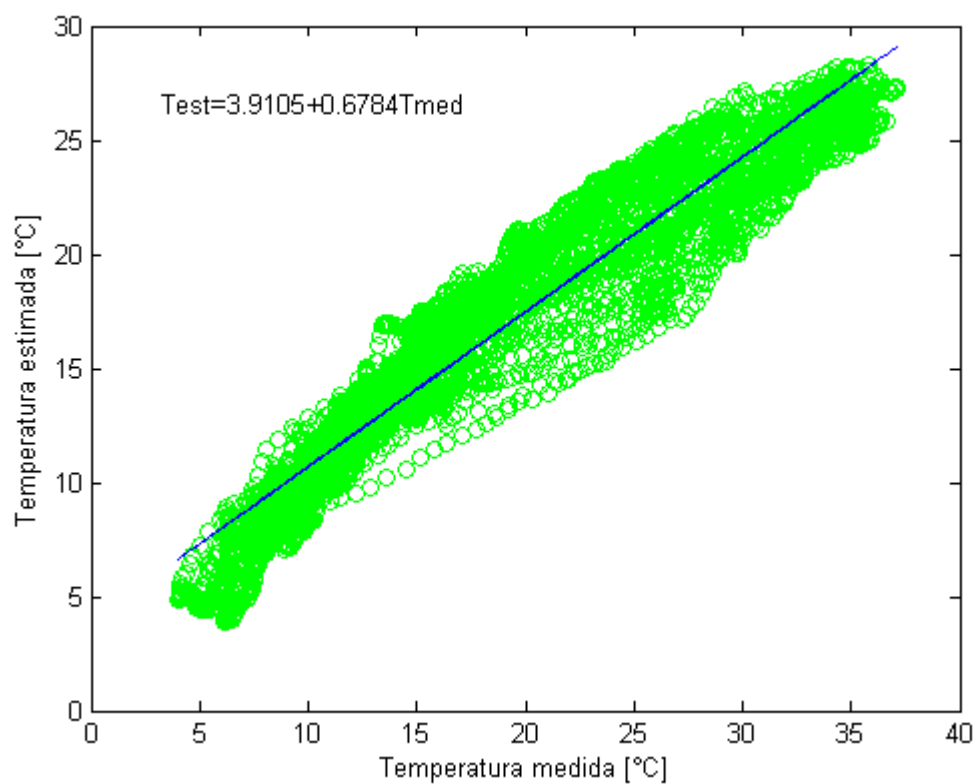


Figura 11. Regresión lineal de la temperatura observada y la estimada.

Coeficiente de correlación.

$$R^2 = 0.9175$$

Raíz cuadrada del cuadrado medio del error.

$$4.0091$$

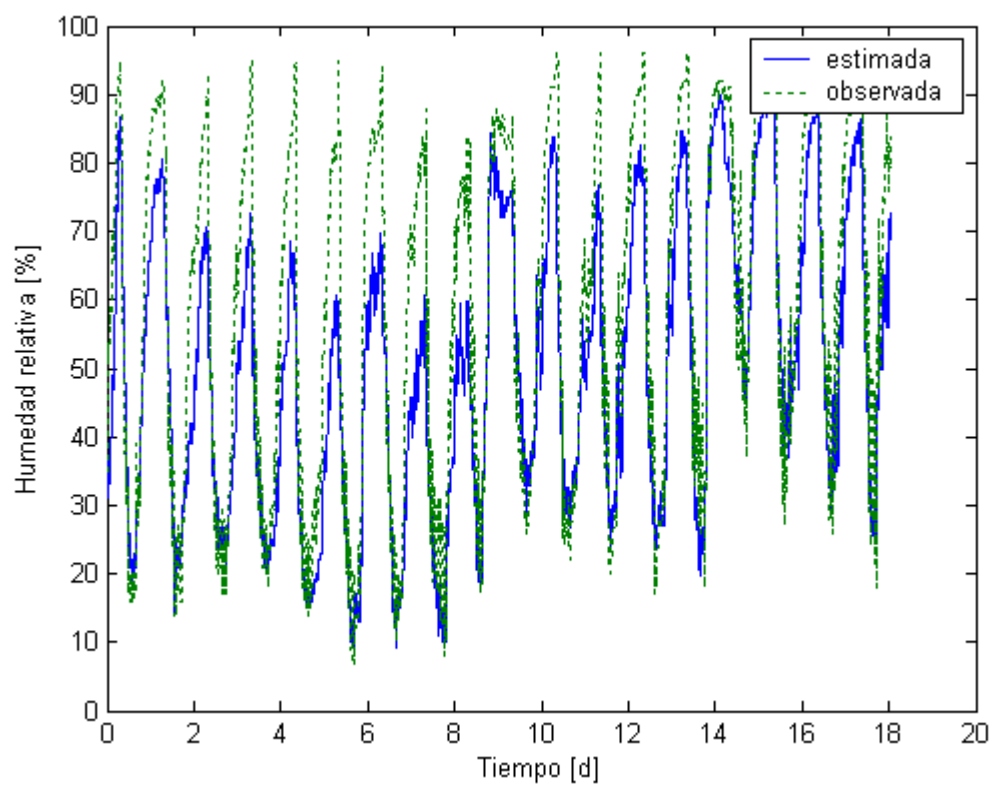


Figura 12. Predicción del modelo de la humedad relativa antes de la calibración.

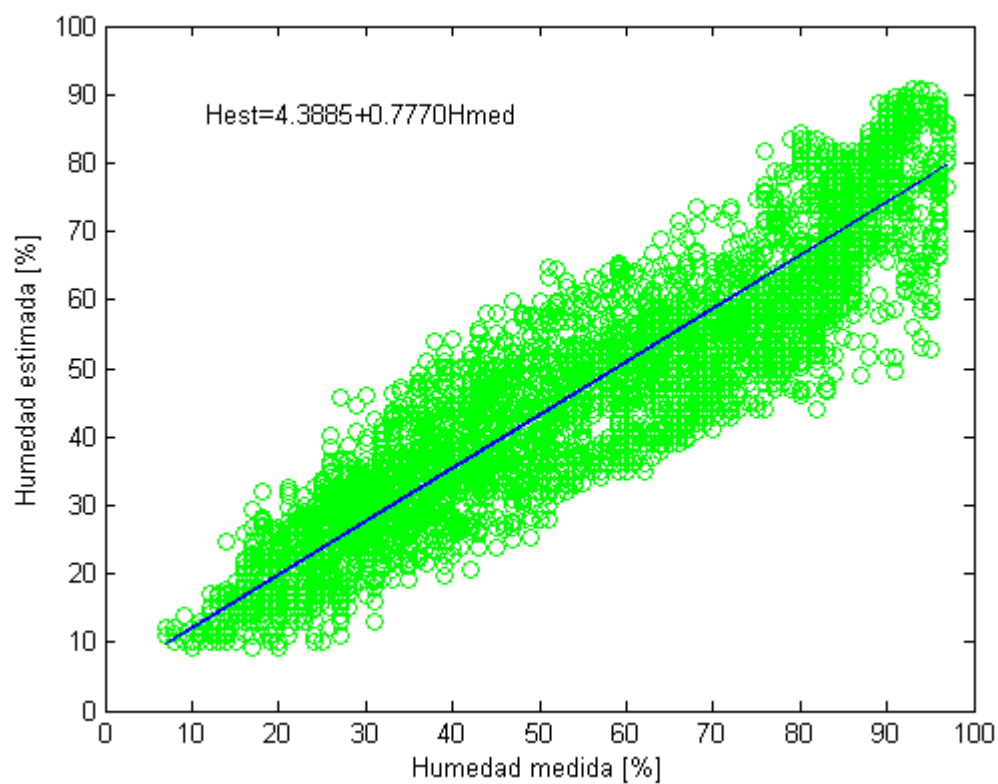


Figura 13. Regresión lineal de la humedad relativa observada y la estimada antes de la calibración.

Coefficiente de correlación.

$$R^2 = 0.8683$$

Raíz cuadrada del cuadrado medio del error.

12.8580

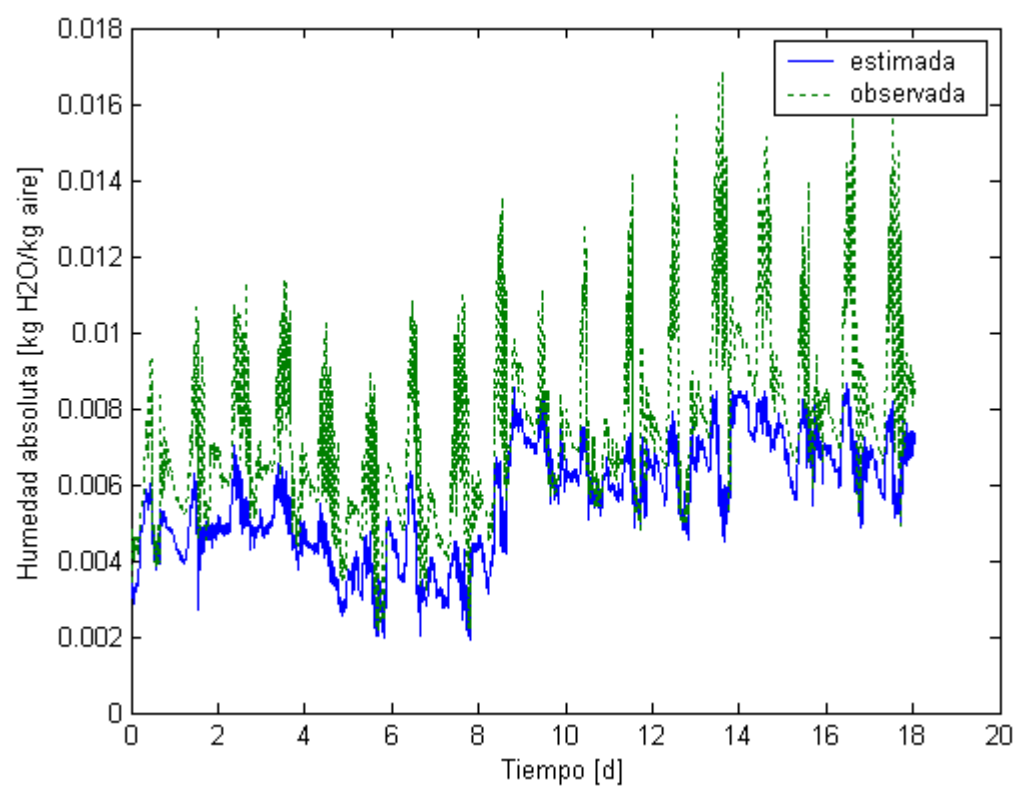


Figura 14. simulación de la humedad absoluta antes de la calibración.

5.3. Análisis de sensibilidad.

Las sensibilidades relativas de los estados del modelo con respecto a cada uno de los parámetros se obtiene gráficamente con el programa descrito en el apéndice 3, donde se usan las matrices de sensibilidad **A** y **M**; y se muestran a continuación las funciones de sensibilidad y los parámetros con los que fueron construidas; donde x_1 corresponde a la temperatura del aire en el interior, x_2 Humedad absoluta y x_3 a temperatura del suelo.

La estructura de los componentes de la matriz **A** es la siguiente:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f1}{\partial T_{in}} & \frac{\partial f1}{\partial H_{in}} & \frac{\partial f1}{\partial T_s} \\ \frac{\partial f2}{\partial T_{in}} & \frac{\partial f2}{\partial H_{in}} & \frac{\partial f2}{\partial T_s} \\ \frac{\partial f3}{\partial T_{in}} & \frac{\partial f3}{\partial H_{in}} & \frac{\partial f3}{\partial T_s} \end{bmatrix}$$

La matriz **M** se construye con las derivadas parciales de cada uno de los estados con respecto a cada uno de los parámetros del modelo, la matriz **M** en este caso tiene una dimensión de (3x19), y junto con la matriz **A** es necesaria para escribir las ecuaciones de sensibilidad; la estructura de la matriz **M** se describe a continuación, y los componentes de ambas matrices se utilizan en la ecuación 89 para obtener las gráficas de sensibilidad.

$$M = \begin{bmatrix} \frac{\partial f1}{\partial \varepsilon} & \frac{\partial f1}{\partial A_{cl}} & \frac{\partial f1}{\partial \alpha_{cl}} & \frac{\partial f1}{\partial T_d} & \frac{\partial f1}{\partial K_d} & \frac{\partial f1}{\partial K_s} & \frac{\partial f1}{\partial C_s} & \frac{\partial f1}{\partial gwb} & \frac{\partial f1}{\partial L} & \frac{\partial f1}{\partial Ke} & \frac{\partial f1}{\partial gws_{min}} & \frac{\partial f1}{\partial gws_{max}} & \frac{\partial f1}{\partial \gamma} & \frac{\partial f1}{\partial \kappa} & \frac{\partial f1}{\partial \theta} & \frac{\partial f1}{\partial \eta} & \frac{\partial f1}{\partial \alpha_m} & \frac{\partial f1}{\partial \varphi} & \frac{\partial f1}{\partial v} \\ \frac{\partial f2}{\partial \varepsilon} & \frac{\partial f2}{\partial A_{cl}} & \frac{\partial f2}{\partial \alpha_{cl}} & \frac{\partial f2}{\partial T_d} & \frac{\partial f2}{\partial K_d} & \frac{\partial f2}{\partial K_s} & \frac{\partial f2}{\partial C_s} & \frac{\partial f2}{\partial gwb} & \frac{\partial f2}{\partial L} & \frac{\partial f2}{\partial Ke} & \frac{\partial f2}{\partial gws_{min}} & \frac{\partial f2}{\partial gws_{max}} & \frac{\partial f2}{\partial \gamma} & \frac{\partial f2}{\partial \kappa} & \frac{\partial f2}{\partial \theta} & \frac{\partial f2}{\partial \eta} & \frac{\partial f2}{\partial \alpha_m} & \frac{\partial f2}{\partial \varphi} & \frac{\partial f2}{\partial v} \\ \frac{\partial f3}{\partial \varepsilon} & \frac{\partial f3}{\partial A_{cl}} & \frac{\partial f3}{\partial \alpha_{cl}} & \frac{\partial f3}{\partial T_d} & \frac{\partial f3}{\partial K_d} & \frac{\partial f3}{\partial K_s} & \frac{\partial f3}{\partial C_s} & \frac{\partial f3}{\partial gwb} & \frac{\partial f3}{\partial L} & \frac{\partial f3}{\partial Ke} & \frac{\partial f3}{\partial gws_{min}} & \frac{\partial f3}{\partial gws_{max}} & \frac{\partial f3}{\partial \gamma} & \frac{\partial f3}{\partial \kappa} & \frac{\partial f3}{\partial \theta} & \frac{\partial f3}{\partial \eta} & \frac{\partial f3}{\partial \alpha_m} & \frac{\partial f3}{\partial \varphi} & \frac{\partial f3}{\partial v} \end{bmatrix}$$

$$\frac{dS_{ij}}{dt} = a_{11}S_{1j} + a_{12}S_{2j} + m_n \quad (107)$$

En la gráfica 15 se puede observar que el área del invernadero (A_{cl}) tiene una mayor importancia en el estado x_3 que en los demás estados donde presenta una importancia un poco menor, pero significativa. Si el valor absoluto de la sensibilidad relativa es mayor que cero, entonces el modelo es sensible a un cambio pequeño del parámetro.

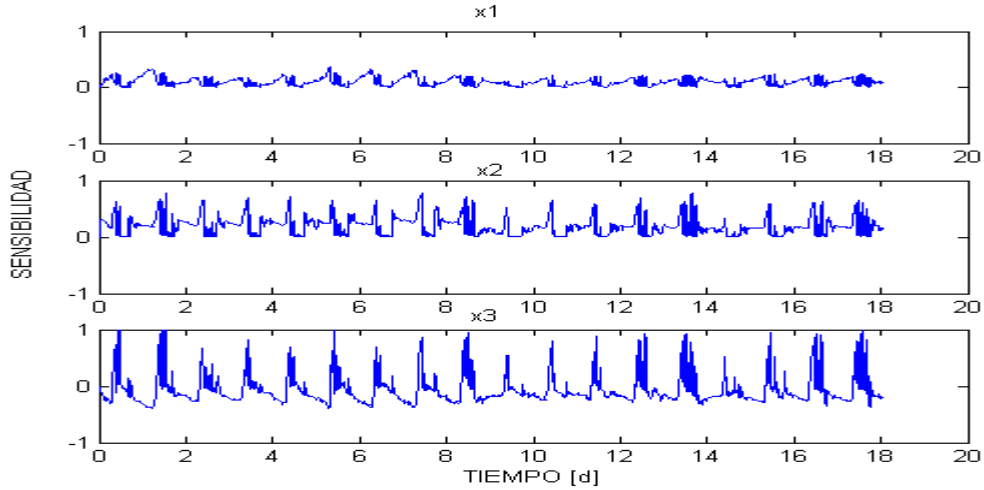


Figura 15. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto al área del invernadero (A_{cl}).

El coeficiente de conductividad del suelo (α_{cl}) tiene una importancia poco significativa en los estados ya que tiene valores cercanos a cero.

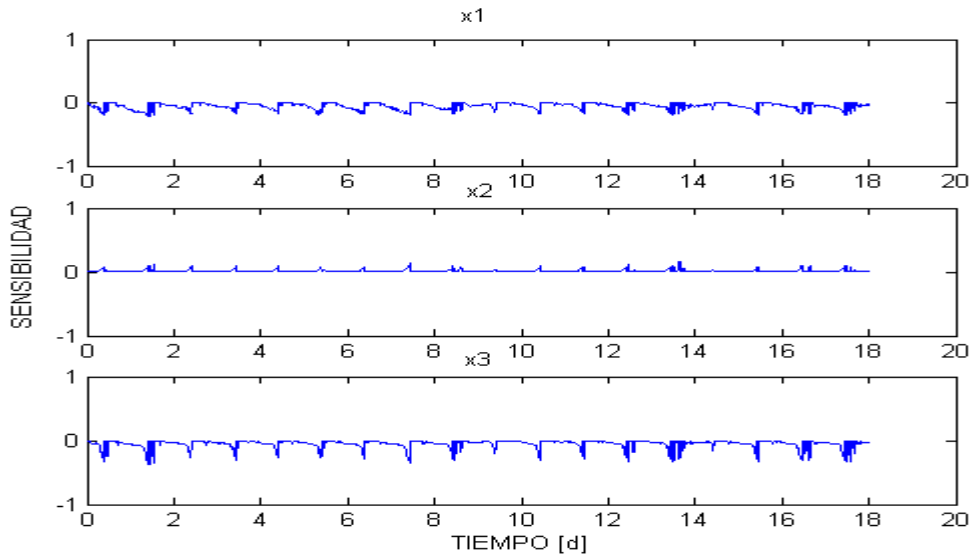


Figura 16. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto al coeficiente de conductividad térmica del suelo (α_{cl}).

La figura muestra la importancia que tiene incluir en el modelo de temperatura y humedad relativa la temperatura del suelo, debido a la importancia que tiene el factor de calor absorbido por el suelo (α_m) en cada una de los estados.

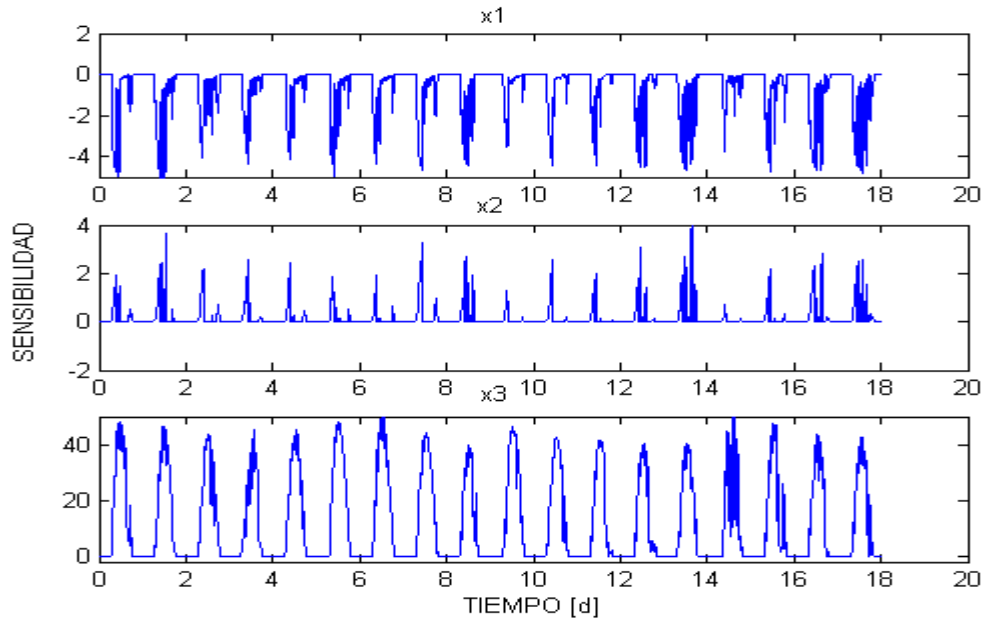


Figura 17. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto al factor de calor absorbido por el suelo (α_m).

La capacidad de calor del suelo (C_s) es poco significativa en cada uno de los estados, ya que la gráfica muestra valores cercanos a cero.

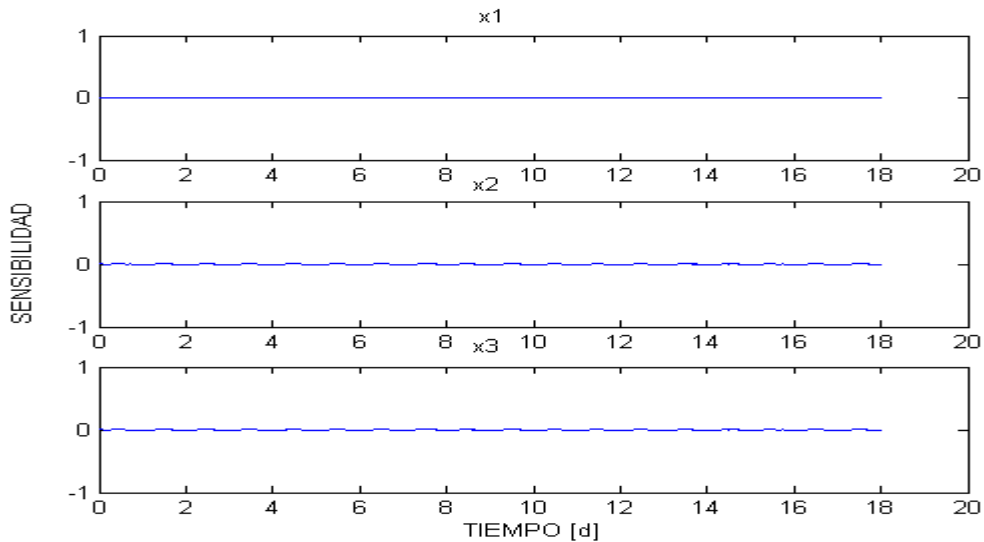


Figura 18. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto a la capacidad de calor del suelo (C_s).

El análisis de sensibilidad muestra que el coeficiente de transferencia de la cubierta (ε) tiene gran importancia con respecto al estado x_1 y x_3 y una importancia poco significativa con respecto a x_2 .

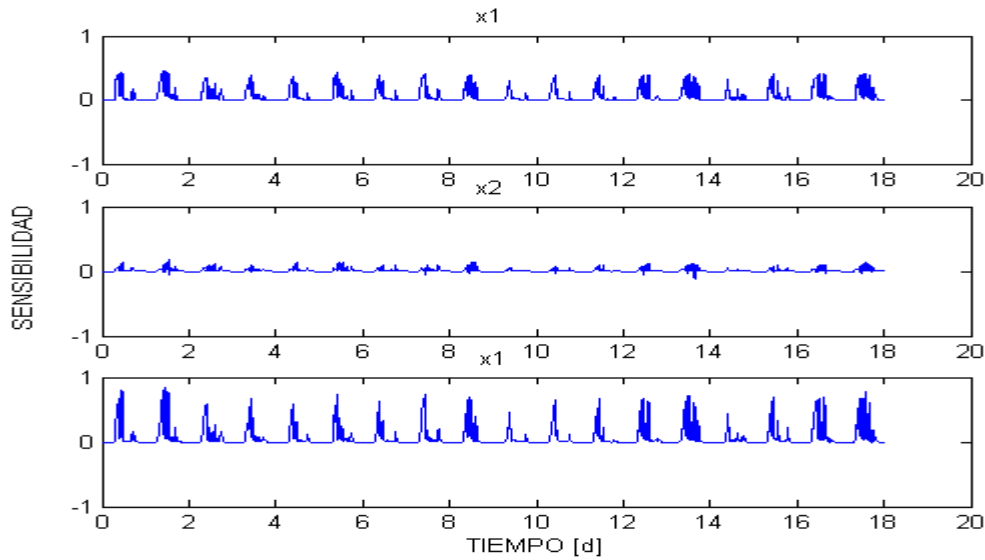


Figura 19. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto al coeficiente de transmisión del invernadero (ε).

La sensibilidad relativa de la energía de vaporización del agua (φ) es poco significativa para x_2 y nula para x_1 y x_3 ya que no participa en ningunos de los procesos de transferencia en estos estados.

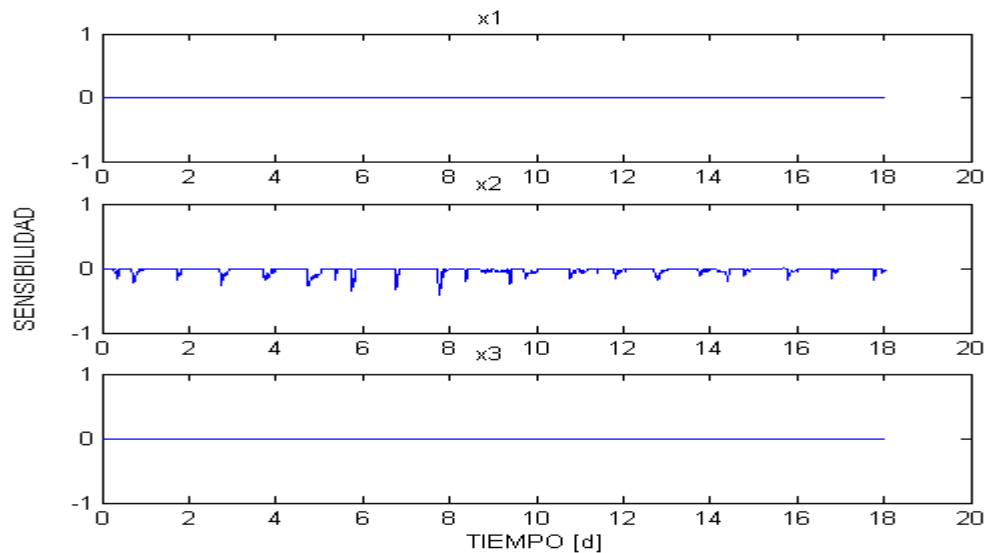


Figura 20. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto a la energía de vaporización del agua (φ).

La constante psicrométrica (γ) solo tiene importancia significativa para el estado x_2 .

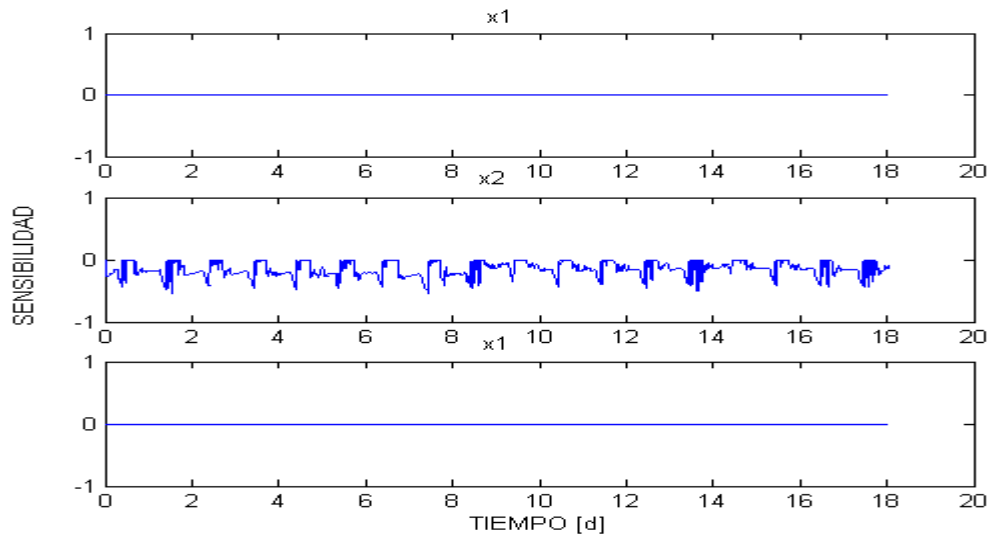


Figura 21. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto a la constante psicrométrica (γ).

La conductancia de la capa límite (g_{wb}) solo tiene importancia para el estado x_2 aunque poco significativa.

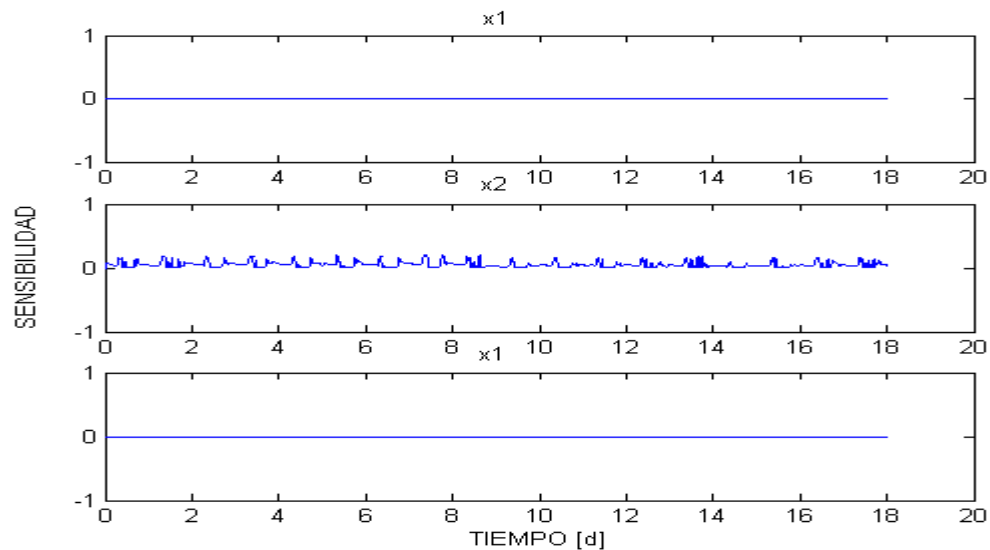


Figura 22. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto a la conductancia de la capa límite (g_{wb}).

La sensibilidad relativa de la conductancia estomática máxima ($g_{ws_{max}}$) es poco significativa para el estado x_2 y nula para los estados x_1 y x_3 .

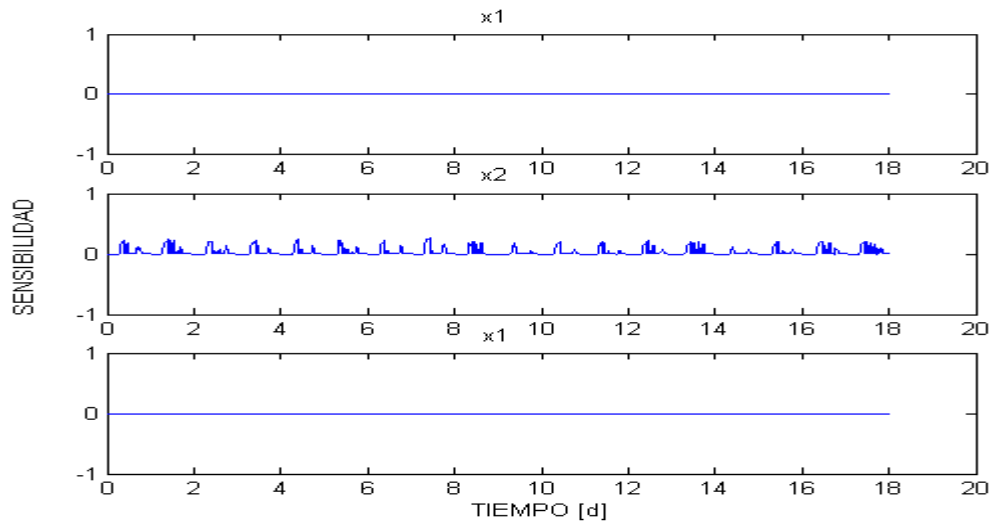


Figura 23. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto a la conductancia estomática máxima ($g_{ws_{max}}$).

La sensibilidad relativa de la conductancia estomática mínima ($g_{ws_{min}}$) es poco significativa para el estado x_2 y nula para los estados x_1 y x_3 .

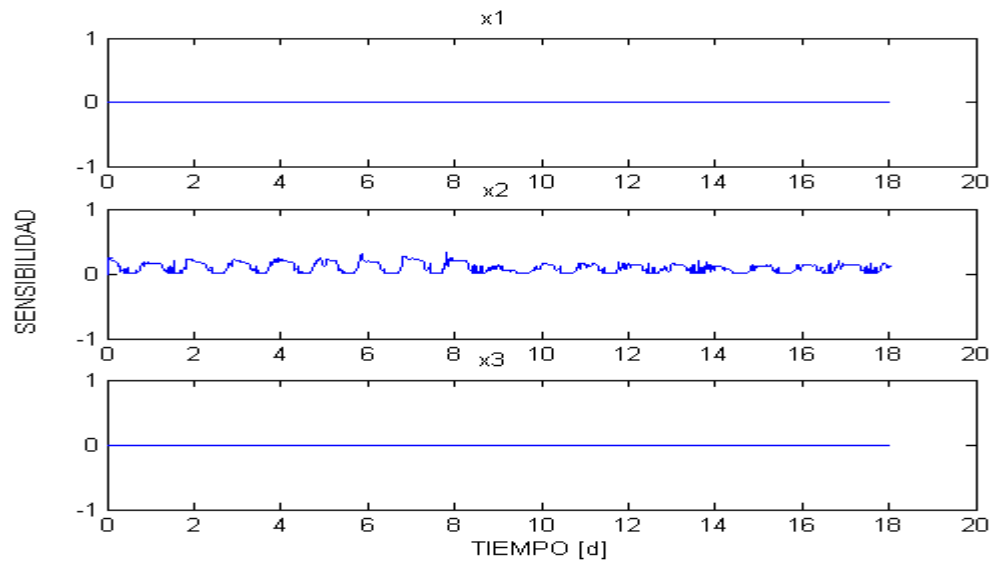


Figura 24. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto a la conductancia estomática mínima ($g_{ws_{min}}$).

El parámetro de la tasa de ventilación (κ) tiene gran importancia en el estado x_2 y una importancia significativa en x_1 y x_3 , ya que es el parámetro que tiene que ver con la renovación del aire.

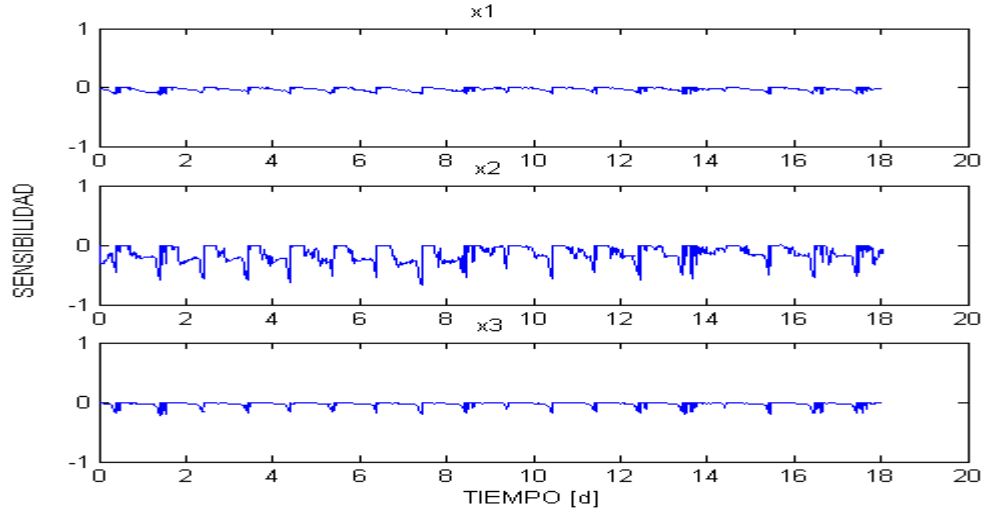


Figura 25. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto al parámetro de la tasa de ventilación (κ).

El coeficiente de transferencia de calor del suelo-suelo (k_d) tiene una importancia poco significativa en los tres estados del modelo.

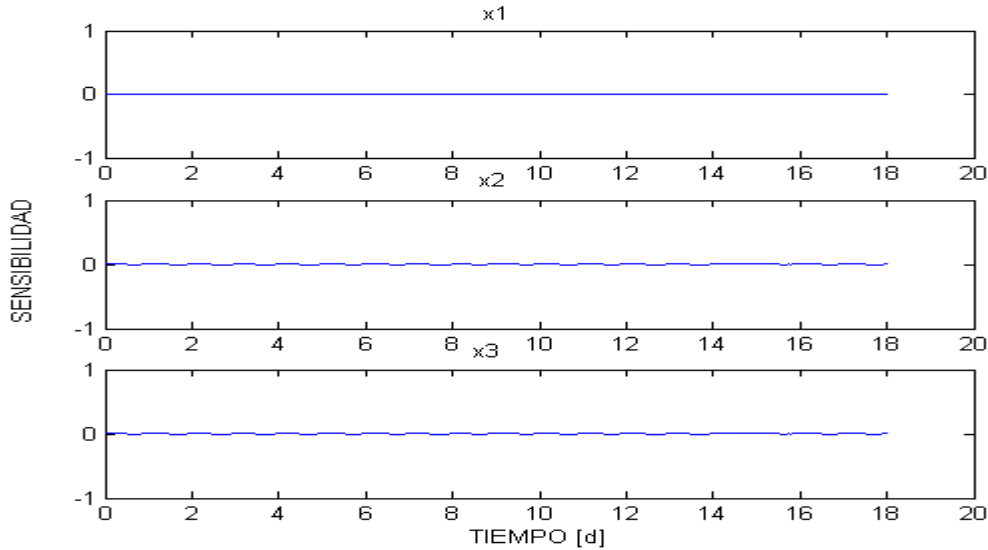


Figura 26. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto al coeficiente de transferencia de calor del suelo-suelo (k_d).

El coeficiente de extinción de la radiación solar (k_e) tiene poca importancia en el estado x_2 y nula en los estados x_1 y x_3 .

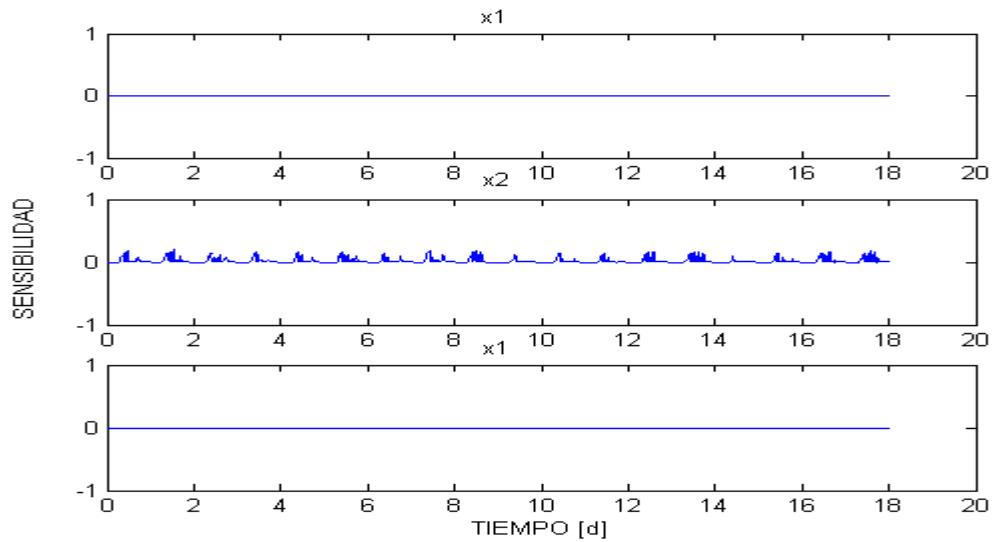


Figura 27. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto al coeficiente de extinción de la radiación solar (k_e).

El coeficiente de transferencia de calor del suelo (k_s) tiene gran importancia en los estados x_1 y x_3 , y una es poco significativa en x_2 .

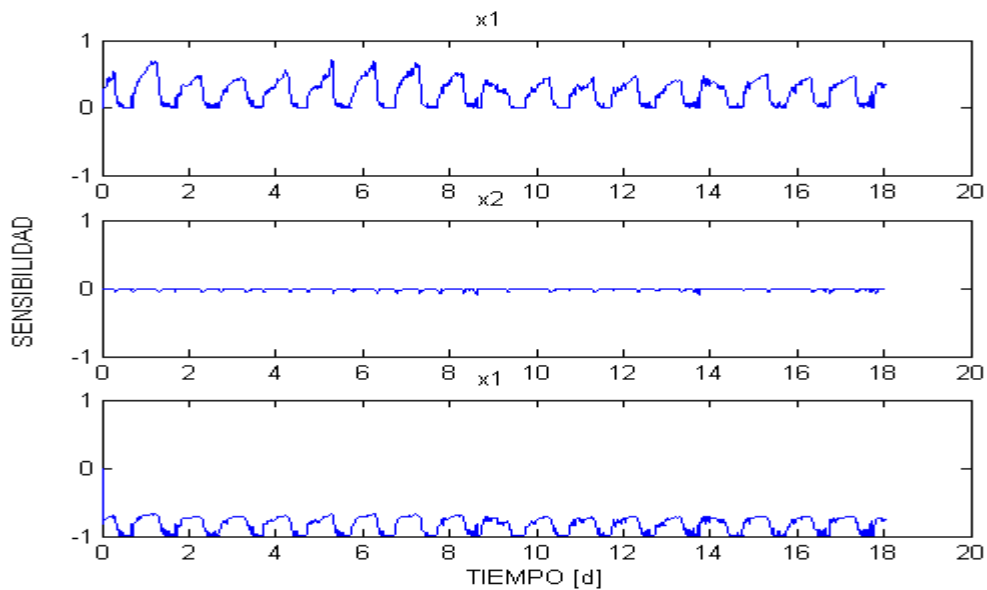


Figura 28. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto al coeficiente de transferencia de calor del suelo (k_s).

El índice de área foliar (L) solo tiene importancia en el estado x_2 .

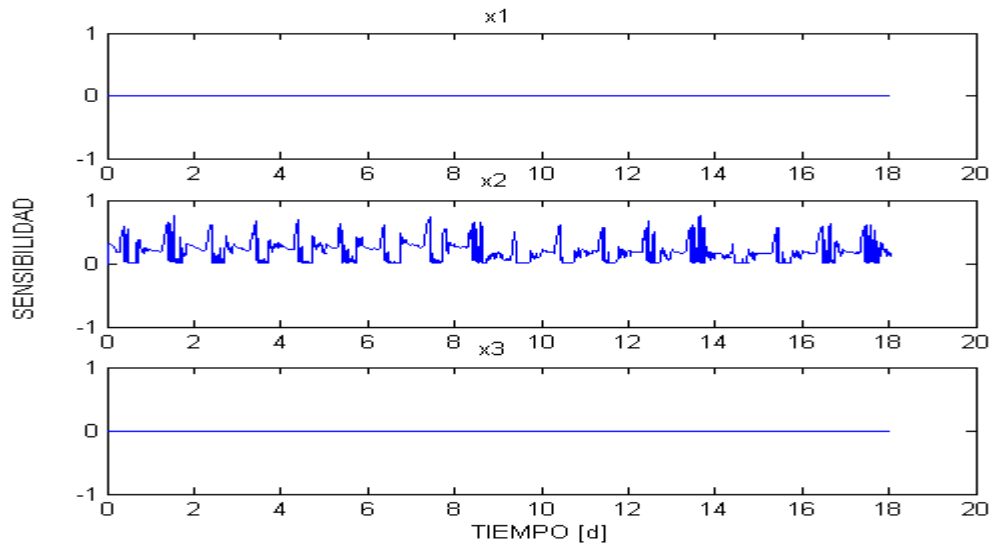


Figura 29. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto al índice de área foliar (L).

El parámetro de la tasa de ventilación (η) tiene una importancia poco significativa en los estados del modelo.

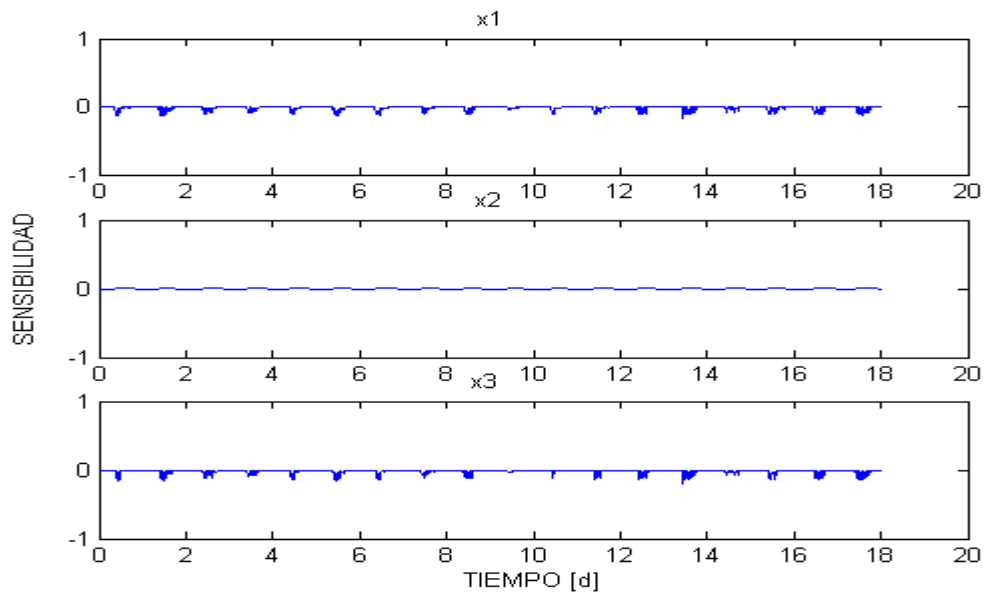


Figura 30. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto al parámetro de la tasa de ventilación (η).

La temperatura base del suelo (T_d) no tiene importancia en los estados del modelo.

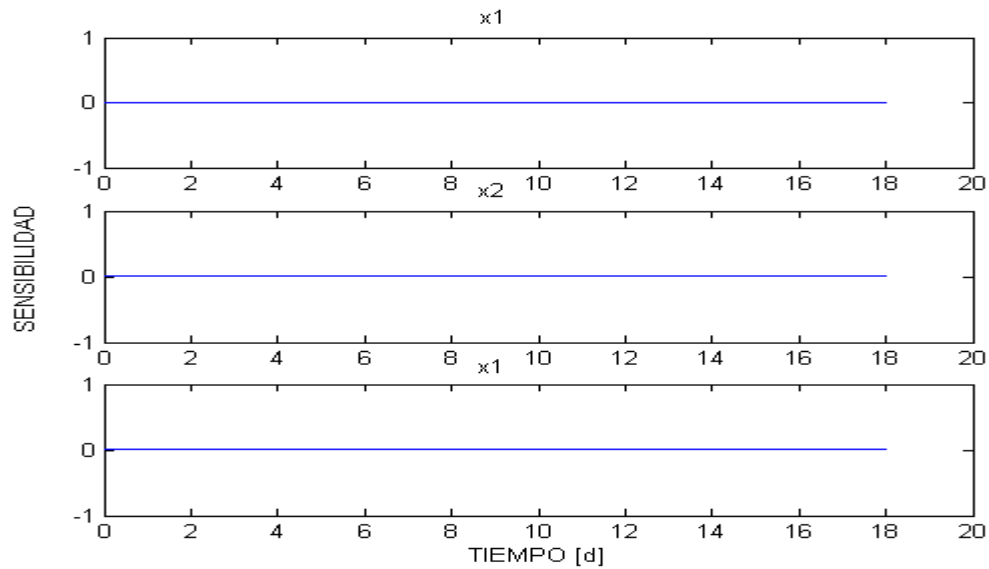


Figura 31. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto a la temperatura base del suelo (T_d).

El parámetro de la tasa de ventilación (θ) tiene poca importancia relativa en los estados del modelo.

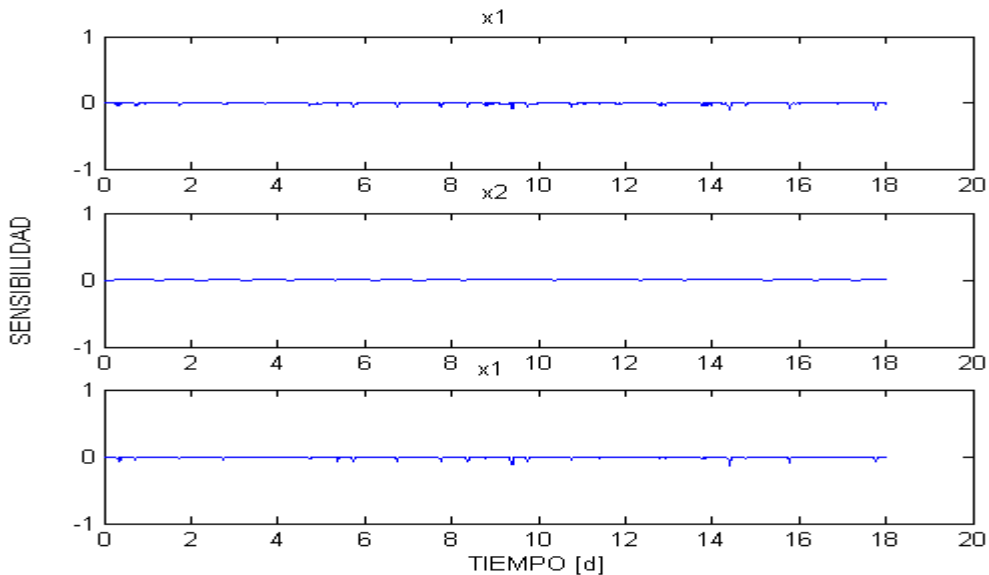


Figura 32. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto al parámetro de la tasa de ventilación (θ).

El parámetro de la tasa de ventilación (ν) tiene poca importancia relativa en el estado x_2 del modelo y nula en x_1 y x_3 .

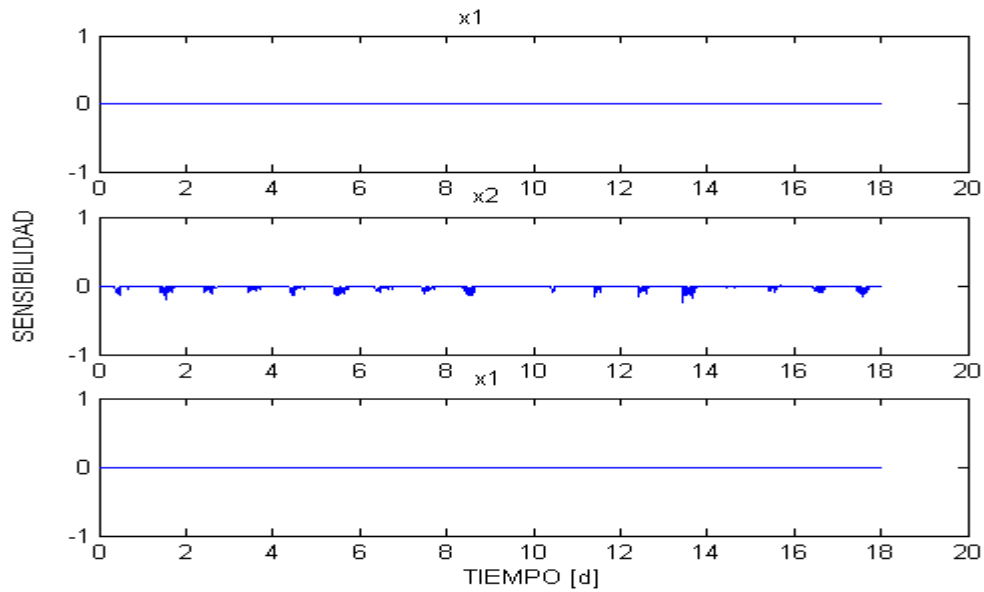


Figura 33. Sensibilidad relativa de las variables de estado x_1 , x_2 y x_3 con respecto a la constante psicrométrica aparente (ν).

5.3.1. Integrales de la sensibilidad.

Para conocer la importancia relativa de cada uno de los parámetros con respecto a cada uno de los estados del modelo en forma numérica se hace una integración de las gráficas del análisis de sensibilidad para apreciar de forma numérica dicha importancia mediante la función trapz de Matlab (ecuación 108), y se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 2, donde x_1 , x_2 y x_3 , son las ecuaciones de Temperatura del aire, Humedad absoluta y Temperatura del suelo respectivamente. Para realizar la optimización se utilizan los datos que presentan sensibilidades absolutas mas grandes, las cuales nos indican la importancia que tienen los parámetros en cada uno de los estados del modelo (Tabla 6).

$$I = \int_{t_0}^{t_f} |S_{real}| dt \quad (108)$$

Tabla 6. Integrales de las gráficas de sensibilidad.

Parámetros	x_1	Parámetros	x_2	Parámetros	x_3
α_m	11.4018	L	3.4583	α_m	213.2479
k_s	4.2186	A_{cl}	3.4728	k_s	15.0153
A_{cl}	1.7311	α_m	2.8111	A_{cl}	1.3341
ε	0.9907	γ	2.7089	ε	1.2330
α_{cl}	0.9091	κ	2.5817	α_{cl}	0.8225
κ	0.5276	gws_{min}	1.6718	κ	0.4773
η	0.2136	gwb	0.9159	η	0.2180
θ	0.0892	gws_{max}	0.5388	θ	0.0785
T_d	0.0014	φ	0.4099	T_d	0.0058
k_d	2.4943e-004	k_e	0.3318	k_d	5.9390e-004
C_s	4.4943e-004	k_s	0.2199	C_s	2.5078e-004
gwb	0	ε	0.2103	gwb	0
L	0	Ve	-0.1931	L	0
k_e	0	α_{cl}	0.1236	k_e	0
gws_{min}	0	θ	0.0107	gws_{min}	0
gws_{max}	0	η	0.0077	gws_{max}	0
γ	0	T_d	9.0863e-005	γ	0
φ	0	C_s	4.4306e-005	φ	0
Ve	0	k_d	1.5138e-005	Ve	0

5.4. Calibración.

Conociendo que parámetros afectan el comportamiento del modelo se hizo una calibración manual y se obtuvieron resultados bastante aceptables para la temperatura (figura 34), aunque no se logró un buen ajuste en el modelo de la humedad (figura 36). Las condiciones iniciales se tomaron nuevamente de los datos muestreados (abril del 2004), los parámetros que se habían tomado de literatura fueron modificados para mejorar la calidad predictiva del modelo.

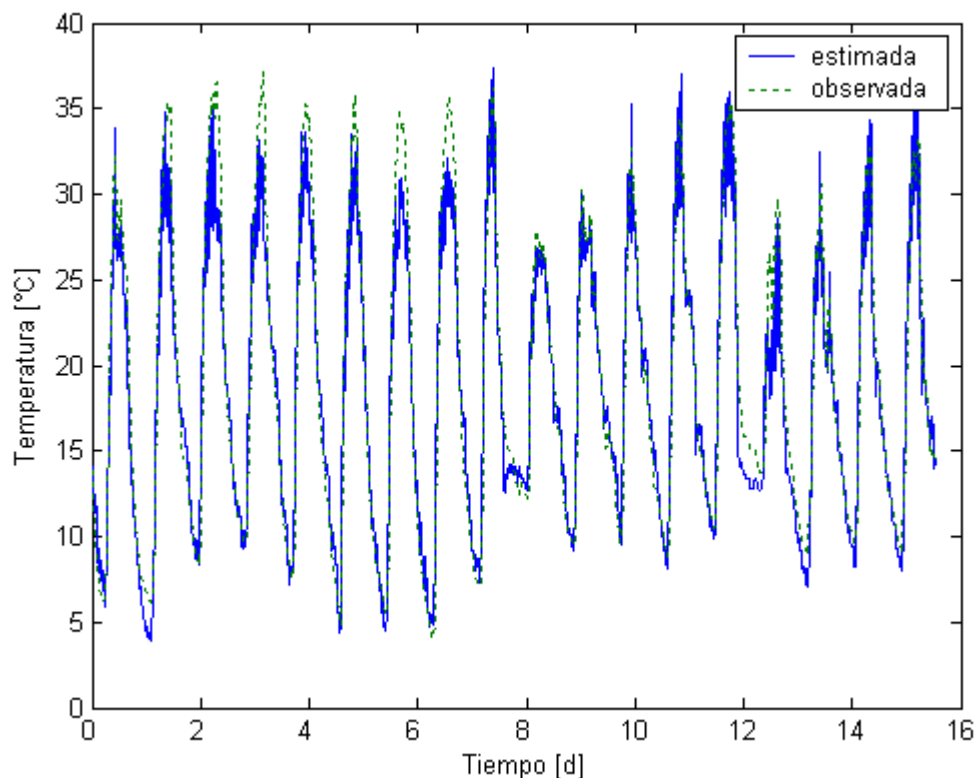


Figura 34. Simulación de la Temperatura observada y la estimada.

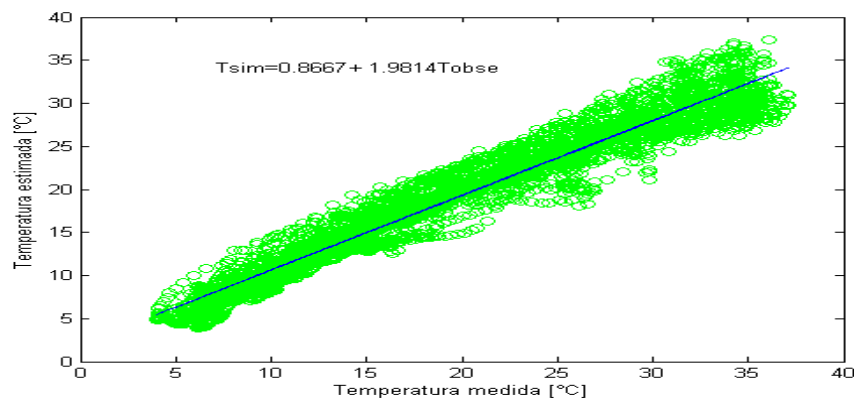


Figura 35. Regresión lineal de la Temperatura observad y la estimada.

Coeficiente de correlación.

$$R^2 = 0.9476$$

Raíz cuadrada del cuadrado medio del error.

2.1938

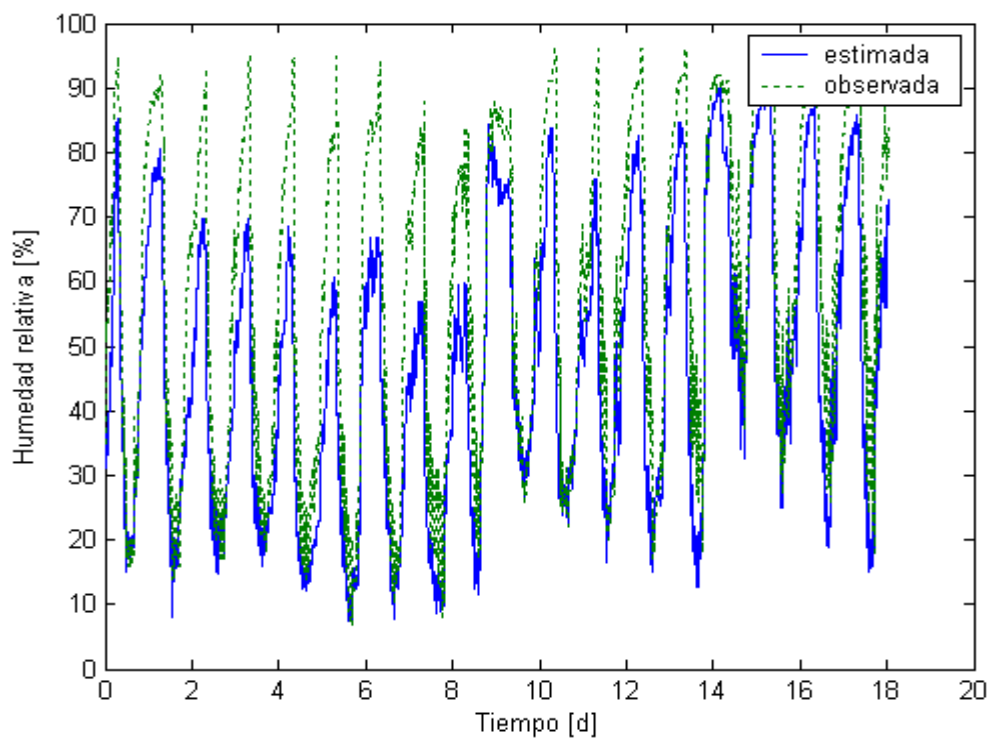


Figura 36. Simulación de la Humedad relativa medida y la estimada.

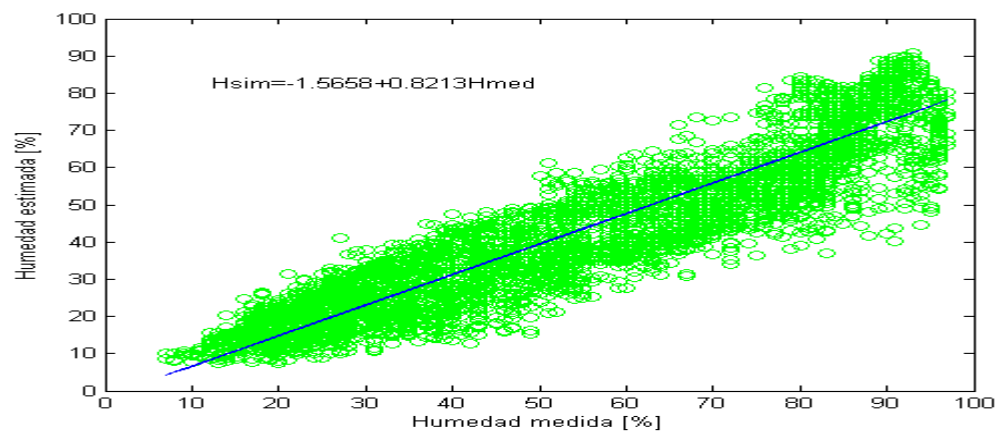


Figura 37. Regresión lineal de la Humedad relativa observada y la estimada.

Coeficiente de correlación.

$$R^2 = 0.8606$$

Raíz cuadrada del cuadrado medio del error.

15.3281

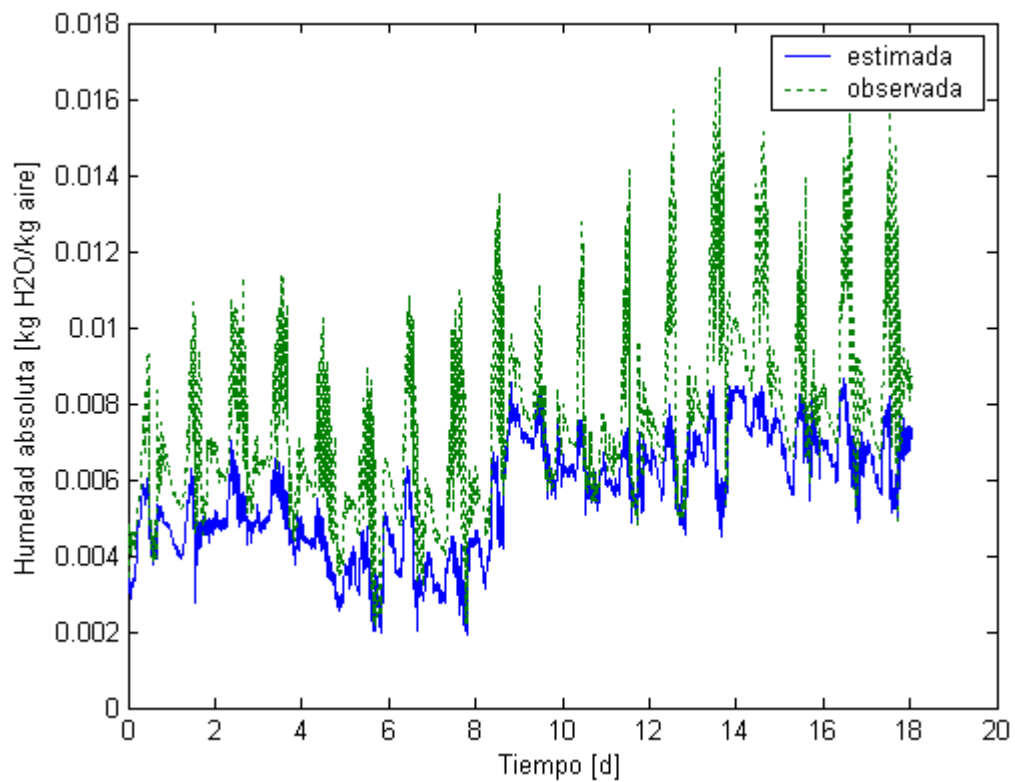


Figura 38. Simulación de la Humedad absoluta observada y la estimada.

5.5. Validación.

Se presenta la simulación de la temperatura observada y estimada después de la calibración manual y usando un conjunto de datos (mayo del 2004) diferentes a los que se usaron en la calibración del modelo (figura 39), las condiciones iniciales nuevamente se tomaron de los datos muestreados y no se modificaron los parámetros, el objetivo el mostrar la calidad predictiva lograda en la calibración.

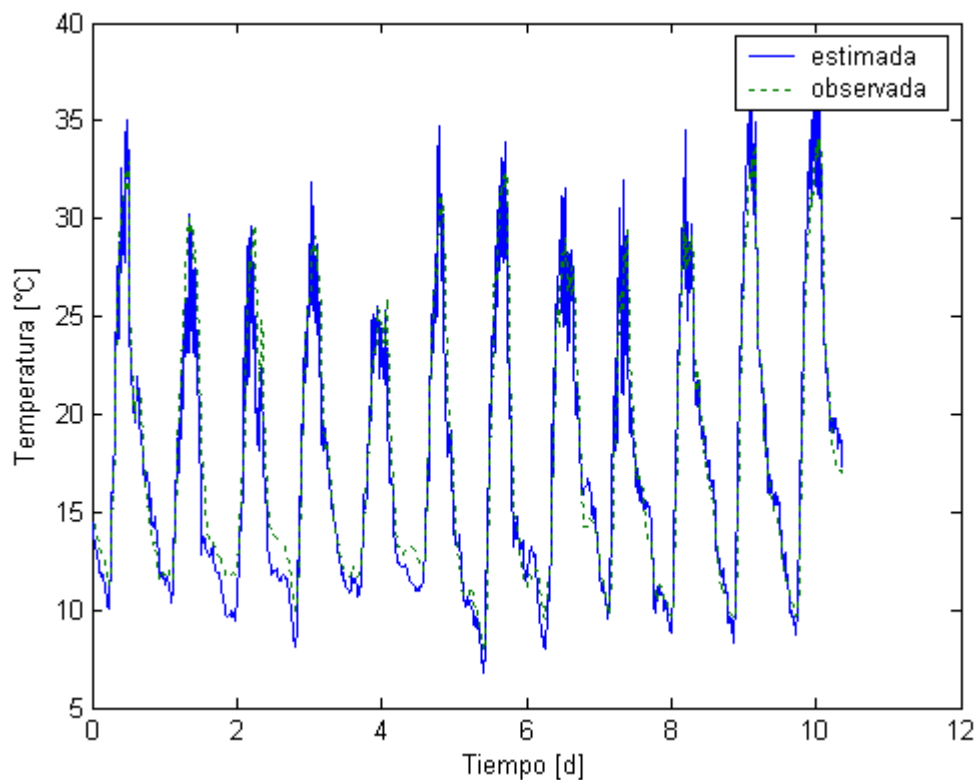


Figura 39. Predicción del modelo de Temperatura.

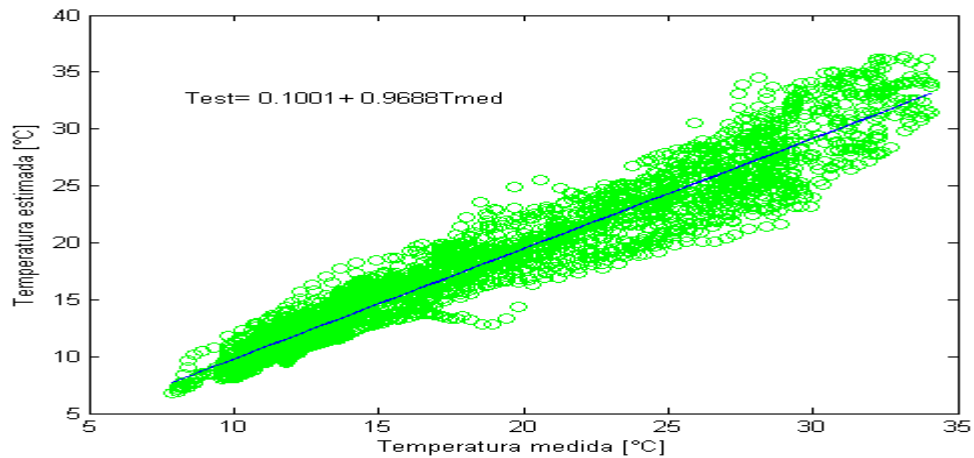


Figura 40. Regresión lineal de la Temperatura observada y la estimada. Coeficiente de correlación.

$$R^2 = 0.9345$$

Raíz cuadrada del cuadrado medio del error.

$$1.8080$$

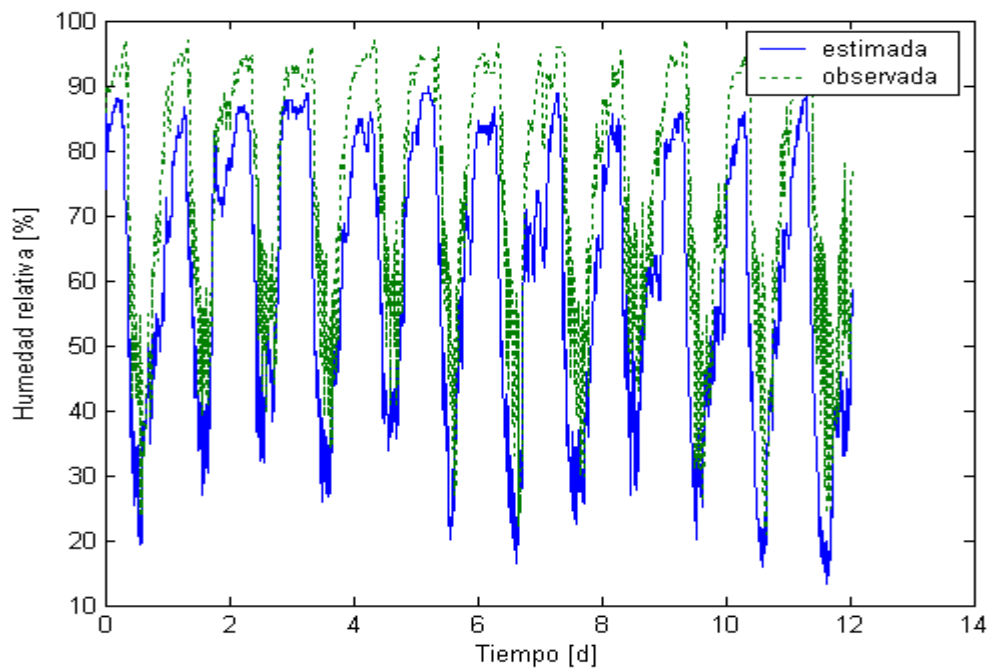


Figura 41. Predicciones del modelo de Humedad relativa para datos del mes de mayo del 2004.

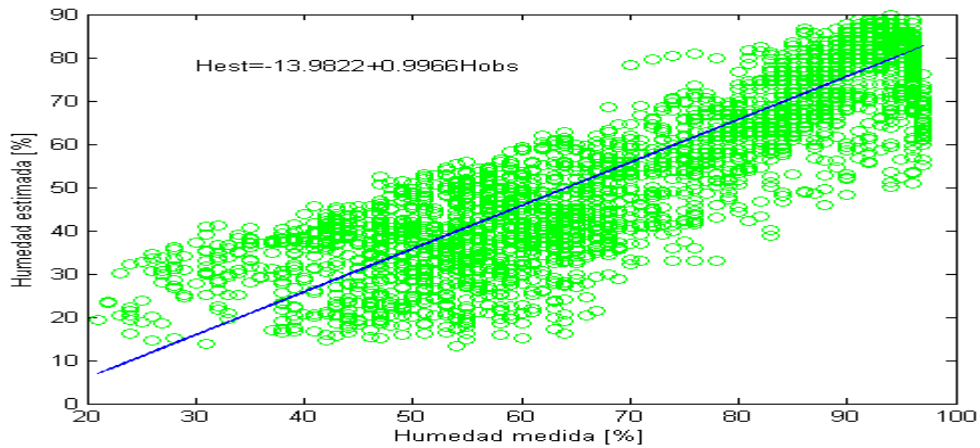


Figura 42. Regresión lineal de la Humedad relativa observada y la estimada. Coeficiente de correlación.

$$R^2 = 0.8031$$

Raíz cuadrada del cuadrado medio del error.

$$17.0505$$

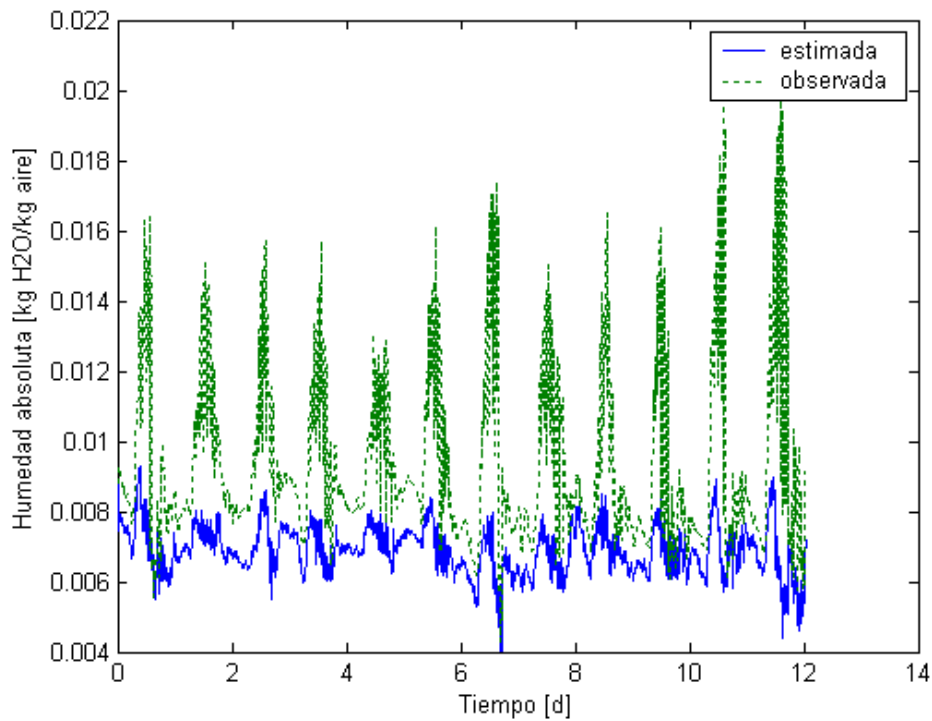


Figura 43. Estimaciones de la Humedad absoluta para datos del mes de mayo del 2004.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

6.1 CONCLUSIONES

Con el modelo de Temperatura se logró una calidad predictiva bastante buena con una R^2 de 0.94 83 y la raíz cuadrada del cuadrado medio del error de 2.1853, que son indicadores de la proximidad de la simulación con respecto a las observaciones; esto nos indica que los procesos más importantes de transferencia de energía fueron tomados en cuenta en el modelo.

En el modelo de Humedad no se logró el ajuste deseado ya que las predicciones tienen una R^2 de 0.8606 y la raíz cuadrada del cuadrado medio del error es de 15.3281 con respecto a las predicciones; probablemente existe una perturbación importante debida al índice de área foliar, el cual se tomó como una constante y obviamente no lo es, o no se tomaron en cuenta procesos físicos que son importantes, como la condensación.

Con el análisis de sensibilidad se pudo conocer la importancia de cada uno de los parámetros del modelo, útil para mejorar la calidad predictiva de éste. Y se plantea la metodología de manera detallada de cómo llevar a cabo dicho análisis en trabajos posteriores.

Desafortunadamente no se pudo hacer la estimación de parámetros en MATLAB-SIMULINK, probablemente debido a un error en el programa implementado, y se hizo en forma manual, conociendo desde luego cuales parámetros eran los más importantes en el modelo, aunque se obtuvieron buenos resultados para la temperatura y también tiene validez hacerlo de esta forma.

El modelo de la humedad se puede mejorar tomando datos de índice de área foliar del cultivo, ya que en este trabajo se consideró constante, y probablemente falta considerar otro proceso importante que no fue considerado como la condensación.

6.2 RECOMENDACIONES

Se debe tomar en cuenta el cambio en el índice de área folia para poder tener una mejor predicción en el modelo de humedad, e incluir la condensación.

La etapa de crecimiento del cultivo tiene una gran influencia sobre el modelo de humedad, y se recomienda que la toma de datos cubra el ciclo del cultivo para tener mejores resultados en el ajuste del modelo.

Debido a que el invernadero presenta problemas de control de clima ya que la temperatura y humedad alcanzan valores superiores a los óptimos máximos, e inferiores a los óptimos mínimos. Se debe continuar con el monitoreo para evitar problemas de plagas y enfermedades de los cultivos.

7. LITERATURA CITADA

Azcon-Bieto, J.; Talón, M.; 1996. Fisiología y bioquímica vegetal. Editorial Mc Graw Hill. Madrid, España. 580 pp.

Baquette, B. Wayne, 1998. Modeling, Analysis, and Simulation; Rensselaer Polytechnic Institute; 590 pp.

Barry, R. G., Chorley, R., 1985. Atmósfera, tiempo y clima; Editorial Omega; 500 pp.

Bot, G. P. A., 1983. Greenhouse climate: from physical process to a dynamic model; PhD Thesis; Universidad de Wageningen; Holanda; 239 pp.

Bot G. P. A.; 1989. Greenhouse simulation models, Acta Horticulturae 245, 315-325.

Burghard, M. David; 1982. Ingeniería Termodinámica, segunda edición. Harla, S.A. de C.V.; pp. 553.

Chapman, J.; 1984. Transmisión de calor; Librería Editorial Bellisco; Madrid; 731 pp.

Daudet, F. A., Tchamitchian, M. 1993. Radiative exchange and photosynthesis; INRA Editions, 450 pp.

Duffie, J. A., Beckman, W.A.; 1979. Procesos térmicos en energía solar; Editorial Grupo Cero; Madrid; 336 pp.

Gil, F.;1995. Elementos de fisiología vegetal; Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, 147 pp.

Ioslovich I., Seginer I., Baskin A., Fitting the NICOLET lettuce growth model to plant-spacing experimental accepted to Biosystems Engineering, 2002.

J.C., Bakker; 1991. Analysis of humidity effects on growth and production of glasshouse fruit vegetables, PhD Dissertation, Wageningen Agricultural University.

Ljung L. System Identification; 1999. Theory for the user. Prentice Hall.

Metselaar K. 1999. Auditing predictive models: a case study in crop growth, PhD Thesis, Wageningen Agricultural University.

Montero, J. I.; Antón, A.; 1993. Tecnología del invernadero; Universidad de Buenos Aires; Argentina; 128 pp.

Rodríguez, F., Berenguel, M.; 2000. Sistemas de control climático de invernaderos. Vol. 115; pp. 30-36.

Rodríguez, Díaz Francisco, 2002. Modelado y control jerárquico de crecimiento de cultivos en invernadero, PhD Tesis, Universidad de Almería.

Saltelli, A., Chan, K., Scout, E. M. 2000. sensitivity Analisis. WILEY. 475 pp.

Seginer I., Boulard T.; 1994. Bailey B.J., Neural Networks models of greenhouse climate, J. Agric., Eng., Res, 59, 203 -216.

Stanghellini, C.; 1998; Balance hídrico en invernaderos. FIAPA; 120 pp.

Tap F.; 2000. Economics-based optimal control of greenhouse tomato crop production, PhD Thesis, Wageningen Agricultural University.

Tchamitchian M., van Willigenburg L.G., van Straten G., Short term dynamic optimal control of the greenhouse climate, Wageningen MRS report, 92-3.

Thornley J. H. M.; 2000. and Johnson I.R., Plant and crop modeling, A mathematical approach to plant and crop physiology, The Blackburn Press.

Undink ten Cate A. J.; 1983. Modeling and (adaptive) control of greenhouse climates, PhD Thesis, Wageningen Agricultural University.

Van Henten, E. J.; 1994. Greenhouse climate management: an optimal control approach, PhD Thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.

Van Henten E. J.; 1994. van Straten G., Sensitivity analysis of a dynamic growth model of lettuce, J. Agric. Eng. Res. 59, 19-31.

8. APÉNDICES.

APÉNDICE 1. Programa MATLAB-SIMULINK para simular la Temperatura y Humedad.

Programa para simular la humedad relativa y la temperatura dentro del invernadero (simu.m)

archivos con los que corre este programa:

clmayoin.mat, clmayoex.mat, clabrili.mat, clabrile.mat, Simgrh.mdl, tempha.c

```
clear all
```

```
% load datasets
```

```
load clabrili           % load parameters: ExcelDate, Tin, Hin, Pin, Radin, Tsoil
```

```
load clabrile          % load parameters: ExcelDate, Tout, Hout Pout, Radout,
```

```
Vspeed, Vdir,Rain
```

```
%load clmayoex;
```

```
%load clmayoin;
```

```
% select days to make a run
```

```
startday=1;
```

```
endday=18;
```

```
nrdays=endday-startday;
```

```
T=[0:300:(nrdays+1)*60*60*24-300]';
```

```
Aw=100;
```

```
Awc=Aw*[zeros(108,1); ones(96,1); zeros(84,1)];
```

```
ToutVector=[];
```

```
RadoutVector=[];
```

```
VspeedVector=[];
```

```
TinVector=[];
```

```
VectorDate=[];
```

```
AwcVector=[];
```

```
HoutVector=[];
```

```
HinVector=[];
```

```
RadinVector=[];
```

```
MatlabDate = datenum('30-Dec-1899') + ExcelDate;
```

```
for i=startday:endday,
```

```
    ToutVector=[ToutVector;Tout(:,i)];
```

```
    RadoutVector=[RadoutVector;Radout(:,i)];
```

```

VspeedVector=[VspeedVector;Vspeed(:,i)];
AwcVector=[AwcVector; Awc];
TinVector=[TinVector;Tin(:,i)];
VectorDate=[VectorDate;MatlabDate(:,i)];
HoutVector=[HoutVector;Hout(:,i)];
HinVector=[HinVector;Hin(:,i)];
RadinVector=[RadinVector;Radin(:,i)];
end
% Transforma datos de HR a HA para el exterior del invernadero
Pat=98.1;          % Presion de una atmosfera KPa
PSatT=0.61064*(1+1.4142136.*sin(5.81776e-3.*ToutVector)).^8.827;
Hasat=0.611*PSatT/Pat;
HaoutVector=Hasat.*HoutVector/100;

% Transforma datos de HR a HA para el interior del invernadero
PSatT=0.61064*(1+1.4142136.*sin(5.81776e-3.*TinVector)).^8.827;
Hasat=0.611*PSatT/Pat;
HainVector=Hasat.*HinVector/100;

LAI=1;

%create inputvector and temperature init Tin0
Tininit = TinVector(1,1);
Hainit = HainVector(1,1);

Temp0 = Tininit;
Ha0 = Hainit;
Suelo0 = 15;
Vgrh = 3950;
ROaire = 1.2;
CPaire = 1000;
Epsilon = 0.64;
Acl = 1040;
Alfac1 = 10;
Td = 25;
Kd = 2;
Ks = 10.75;
Cs = 120000;
gwb = 0.004;
L = 1;
Ke = 0.6;
Gwsmin = 0.0005;
gwsmax = 0.0155;
Gami = 0.066;
Kappa = 500;
Theta = 4.02;
Nu =3.68;

```

```

Alfam = 0.1;
Fi = 4.02;
Ve = 3.68;

Parametros=[Temp0 Ha0 Suelo0 Vgrh ROaire CPaire Epsilon Acl Alfaci Td Kd Ks
Cs gwb L Ke gwsmin gwsmax Gami Kappa Theta Nu Alfam Fi Ve];
UT=[T RadoutVector VspeedVector ToutVector HaoutVector AwcVector];

myopts = simset('Solver','ode23s','reltol',1e-8);

[t,x,y]= sim('simgrh',T,myopts,UT);

X=[TinVector ones(size(x(:,1)))];

p=X\ x(:,1);

ysim=X*p;

% plot
t=VectorDate
xmin=min(VectorDate)
xmax=max(VectorDate)
figure(1);
plot(T,x(:,1),T,TinVector,':')
legend('simulado','observado')
xlabel('Tiempo [d]')
ylabel('Temperatura [°C]')
shg

a='ready with run'

figure(2)
T1=T/(60*60*24-300);

plot(T1,x(:,2),T1,HainVector);
legend('simulado','observado');
xlabel('Tiempo [d]')
ylabel('Humedad absoluta [kg H2O/kg aire]')

figure(3);
plot(T1,y(:,4),T1,HinVector,':');
legend('simulado','observado');
xlabel('Tiempo [d]')
ylabel('Humedad relativa [%]')

figure(4);

```

```

plot(TinVector,x(:,1),'go');
hold on;
plot(TinVector,ysim,'b-')
% Calculo del coeficiente de determinacion
Ym=mean(TinVector);
R2=sum((x(:,1)-Ym).^2)/sum((TinVector-Ym).^2);
[B,BINT,R,RINT,STATS]=regress(x(:,1),X);
R2=STATS(1);
xlabel('Temperatura medida [°C]');
ylabel('Temperatura estimada [°C]');

Ym1=mean(TinVector(end-864:end));
R21=sum((x(end-864:end,1)-Ym1).^2)/sum((TinVector(end-864:end)-Ym1).^2);
hold off;

figure(5);
plot(TinVector(end-864:end),x(end-864:end,1),'go');
hold on;
plot(TinVector(end-864:end),ysim(end-864:end),'b-')

Y=[HinVector ones(size(y(:,4)))];

d=Y\y(:,4);

hsim=Y*d;

figure(6);
plot(HinVector,y(:,4),'go');
hold on;
plot(HinVector,hsim,'b-')
% Calculo del coeficiente de determinacion
Hm=mean(HinVector(end-864:end));
R22=sum((y(:,4)-Hm).^2)/sum((HinVector-Hm).^2);

[B,BINT,R,RINT,STATS]=regress(y(:,4),Y);
R22=STATS(1);
xlabel('Humedad medida [%]');
ylabel('Humedad estimada [%]');

Hm1=mean(HinVector(end-864:end));
R221=sum((y(end-864:end,1)-Hm1).^2)/sum((HinVector(end-864:end)-Hm1).^2);
hold off;

RCMET=sqrt(((TinVector-x(:,1))*(TinVector-x(:,1)))/size(TinVector,1));
RCMEH=sqrt(((HinVector-y(:,4))*(HinVector-y(:,4)))/size(HinVector,1));

```

Programa Tempha.c

```
/*
 * sfuntmpl.c: C template for a level 2 S-function.
 *
 * -----
 * | See matlabroot/simulink/src/sfuntmpl.doc for a more detailed template |
 * -----
 *
 * Copyright (c) 1990-1998 by The MathWorks, Inc. All Rights Reserved.
 * $Revision: 1.18 $
 */

/*
 * You must specify the S_FUNCTION_NAME as the name of your S-function
 * (i.e. replace sfuntmpl with the name of your S-function).
 */

#define S_FUNCTION_LEVEL 2
#define S_FUNCTION_NAME tempha

/*
 * Need to include simstruc.h for the definition of the SimStruct and
 * its associated macro definitions.
 */
#include "simstruc.h"
#include <math.h>

#define u(element)(*uPtrs[element])

/*Used to read the parameter number 1*/
#define Temp0      p[0]
#define Ha0        p[1]
#define Suelo0     p[2]
#define Vgrh       p[3]
#define ROaire     p[4]
#define CPaire     p[5]
#define Epsilon    p[6]
#define Acl        p[7]
#define Alfocl     p[8]
#define Td         p[9]
#define Kd         p[10]
```



```

#define Ks          p[11]
#define Cs          p[12]
#define gwb         p[13]
#define L           p[14]
#define Ke          p[15]
#define gwsmin      p[16]
#define gwsmax      p[17]
#define Gami        p[18]
#define Kappa       p[19]
#define Theta       p[20]
#define Nu          p[21]
#define Alfam       p[22]
#define Fi          p[23]
#define Ve          p[24]

```

```

/* Error handling

```

```

* -----
*

```

```

* You should use the following technique to report errors encountered within
* an S-function:

```

```

*
*     ssSetErrorStatus(S,"Error encountered due to ...");
*     return;
*

```

```

* Note that the 2nd argument to ssSetErrorStatus must be persistent memory.
* It cannot be a local variable. For example the following will cause
* unpredictable errors:

```

```

*
*     mdlOutputs()
*     {
*         char msg[256];      {ILLEGAL: to fix use "static char msg[256];"}
*         sprintf(msg,"Error due to %s", string);
*         ssSetErrorStatus(S,msg);
*         return;
*     }
*

```

```

* See matlabroot/simulink/src/sfunctmpl.doc for more details.
*/

```

```

/*=====
* S-function methods *
*=====*/

```

```

/* Function: mdlInitializeSizes

```

```

=====

```

```

* Abstract:

```

```

* The sizes information is used by Simulink to determine the S-function
* block's characteristics (number of inputs, outputs, states, etc.).
*/
static void mdlInitializeSizes(SimStruct *S)
{
    /* See sfuntmpl.doc for more details on the macros below */

    ssSetNumSFcnParams(S, 1); /* Number of expected parameters */
    if (ssGetNumSFcnParams(S) != ssGetSFcnParamsCount(S)) {
        /* Return if number of expected != number of actual parameters */
        return;
    }

    ssSetNumContStates(S, 3);
    ssSetNumDiscStates(S, 0);

    if (!ssSetNumInputPorts(S, 1)) return;
    /*Entradas del modelo*/
    ssSetInputPortWidth(S, 0, 5);

    ssSetInputPortDirectFeedThrough(S, 0, 0);

    if (!ssSetNumOutputPorts(S, 1)) return;
    ssSetOutputPortWidth(S, 0, 4);

    ssSetNumSampleTimes(S, 1);
    ssSetNumRWork(S, 0);
    ssSetNumIWork(S, 0);
    ssSetNumPWork(S, 0);
    ssSetNumModes(S, 0);
    ssSetNumNonsampledZCs(S, 0);

    ssSetOptions(S, 0);
}

/* Function: mdlInitializeSampleTimes
=====
* Abstract:
* This function is used to specify the sample time(s) for your
* S-function. You must register the same number of sample times as
* specified in ssSetNumSampleTimes.
*/
static void mdlInitializeSampleTimes(SimStruct *S)
{
    ssSetSampleTime(S, 0, CONTINUOUS_SAMPLE_TIME);
    ssSetOffsetTime(S, 0, 0.0);
}

```

```

}

#define MDL_INITIALIZE_CONDITIONS /* Change to #undef to remove function
*/
#if defined(MDL_INITIALIZE_CONDITIONS)
/* Function: mdlInitializeConditions
=====
* Abstract:
* In this function, you should initialize the continuous and discrete
* states for your S-function block. The initial states are placed
* in the state vector, ssGetContStates(S) or ssGetRealDiscStates(S).
* You can also perform any other initialization activities that your
* S-function may require. Note, this routine will be called at the
* start of simulation and if it is present in an enabled subsystem
* configured to reset states, it will be call when the enabled subsystem
* restarts execution to reset the states.
*/
static void mdlInitializeConditions(SimStruct *S)
{
    real_T *x0=ssGetContStates(S);
    double *p=mxGetPr(ssGetSFcnParam(S,0));

    x0[0]=Temp0;
    x0[1]=Ha0;
    x0[2]=Suelo0;

}
#endif /* MDL_INITIALIZE_CONDITIONS */


#define MDL_START /* Change to #undef to remove function */
#if defined(MDL_START)
/* Function: mdlStart
=====
* Abstract:
* This function is called once at start of model execution. If you
* have states that should be initialized once, this is the place
* to do it.
*/
static void mdlStart(SimStruct *S)
{
}
#endif /* MDL_START */
/* Function: mdlOutputs
=====

```

```

* Abstract:
* In this function, you compute the outputs of your S-function
* block. Generally outputs are placed in the output vector, ssGetY(S).
*/
static void mdlOutputs(SimStruct *S, int_T tid)
{

real_T *y=ssGetOutputPortRealSignal(S,0);
real_T      *x=ssGetContStates(S);
InputRealPtrsType uPtrs=ssGetInputPortRealSignalPtrs(S,0);

y[0]=x[0];
y[1]=x[1];
y[2]=x[2];
/* Ecuacion que calcula la humedad relativa a partir de la humedad absoluta
proporcionada por el modelo y[2]=...*/
y[3]=100*(x[1]/(0.611*((0.61064*pow((1+1.4142136*sin(0.00581776*x[0])),8.827)/9
8.1))));

}

```

```

#define MDL_UPDATE /* Change to #undef to remove function */
#ifdef MDL_UPDATE
/* Function: mdlUpdate
=====
* Abstract:
* This function is called once for every major integration time step.
* Discrete states are typically updated here, but this function is useful
* for performing any tasks that should only take place once per
* integration step.
*/
static void mdlUpdate(SimStruct *S, int_T tid)
{
}
#endif /* MDL_UPDATE */

```

```

#define MDL_DERIVATIVES /* Change to #undef to remove function */
#ifdef MDL_DERIVATIVES
/* Function: mdlDerivatives
=====
* Abstract:
* In this function, you compute the S-function block's derivatives.
* The derivatives are placed in the derivative vector, ssGetdX(S).

```

```

*/
static void mdlDerivatives(SimStruct *S)
{
    real_T *dx=ssGetdX(S);
    real_T*x=ssGetContStates(S);
    InputRealPtrsType uPtrs=ssGetInputPortRealSignalPtrs(S,0);
    double *p=mxGetPr(ssGetSFcnParam(S,0));
    double Qsol,Qvent, Qconvec, Qsuelo;
    double Fv,Etp,Fvent;
    double Delta1,Delta2,Rn,Lamda,gws;
    double gD,Di,Psat,xSat,Cvapo;
    double TasaVentilacion,Delta,Winter,TasaVentilacion2;

    /*
    Variables de entrada del modelo
    u(0): Radiacion fuera del invernadero
    u(1): Velocidad del viento
    u(2): Temperatura fuera del invernadero
    u(3): Humedad absoluta externa
    u(4):Vector de apertura de ventanas
    */

    TasaVentilacion=Kappa+Theta*u(1)+Nu*u(1)*u(4);
    TasaVentilacion2=Kappa+Fi*u(1)+Ve*u(1)*u(4);
    Fvent=TasaVentilacion;
    Winter=TasaVentilacion2;
    Psat=0.61064*pow((1+1.4142136*sin(5.81776e-3*x[0])),8.827);
    xSat=0.611*Psat/9.81;

    Di=Psat*(1-(x[1]/xSat));
    if (Di>=0.361)
        gD=0.39/(0.029+Di);
    else
        gD=1;

    /*Ecuaciones de la temperatura interna*/

    Qvent=Fvent*ROaire*CPaire*(x[0]-u(2));
    Qsol=Epsilon*AcI*u(0);
    Qconvec=AlfacI*AcI*(x[0]-u(2));
    Qsuelo=Ks*AcI*(x[2]-x[0]);

    /*Ecuaciones de la humedad absoluta interna*/

    Delta1=0.61064*pow((1+1.4142136*sin(0.00581776*(u(2)+0.5))),8.827);
    Delta2=0.61064*pow((1+1.4142136*sin(0.00581776*(u(2)-0.5))),8.827);
    Delta=Delta1-Delta2;

```

```

Rn=(1-exp(-Ke*L))*u(0)*Epsilon;
Lamda=(3.1468-(0.002365)*(x[0]+273.16))*1000000.0;
gws=gwsmin+(gwsmax-gwsmin)*(1-exp(-(Epsilon*u(0))/160))*gD;
Fv=Winter*ROaire*(u(3)-x[1]);

Etp=(Acl*(Delta*Rn+2*L*ROaire*CPaire*Di*gwb))/((Delta+Gami*(1+gwb/gws))*Lamda);

if (x[1] < xSat)
    Cvapo=1.0;
else
    Cvapo=0.0;

dx[0]=(1/(ROaire*CPaire*Vgrh))*(Qsol-Qvent-Qconvec+Qsuelo);
dx[1]=(1/(ROaire*Vgrh))*(Fv+Cvapo*Etp);
dx[2]=(1/Cs)*(-Ks*(x[2]-x[0])+Kd*(Td-x[2])+Epsilon*u(0)*Alfam);

}
#endif /* MDL_DERIVATIVES */

/* Function: mdlTerminate
=====
* Abstract:
* In this function, you should perform any actions that are necessary
* at the termination of a simulation. For example, if memory was
* allocated in mdlInitializeConditions, this is the place to free it.
*/
static void mdlTerminate(SimStruct *S)
{
}

/*=====
* See sfuntmpl.doc for the optional S-function methods *
*=====*/

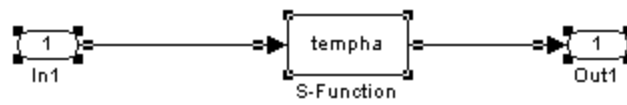
/*=====
* Required S-function trailer *
*=====*/

#ifdef MATLAB_MEX_FILE /* Is this file being compiled as a MEX-file? */
#include "simulink.c"/* MEX-file interface mechanism */
#else
#include "cg_sfun.h"/* Code generation registration function */

```

#endif

Programa Simgrh.mdl



APÉNDICE 2. Ecuaciones de sensibilidad.

La manera de ordenar los componentes de la matriz **A** es la siguiente:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f1}{\partial T_{in}} & \frac{\partial f1}{\partial H_{in}} & \frac{\partial f1}{\partial T_s} \\ \frac{\partial f2}{\partial T_{in}} & \frac{\partial f2}{\partial H_{in}} & \frac{\partial f2}{\partial T_s} \\ \frac{\partial f3}{\partial T_{in}} & \frac{\partial f3}{\partial H_{in}} & \frac{\partial f3}{\partial T_s} \end{bmatrix}$$

Derivada parcial de la primera función con respecto al primer estado.

$$\frac{\partial f1}{\partial x_1} = \frac{1}{V_{grh} \rho_{aire} CP_{aire}} \left[\frac{\partial Q_{sol}}{\partial T_{in}} - \frac{\partial Q_{vent}}{\partial T_{in}} - \frac{\partial Q_{convec}}{\partial T_{in}} + \frac{\partial Q_{suelo}}{\partial T_{in}} \right] \quad (109)$$

$$\frac{\partial Q_{sol}}{\partial T_{in}} = 0 \quad (110)$$

$$\frac{\partial Q_{vent}}{\partial T_{in}} = F_{vent} * \rho_{aire} * CP_{aire} \quad (111)$$

$$\left| \frac{\partial Q_{convec}}{\partial T_{in}} \right| = \alpha_{cl} * A_{cl} \quad (112)$$

$$\frac{\partial Q_{suelo}}{\partial T_{in}} = -k_s * A_{cl} \quad (113)$$

$$\frac{\partial f1}{\partial x_1} = \frac{\partial f1}{\partial T_{in}} = \frac{1}{V_{grh} * \rho_{aire} * CP_{aire}} \left[-F_{vent} * \rho_{aire} * CP_{aire} - \alpha_{cl} * A_{cl} - K_s * A_{cl} \right] \quad (114)$$

Derivada parcial de la segunda función con respecto al primer estado.

$$\frac{\partial f2}{\partial x_1} = \frac{1}{\rho_{aire} * V_{grh}} \left[\frac{\partial \Phi_{inter}}{\partial T_{in}} + C_{vapo} * \frac{\partial ETP}{\partial T_{in}} \right] \quad (115)$$

$$\frac{\partial \Phi_{inter}}{\partial T_{in}} = 0 \quad (116)$$

$$dgDT_{in} = \frac{-0.39}{(0.029 + Di)^2 * dDiT_{in}} \quad (117)$$

$$AD = \left(\Delta + \gamma * \left(1 + \frac{gwb}{gws} \right) \right) * -2365 \quad (118)$$

$$d22T_{in} = \lambda * d\Delta T_{in} + \gamma * gwb * \left(\frac{-1}{gws^2} \right) * (gws_{max} - gws_{min}) * \left(1 - \exp\left(\frac{-\varepsilon * Rad_{out}}{160} \right) \right) * dgDT_{in} + AD \quad (119)$$

$$dP_{sat2}(T_{in}) = 0.0443475 * (1 + 1.4142136 * \sin(0.00581776 * T_{in} - 0.002908))^{7.827} * \cos(0.00581776 * T_{in} - 0.002908) \quad (120)$$

$$dP_{sat1}(T_{in}) = 0.0443475 * (1 + 1.4142136 * \sin(0.00581776 * T_{in} + 0.002908))^{7.827} * \cos(0.00581776 * T_{in} + 0.002908) \quad (121)$$

$$d\Delta T_{in} = dP_{sat1}(T_{in}) - dP_{sat2}(T_{in}) \quad (122)$$

$$dP_{sat}(T_{in}) = 0.0443475 * (1 + 1.4142136 * \sin(0.00581776))^{7.827} * \cos(0.00581776 * T_{in}) \quad (122)$$

$$dDiT_{in} = P_{sat}(T_{in}) * \left(\frac{H_{in}}{x_{sat}^2} \right) * \left(\frac{0.611}{x_{sat}^2} \right) * dP_{sat}(T_{in}) \quad (123)$$

$$d21T_{in} = A_{cl} * Rn * d\Delta T_{in} + 2 * L * \rho_{aire} * CP_{aire} * gwb * dDiT_{in} \quad (124)$$

$$d2T_{in}Num = \left(\Delta + \gamma * \left(1 + \frac{gwb}{gws} \right) \right) * \lambda * d2T_{in} - A_{cl} * (\Delta * Rn + 2 * L * \rho_{aire} * CP_{aire} * Di * gwb) * d2T_{in} \quad (125)$$

$$d2T_{in}den = \left(\lambda * \left(\Delta + \gamma * \left(1 + \frac{gwb}{gws} \right) \right) \right)^2 \quad (126)$$

$$C_{vapo} * \frac{\partial ETP}{\partial T_{in}} = C_{vapo} * \frac{(d2T_{in} Num)}{d2T_{in} den} \quad (127)$$

Derivada parcial de la tercera función con respecto al primer estado.

$$\frac{\partial f3}{\partial x1} = \frac{1}{C_s} \left[\frac{\partial Q_{suelo-suelo}}{\partial T_{in}} - \frac{\partial Q_{suelo-aire}}{\partial T_{in}} + \frac{\partial Q_{sm}}{\partial T_{in}} \right] \quad (128)$$

$$\frac{\partial Q_{suelo-suelo}}{\partial T_{in}} = 0 \quad (129)$$

$$\frac{\partial Q_{suelo-aire}}{\partial T_{in}} = -k_s * A_{cl} \quad (130)$$

$$\frac{\partial Q_{sm}}{\partial T_{in}} = 0 \quad (131)$$

$$\frac{\partial f3}{\partial x1} = \frac{\partial f3}{\partial T_{in}} = \frac{k_s * A_{cl}}{C_s} \quad (132)$$

Derivada parcial de la primera función con respecto al segundo estado.

$$\frac{\partial f1}{\partial x2} = \frac{1}{V_{grh} \rho_{aire} CP_{aire}} \left[\frac{\partial Q_{sol}}{\partial H_{in}} - \frac{\partial Q_{vent}}{\partial H_{in}} - \frac{\partial Q_{convec}}{\partial H_{in}} + \frac{\partial Q_{suelo}}{\partial H_{in}} \right] \quad (133)$$

$$\frac{\partial Q_{sol}}{\partial H_{in}} = 0 \quad (134)$$

$$\frac{\partial Q_{vent}}{\partial H_{in}} = 0 \quad (135)$$

$$\frac{\partial Q_{convec}}{\partial H_{in}} = 0 \quad (136)$$

$$\frac{\partial Q_{suelo}}{\partial H_{in}} = 0 \quad (137)$$

$$\frac{\partial f1}{\partial x2} = \frac{\partial f1}{\partial H_{in}} = 0 \quad (138)$$

Derivada parcial de la segunda función con respecto al segundo estado.

$$\frac{\partial f2}{\partial x2} = \frac{\partial f2}{\partial H_{in}} = \frac{1}{\rho_{aire} * V_{grh}} \left[\frac{\partial \Phi_{inter}}{\partial H_{in}} + C_{vapo} * \frac{\partial ETP}{\partial H_{in}} \right] \quad (139)$$

$$\frac{\partial \Phi_{inter}}{\partial H_{in}} = -\varpi_{venth} * \rho_{aire} \quad (140)$$

$$C_{vapo} * \frac{\partial ETP}{\partial H_{in}} = -C_{vapo} * \frac{2L * A_{cl} * \rho_{aire} * CP_{aire} * gwb * 9.81}{\left[\Delta + \gamma \left(1 + \frac{gwb}{gws} \right) \right] \lambda * 0.611} \quad (141)$$

$$\frac{\partial f2}{\partial x2} = \frac{\partial f2}{\partial H_{in}} = \frac{1}{\rho_{aire} * V_{grh}} \left[-\varpi_{venth} * \rho_{aire} - C_{vapo} * \frac{2L * A_{cl} * \rho_{aire} * CP_{aire} * gwb * 9.81}{\left[\Delta + \gamma \left(1 + \frac{gwb}{gws} \right) \right] \lambda * 0.611} \right] \quad (142)$$

Derivada parcial de la tercera función con respecto al segundo estado.

$$\frac{\partial f3}{\partial x2} = \frac{1}{C_s} \left[\frac{\partial Q_{suelo-suelo}}{\partial H_{in}} - \frac{\partial Q_{suelo-aire}}{\partial H_{in}} + \frac{\partial Q_{sm}}{\partial H_{in}} \right] \quad (143)$$

$$\frac{\partial Q_{suelo-suelo}}{\partial H_{in}} = 0 \quad (144)$$

$$\frac{\partial Q_{suelo-aire}}{\partial H_{in}} = 0 \quad (145)$$

$$\frac{\partial Q_{sm}}{\partial H_{in}} = 0 \quad (146)$$

$$\frac{\partial f3}{\partial x2} = \frac{\partial f3}{\partial H_{in}} = 0 \quad (147)$$

Derivada parcial de la primera función con respecto al tercer estado.

$$\frac{\partial f1}{\partial x3} = \frac{1}{V_{grh} \rho_{aire} CP_{aire}} \left[\frac{\partial Q_{sol}}{\partial T_s} - \frac{\partial Q_{vent}}{\partial T_s} - \frac{\partial Q_{convec}}{\partial T_s} + \frac{\partial Q_{suelo}}{\partial T_s} \right] \quad (148)$$

$$\frac{\partial Q_{sol}}{\partial T_s} = 0 \quad (149)$$

$$\frac{\partial Q_{vent}}{\partial T_s} = 0 \quad (150)$$

$$\frac{\partial Q_{convec}}{\partial T_s} = 0 \quad (151)$$

$$\frac{\partial Q_{suelo}}{\partial T_s} = - \frac{K_s * A_{cl}}{V_{grh} * \rho_{aire} * CP_{aire}} \quad (152)$$

$$\frac{\partial f1}{\partial x3} = \frac{\partial f1}{\partial T_s} = - \frac{K_s * A_{cl}}{V_{grh} * \rho_{aire} * CP_{aire}} \quad (153)$$

Derivada parcial de la segunda función con respecto al tercer estado.

$$\frac{\partial f2}{\partial x3} = \frac{\partial f2}{\partial T_s} = \frac{1}{\rho_{aire} * V_{grh}} \left[\frac{\partial \Phi_{inter}}{\partial T_s} + C_{vapo} * \frac{\partial ETP}{\partial T_s} \right] \quad (154)$$

$$\frac{\partial \Phi_{inter}}{\partial T_s} = 0 \quad (155)$$

$$C_{vapo} * \frac{\partial ETP}{\partial T_s} = 0 \quad (156)$$

Derivada parcial de la segunda función con respecto al tercer estado.

$$\frac{\partial f2}{\partial x3} = \frac{\partial f2}{\partial T_s} = 0 \quad (157)$$

Derivada parcial de la tercera función con respecto al tercer estado.

$$\frac{\partial f3}{\partial x3} = \frac{1}{C_s} \left[\frac{\partial Q_{suelo-suelo}}{\partial T_s} - \frac{\partial Q_{suelo-aire}}{\partial T_s} + \frac{\partial Q_{sm}}{\partial T_s} \right] \quad (158)$$

$$\frac{\partial Q_{suelo-suelo}}{\partial T_s} = k_s * A_{cl} \quad (159)$$

$$\frac{\partial Q_{suelo-aire}}{\partial T_s} = k_s \quad (160)$$

$$\frac{\partial Q_{sm}}{\partial H_{in}} = 0 \quad (161)$$

$$\frac{\partial f3}{\partial x3} = \frac{\partial f3}{\partial T_s} = \frac{-K_s * A_{cl} - K_d}{C_s} \quad (162)$$

Matriz M.

La matriz **M** se construye con las derivadas parciales de cada una de las funciones con respecto a cada uno de los parámetros del modelo, la matriz **M** en este caso

tiene una dimensión de (3x19), y junto con la matriz **A** es necesaria para realizar el análisis de sensibilidad, la estructura de la matriz **M** se describe a continuación.

$$M = \begin{bmatrix} \frac{\partial f1}{\partial \varepsilon} & \frac{\partial f1}{\partial A_{cl}} & \frac{\partial f1}{\partial \alpha_{cl}} \frac{\partial f1}{\partial T_d} & \frac{\partial f1}{\partial K_d} & \frac{\partial f1}{\partial K_s} \frac{\partial f1}{\partial C_s} \frac{\partial f1}{\partial gw_b} \frac{\partial f1}{\partial L} & \frac{\partial f1}{\partial Ke} & \frac{\partial f1}{\partial gws_{min}} & \frac{\partial f1}{\partial gws_{max}} & \frac{\partial f1}{\partial \gamma} & \frac{\partial f1}{\partial \kappa} \frac{\partial f1}{\partial \theta} \frac{\partial f1}{\partial \eta} & \frac{\partial f1}{\partial \alpha_m} & \frac{\partial f1}{\partial \varphi} \frac{\partial f1}{\partial \nu} \\ \frac{\partial f2}{\partial \varepsilon} & \frac{\partial f2}{\partial A_{cl}} & \frac{\partial f2}{\partial \alpha_{cl}} \frac{\partial f2}{\partial T_d} & \frac{\partial f2}{\partial K_d} & \frac{\partial f2}{\partial K_s} \frac{\partial f2}{\partial C_s} \frac{\partial f2}{\partial gw_b} \frac{\partial f2}{\partial L} & \frac{\partial f2}{\partial Ke} & \frac{\partial f2}{\partial gws_{min}} & \frac{\partial f2}{\partial gws_{max}} & \frac{\partial f2}{\partial \gamma} & \frac{\partial f2}{\partial \kappa} \frac{\partial f2}{\partial \theta} \frac{\partial f2}{\partial \eta} & \frac{\partial f2}{\partial \alpha_m} & \frac{\partial f2}{\partial \varphi} \frac{\partial f2}{\partial \nu} \\ \frac{\partial f3}{\partial \varepsilon} & \frac{\partial f3}{\partial A_{cl}} & \frac{\partial f3}{\partial \alpha_{cl}} \frac{\partial f3}{\partial T_d} & \frac{\partial f3}{\partial K_d} & \frac{\partial f3}{\partial K_s} \frac{\partial f3}{\partial C_s} \frac{\partial f3}{\partial gw_b} \frac{\partial f3}{\partial L} & \frac{\partial f3}{\partial Ke} & \frac{\partial f3}{\partial gws_{min}} & \frac{\partial f3}{\partial gws_{max}} & \frac{\partial f3}{\partial \gamma} & \frac{\partial f3}{\partial \kappa} \frac{\partial f3}{\partial \theta} \frac{\partial f3}{\partial \eta} & \frac{\partial f3}{\partial \alpha_m} & \frac{\partial f3}{\partial \varphi} \frac{\partial f3}{\partial \nu} \end{bmatrix}$$

Derivadas parciales de la primera función con respecto a cada uno de los parámetros:

$$\frac{\partial f1}{\partial \varepsilon} = \frac{A_{cl} * Rad_{out}}{V_{grh} * \rho_{aire} * CP_{aire}} \quad (163)$$

$$\frac{\partial f1}{\partial A_{cl}} = \frac{\varepsilon * Rad_{out} - \alpha_{cl}(T_{in} - T_{out}) + k_s(T_s - T_{in})}{V_{grh} * \rho_{aire} * CP_{aire}} \quad (164)$$

$$\frac{\partial f1}{\partial \alpha_{cl}} = - \frac{A_{cl}(T_{in} - T_{out})}{V_{grh} * \rho_{aire} * CP_{aire}} \quad (165)$$

$$\frac{\partial f1}{\partial T_d} = 0 \quad (166)$$

$$\frac{\partial f1}{\partial k_d} = 0 \quad (167)$$

$$\frac{\partial f1}{\partial k_s} = \frac{A_{cl}(T_s - T_{in})}{V_{grh} * \rho_{aire} * CP_{aire}} \quad (168)$$

$$\frac{\partial f1}{\partial C_s} = 0 \quad (169)$$

$$\frac{\partial f1}{\partial gw_b} = 0 \quad (170)$$

$$\frac{\partial f1}{\partial L} = 0 \quad (171)$$

$$\frac{\partial f1}{\partial ke} = 0 \quad (172)$$

$$\frac{\partial f1}{\partial gws_{\min}} = 0 \quad (173)$$

$$\frac{\partial f1}{\partial gws_{\max}} = 0 \quad (174)$$

$$\frac{\partial f1}{\partial \gamma} = 0 \quad (175)$$

$$\frac{\partial f1}{\partial \kappa} = - \frac{(T_{in} - T_{out})}{V_{grh}} \quad (176)$$

$$\frac{\partial f1}{\partial \theta} = - \frac{V_{speed} * (T_{in} - T_{out})}{V_{grh}} \quad (177)$$

$$\frac{\partial f1}{\partial \eta} = - \frac{A_{win} * V_{speed} * (T_{in} - T_{out})}{V_{grh}} \quad (178)$$

$$\frac{\partial f1}{\partial \alpha_m} = 0 \quad (179)$$

$$\frac{\partial f1}{\partial \varphi} = 0 \quad (180)$$

$$\frac{\partial f1}{\partial \nu} = 0 \quad (181)$$

Derivadas parciales de la segunda función con respecto a cada uno de los parámetros:

$$\frac{\partial f2}{\partial \varepsilon} = \frac{C_{vapo} * A_{cl} * \Delta (1 - e^{-ke * L}) * Rad_{out}}{\rho_{aire} * V_{grh} \left[\Delta + \gamma \left(1 + \frac{gwb}{gws} \right) \right] \lambda} \quad (182)$$

$$\frac{\partial f2}{\partial A_{cl}} = \frac{C_{vapo} (\Delta * Rn + 2L * \rho_{aire} * Di * gwb * CP_{aire})}{\rho_{aire} * V_{grh} \left[\Delta + \gamma \left(1 + \frac{gwb}{gws} \right) \right] \lambda} \quad (183)$$

$$\frac{\partial f2}{\partial \alpha_{cl}} = 0 \quad (184)$$

$$\frac{\partial f2}{\partial T_d} = 0 \quad (185)$$

$$\frac{\partial f2}{\partial k_d} = 0 \quad (186)$$

$$\frac{\partial f2}{\partial k_s} = 0 \quad (187)$$

$$\frac{\partial f2}{\partial C_s} = 0 \quad (188)$$

$$\frac{\partial f2}{\partial gwb} = C_{vapo} * \frac{\left(\Delta + \gamma \left(1 + \frac{gwb}{gws} \right) \right) \left(A_{cl} * 2 * L * \rho_{aire} * CP_{aire} * Di \right) - A_{cl} (\Delta * Rn + 2 * L * \rho_{aire} * CP_{aire} * Di * gwb) * d2dengwb \left(\frac{\lambda * \gamma}{gwb} \right)}{\rho_{aire} * V_{grh} \left[\left[\Delta + \gamma \left(1 + \frac{gwb}{gws} \right) \right] \lambda \right]^2} \quad (189)$$

$$\frac{\partial f2}{\partial L} = C_{vapo} * \frac{A_{cl} * \rho_{aire} * CP_{aire} * Di * gwb + A_{cl} * \Delta * \varepsilon * Rad_{out} * ke * e^{-k * L}}{\rho_{aire} * V_{grh} \left[\Delta + \gamma \left(1 + \frac{gwb}{gws} \right) \right] \lambda} \quad (190)$$

$$\frac{\partial f2}{\partial k} = C_{vapo} * \frac{A_{cl} * \Delta * \varepsilon * Rad_{out} * L * e^{-k*L}}{\rho_{aire} * V_{grh} \left[\Delta + \gamma \left(1 + \frac{gwb}{gws} \right) \right] \lambda} \quad (191)$$

$$\frac{\partial f2}{\partial gws_{max}} = C_{vapo} * \frac{-A_{cl}(\Delta * Rn + 2 * L * \rho_{aire} CP_{aire} * Di * gwb) * \left(\lambda * \gamma - gwb * \frac{gD * \left(1 - e^{-\left(\frac{Rad_{out}}{160} \right)} \right)}{gws^2} \right)}{\rho_{aire} * V_{grh} \left[\left[\Delta + \gamma \left(1 + \frac{gwb}{gws} \right) \right] \lambda \right]^2} \quad (192)$$

$$\frac{\partial f2}{\partial \gamma} = C_{vapo} * \frac{A_{cl}(\Delta * Rn + 2 * L * \rho_{aire} CP_{aire} * Di * gwb) * \lambda * \left(1 + \frac{gwb}{gws} \right)}{\rho_{aire} * V_{grh} \left[\left[\Delta + \gamma \left(1 + \frac{gwb}{gws} \right) \right] \lambda \right]^2} \quad (193)$$

$$\frac{\partial f2}{\partial \kappa} = \frac{(H_{out} - H_{in})}{V_{grh}} \quad (194)$$

$$\frac{\partial f2}{\partial \theta} = 0 \quad (195)$$

$$\frac{\partial f2}{\partial \eta} = 0 \quad (196)$$

$$\frac{\partial f2}{\partial \alpha_m} = 0 \quad (197)$$

$$\frac{\partial f2}{\partial \varphi} = \frac{V_{speed} * (H_{out} - H_{in})}{V_{grh}} \quad (198)$$

$$\frac{\partial f2}{\partial v} = \frac{A_{win} * V_{speed} * (H_{out} - H_{in})}{V_{grh}} \quad (199)$$

Derivadas parciales de la tercera función con respecto a cada uno de los parámetros:

$$\frac{\partial f3}{\partial \varepsilon} = \frac{\alpha_m * Rad_{out}}{C_s} \quad (200)$$

$$\frac{\partial f3}{\partial A_{cl}} = -\frac{k_s(T_s - T_{in})}{C_s} \quad (201)$$

$$\frac{\partial f3}{\partial \alpha_{cl}} = 0 \quad (202)$$

$$\frac{\partial f3}{\partial T_d} = \frac{K_d}{C_s} \quad (203)$$

$$\frac{\partial f3}{\partial K_d} = \frac{T_d - T_s}{C_s} \quad (204)$$

$$\frac{\partial f3}{\partial K_s} = -\frac{A_{cl} * T_s}{C_s} \quad (205)$$

$$\frac{\partial f3}{\partial C_s} = \frac{1}{C_s^2} [-K_s(T_s - T_{in}) + K_d(T_d - T_s) + \alpha_m * Rad_{out} * \varepsilon] \quad (206)$$

$$\frac{\partial f3}{\partial gwb} = 0 \quad (207)$$

$$\frac{\partial f3}{\partial L} = 0 \quad (208)$$

$$\frac{\partial f3}{\partial ke} = 0 \quad (209)$$

$$\frac{\partial f3}{\partial gws_{min}} = 0 \quad (210)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial g^{ws}_{\max}} = 0 \quad (211)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial \gamma} = 0 \quad (212)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial \kappa} = 0 \quad (213)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial \theta} = 0 \quad (214)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial \eta} = 0 \quad (215)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial \alpha_m} = 0 \quad (216)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial \varphi} = 0 \quad (217)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial \nu} = 0 \quad (218)$$

APÉNDICE 3. Programa MATLAB-SIMULINK para hacer el análisis de sensibilidad.

Programa para simular las ecuaciones de sensibilidad (simusen.m)

archivos con los que corre este programa:

clabrili.mat, clabrile.mat, Simm.mdl, temphasen1.c

```
clear all
```

```
% load datasets
```

```
load clabrili          % load parameters: ExcelDate, Tin, Hin, Pin, Radin, Tsoil
```

```
load clabrile          % load parameters: ExcelDate, Tout, Hout Pout, Radout, Vspeed,  
Vdir,Rain
```

```
%load clmayoex;
```

```
%load clmayoin;
```

```
% select days to make a run
```

```
startday=1;
```

```
endday=18;
```

```
nrdays=endday-startday;
```

```
T=[0:300:(nrdays+1)*60*60*24-300]';
```

```
Aw=100;
```

```
Awc=Aw*[zeros(108,1); ones(96,1); zeros(84,1)];
```

```
ToutVector=[];
```

```
RadoutVector=[];
```

```
VspeedVector=[];
```

```
TinVector=[];
```

```
VectorDate=[];
```

```
AwcVector=[];
```

```
HoutVector=[];
```

```
HinVector=[];
```

```
RadinVector=[];
```

```
MatlabDate = datenum('30-Dec-1899') + ExcelDate;
```

```
for i=startday:endday,
```

```
    ToutVector=[ToutVector;Tout(:,i)];
```

```
    RadoutVector=[RadoutVector;Radout(:,i)];
```

```
    VspeedVector=[VspeedVector;Vspeed(:,i)];
```

```
    AwcVector=[AwcVector; Awc];
```

```
    TinVector=[TinVector;Tin(:,i)];
```

```

    VectorDate=[VectorDate;MatlabDate(:,i)];
    HoutVector=[HoutVector;Hout(:,i)];
    HinVector=[HinVector;Hin(:,i)];
    RadinVector=[RadinVector;Radin(:,i)];
end

% Transforma datos de HR a HA para el exterior del invernadero
Pat=98.1;           % Presion de una atmosfera KPa
PSatT=0.61064*(1+1.4142136.*sin(5.81776e-3.*ToutVector)).^8.827;
Hasat=0.611*PSatT/Pat;
HaoutVector=Hasat.*HoutVector/100;

% Transforma datos de HR a HA para el interior del invernadero
PSatT=0.61064*(1+1.4142136.*sin(5.81776e-3.*TinVector)).^8.827;
Hasat=0.611*PSatT/Pat;
HainVector=Hasat.*HinVector/100;

LAI=1;

Tininit =TinVector(1,1);
Hainit =HainVector(1,1);

Temp0 = Tininit;
Ha0 = Hainit;
Suelo0 =15;
Vgrh = 3950;
Roaire = 1.2;
Cpaire = 1000;
Epsilon = 0.64;
Acl = 1040;
Alfacl = 10;
Td = 25;
Kd = 2;
Ks = 500;
Cs = 120000;
gwb = 0.004;
L = 1;
Ke = 0.6;
gwsmin = 0.0005;
gwsmax = 0.0155;
Gami = 0.066;
Kappa = 5.03;
Theta = 4.02;
Nu = 3.68;
Alfam = 0.1;

```

```
Fi = 4.02;  
Ve = 3.68;
```

```
Parametros=[Temp0 Ha0 Suelo0 Vgrh ROaire CPaire Epsilon Acl Alfacl Td Kd Ks  
Cs gwb L Ke gwsmin gwsmax Gami Kappa Theta Nu Alfam Fi Ve];
```

```
UT=[T RadoutVector VspeedVector*3.6 ToutVector HaoutVector AwcVector];
```

```
myopts = simset('Solver','ode23s','reltol',1e-6);
```

```
[t,x,y]= sim('simm',T,myopts,UT);
```

```
t=VectorDate  
xmin=min(VectorDate)  
xmax=max(VectorDate)  
figure(1);  
plot(t,x(:,1),t,TinVector,':')  
legend('simulado','observado')  
xlabel('Tiempo [d]')  
ylabel('Temperatura [°C]')  
datetick('x','mm/dd')  
shg
```

```
a='ready with run'
```

```
figure(2)  
T1=T/(60*60*24-300);
```

```
plot(T1,x(:,2),T1,HainVector);  
legend('simulado','observado');
```

```
figure(3);  
plot(T1,y(:,4),T1,HinVector);
```

Programa temphasen1.c

```
/*
 * sfuntmpl.c: C template for a level 2 S-function.
 *
 * -----
 * | See matlabroot/simulink/src/sfuntmpl.doc for a more detailed template |
 * -----
 *
 * Copyright (c) 1990-1998 by The MathWorks, Inc. All Rights Reserved.
 * $Revision: 1.18 $
 */

/*
 * You must specify the S_FUNCTION_NAME as the name of your S-function
 * (i.e. replace sfuntmpl with the name of your S-function).
 */

#define S_FUNCTION_LEVEL 2
#define S_FUNCTION_NAME temphasen1

/*
 * Need to include simstruc.h for the definition of the SimStruct and
 * its associated macro definitions.
 */
#include "simstruc.h"
#include <math.h>
#define u(element)(*uPtrs[element])

/*Used to read the parameter number 1*/
#define Temp0      p[0]
#define Ha0        p[1]
#define Suelo0     p[2]
#define Vgrh       p[3]
#define ROaire     p[4]
#define CPaire     p[5]
#define Epsilon    p[6]
#define Acl        p[7]
#define Alfacl     p[8]
#define Td         p[9]
#define Kd         p[10]
#define Ks         p[11]
#define Cs         p[12]
#define gwb        p[13]
```

```

#define L          p[14]
#define Ke         p[15]
#define gwsmin     p[16]
#define gwsmax     p[17]
#define Gami       p[18]
#define Kappa      p[19]
#define Theta      p[20]
#define Nu         p[21]
#define Alfam      p[22]
#define Fi         p[23]
#define Ve         p[24]

/* Error handling
 * -----
 *
 * You should use the following technique to report errors encountered within
 * an S-function:
 *
 * ssSetErrorStatus(S,"Error encountered due to ...");
 * return;
 *
 * Note that the 2nd argument to ssSetErrorStatus must be persistent memory.
 * It cannot be a local variable. For example the following will cause
 * unpredictable errors:
 *
 * mdlOutputs()
 * {
 * char msg[256];      {ILLEGAL: to fix use "static char msg[256];"}
 * sprintf(msg,"Error due to %s", string);
 * ssSetErrorStatus(S,msg);
 * return;
 * }
 *
 * See matlabroot/simulink/src/sfunctmpl.doc for more details.
 */

/*=====
 * S-function methods *
 *=====*/

/*
Function:                                mdlInitializeSizes
=====
 * Abstract:
 * The sizes information is used by Simulink to determine the S-function
 * block's characteristics (number of inputs, outputs, states, etc.).
 */
static void mdlInitializeSizes(SimStruct *S)

```



```

{
    /* See sfuntmpl.doc for more details on the macros below */

    ssSetNumSFcnParams(S, 1); /* Number of expected parameters */
    if (ssGetNumSFcnParams(S) != ssGetSFcnParamsCount(S)) {
        /* Return if number of expected != number of actual parameters */
        return;
    }

    ssSetNumContStates(S, 60);
    ssSetNumDiscStates(S, 0);

    if (!ssSetNumInputPorts(S, 1)) return;
    /*Entradas del modelo*/
    ssSetInputPortWidth(S, 0, 5);

    ssSetInputPortDirectFeedThrough(S, 0, 0);

    if (!ssSetNumOutputPorts(S, 1)) return;
    ssSetOutputPortWidth(S, 0, 61);

    ssSetNumSampleTimes(S, 1);
    ssSetNumRWork(S, 0);
    ssSetNumIWork(S, 0);
    ssSetNumPWork(S, 0);
    ssSetNumModes(S, 0);
    ssSetNumNonsampledZCs(S, 0);
    ssSetOptions(S, 0);
}

/*Function:mdlInitializeSampleTimes
=====
* Abstract:
* This function is used to specify the sample time(s) for your
* S-function. You must register the same number of sample times as
* specified in ssSetNumSampleTimes.
*/
static void mdlInitializeSampleTimes(SimStruct *S)
{
    ssSetSampleTime(S, 0, CONTINUOUS_SAMPLE_TIME);
    ssSetOffsetTime(S, 0, 0.0);
}
#define MDL_INITIALIZE_CONDITIONS /* Change to #undef to remove function
*/
#if defined(MDL_INITIALIZE_CONDITIONS)

```

```

/*Function:mdlInitializeConditions
=====
* Abstract:
* In this function, you should initialize the continuous and discrete
* states for your S-function block. The initial states are placed
* in the state vector, ssGetContStates(S) or ssGetRealDiscStates(S).
* You can also perform any other initialization activities that your
* S-function may require. Note, this routine will be called at the
* start of simulation and if it is present in an enabled subsystem
* configured to reset states, it will be call when the enabled subsystem
* restarts execution to reset the states.
*/
static void mdlInitializeConditions(SimStruct *S)
{
    real_T *x0=ssGetContStates(S);
    double *p=mxGetPr(ssGetSFcnParam(S,0));
    int i;

    x0[0]=Temp0;
    x0[1]=Ha0;
    x0[2]=Suelo0;

/*CONDICIONES INICIALES*/
for(i=3;i<63;i++)
    x0[i]=0.0;

}
#endif /* MDL_INITIALIZE_CONDITIONS */
#define MDL_START /* Change to #undef to remove function */
#if defined(MDL_START)
/*Function:mdlStart
=====
* Abstract:
* This function is called once at start of model execution. If you
* have states that should be initialized once, this is the place
* to do it.
*/
static void mdlStart(SimStruct *S)
{
}
#endif /* MDL_START */

/*Function:mdlOutputs
=====
* Abstract:
* In this function, you compute the outputs of your S-function
* block. Generally outputs are placed in the output vector, ssGetY(S).

```

```

*/
static void mdlOutputs(SimStruct *S, int_T tid)
{
    real_T *y=ssGetOutputPortRealSignal(S,0);
    real_T      *x=ssGetContStates(S);
    InputRealPtrsType uPtrs=ssGetInputPortRealSignalPtrs(S,0);
    double *p=mxGetPr(ssGetSFcnParam(S,0));

    y[0]=x[0];
    y[1]=x[1];
    y[2]=x[2];
    /* Ecuacion que calcula la humedad relativa a partir de la humedad absoluta
    proporcionada por el modelo y[2]=....*/
    y[3]=100*(x[1]/(0.611*((0.61064*pow((1+1.4142136*sin(0.00581776*x[0])),8.827)/9
    8.1)))));

    /* Sensibilidades relativas con respecto al parametro Epsilon*/

    y[4]=x[3]*Epsilon/x[0];
    y[5]=x[4]*Epsilon/x[1];
    y[6]=x[5]*Epsilon/x[2];

    y[7]=x[6]*Acl/x[0];
    y[8]=x[7]*Acl/x[1];
    y[9]=x[8]*Acl/x[2];

    y[10]=x[9]*Alfac/x[0];
    y[11]=x[10]*Alfac/x[1];
    y[12]=x[11]*Alfac/x[2];

    y[13]=x[12]*Td/x[0];
    y[14]=x[13]*Td/x[1];
    y[15]=x[14]*Td/x[2];

    y[16]=x[15]*Kd/x[0];
    y[17]=x[16]*Kd/x[1];
    y[18]=x[17]*Kd/x[2];

    y[19]=x[18]*Ks/x[0];
    y[20]=x[19]*Ks/x[1];
    y[21]=x[20]*Ks/x[2];

    y[22]=x[21]*Cs/x[0];
    y[23]=x[22]*Cs/x[1];
    y[24]=x[23]*Cs/x[2];

```

$y[25]=x[24]*gwb/x[0];$
 $y[26]=x[25]*gwb/x[1];$
 $y[27]=x[26]*gwb/x[2];$

$y[28]=x[27]*L/x[0];$
 $y[29]=x[28]*L/x[1];$
 $y[30]=x[29]*L/x[2];$

$y[31]=x[30]*Ke/x[0];$
 $y[32]=x[31]*Ke/x[1];$
 $y[33]=x[32]*Ke/x[2];$

$y[34]=x[33]*gwsmin/x[0];$
 $y[35]=x[34]*gwsmin/x[1];$
 $y[36]=x[35]*gwsmin/x[2];$

$y[37]=x[36]*gwsmax/x[0];$
 $y[38]=x[37]*gwsmax/x[1];$
 $y[39]=x[38]*gwsmax/x[2];$

$y[40]=x[39]*Gami/x[0];$
 $y[41]=x[40]*Gami/x[1];$
 $y[42]=x[41]*Gami/x[2];$

$y[43]=x[42]*Kappa/x[0];$
 $y[44]=x[43]*Kappa/x[1];$
 $y[45]=x[44]*Kappa/x[2];$

$y[46]=x[45]*Theta/x[0];$
 $y[47]=x[46]*Theta/x[1];$
 $y[48]=x[47]*Theta/x[2];$

$y[49]=x[48]*Nu/x[0];$
 $y[50]=x[49]*Nu/x[1];$
 $y[51]=x[50]*Nu/x[2];$

$y[52]=x[51]*Alfam/x[0];$
 $y[53]=x[52]*Alfam/x[1];$
 $y[54]=x[53]*Alfam/x[2];$

$y[55]=x[54]*Fi/x[0];$
 $y[56]=x[55]*Fi/x[1];$
 $y[57]=x[56]*Fi/x[2];$

$y[58]=x[57]*Ve/x[0];$
 $y[59]=x[58]*Ve/x[1];$

```
y[60]=x[59]*Ve/x[2];
```

```
}
```

```
#define MDL_UPDATE /* Change to #undef to remove function */
```

```
#if defined(MDL_UPDATE)
```

```
/*Function:mdlUpdate
```

```
=====
```

```
* Abstract:
```

```
* This function is called once for every major integration time step.
```

```
* Discrete states are typically updated here, but this function is useful
```

```
* for performing any tasks that should only take place once per
```

```
* integration step.
```

```
*/
```

```
static void mdlUpdate(SimStruct *S, int_T tid)
```

```
{
```

```
}
```

```
#endif /* MDL_UPDATE */
```

```
#define MDL_DERIVATIVES /* Change to #undef to remove function */
```

```
#if defined(MDL_DERIVATIVES)
```

```
/*
```

```
Function:
```

```
mdlDerivatives
```

```
=====
```

```
* Abstract:
```

```
* In this function, you compute the S-function block's derivatives.
```

```
* The derivatives are placed in the derivative vector, ssGetdX(S).
```

```
*/
```

```
static void mdlDerivatives(SimStruct *S)
```

```
{
```

```
real_T *dx=ssGetdX(S);
```

```
real_T*x=ssGetContStates(S);
```

```
InputRealPtrsType uPtrs=ssGetInputPortRealSignalPtrs(S,0);
```

```
double *p=mxGetPr(ssGetSFcnParam(S,0));
```

```
double Qsol,Qvent, Qconvec, Qsuelo;
```

```
double Fv,Etp,Fvent;
```

```
double Delta1,Delta2,Rn,Lamda,gws;
```

```
double gD,Di,Psat,xSat,Cvapo;
```

```
double TasaVentilacion,Delta,TasaVentilacion2,Winter;
```

```
/*matriz A*/
```

```
double d1Tin,dPsatTi,dxSatTi,dIxSatTi,dDiTi,dLamdaTi;
```

```
double
```

```
d2Tin,d3Tin,
```

```
d1Hin,d2Hin,d3Hin,d1Ts,d2Ts,d3Ts,dDeltaTi,dPsat1Ti,dPsat2Ti;
```

```

/*matriz M*/
double
d1epsilon,d1Acl,d1AlfacI,d1Td,d1Kd,d1Ks,d1Cs,d1gwb,d1L,d1Ke,d1gwsmin,d1gw
smax,d1gami,d1Kappa,d1Theta,d1Nu,d1Alfam,d1Fi,d1Ve;
double
d2epsilon,d2Acl,d2AlfacI,d2Td,d2Kd,d2Ks,d2Cs,d2gwb,d2L,d2Ke,d2gwsmin,d2gw
smax,d2gami,d2Kappa,d2Theta,d2Nu,d2Alfam,d2Fi,d2Ve;
double
d3epsilon,d3Acl,d3AlfacI,d3Td,d3Kd,d3Ks,d3Cs,d3gwb,d3L,d3Ke,d3gwsmin,d3gw
smax,d3gami,d3Kappa,d3Theta,d3Nu,d3Alfam,d3Fi,d3Ve;
double d21Tin,dgDTi,dgws1Ti,dgwsTi,d221Tin,d22Tin,d2TinNum,d2Tinden;
double
d2numgwb,d2dengwb,dgwsmin,dgwsmax,d2gwsminden,d2gwsmaxden,d2dengam
i;

```

```

double A[3][3];
double M[3][19];

```

```

/*
Variables de entrada del modelo
u(0): Radiacion fuera del invernadero
u(1): Velocidad del viento
u(2): Temperatura fuera del invernadero
u(3): Humedad absoluta externa
u(4): Vector de apertura de ventanas
*/

```

```

TasaVentilacion=Kappa+Theta*u(1)+Nu*u(1)*u(4);
TasaVentilacion2=Kappa+Fi*u(1)+Ve*u(1)*u(4);
Fvent=TasaVentilacion;
Winter=TasaVentilacion2;
Psat=0.61064*pow((1+1.4142136*sin(5.81776e-3*x[0])),8.827);
xSat=0.611*Psat/9.81;

```

```

Di=Psat*(1-(x[1]/xSat));
if (Di>=0.361)
    gD=0.39/(0.029+Di);
else
    gD=1;

```

```

/*Ecuaciones de la temperatura interna*/
Qvent=Fvent*ROaire*CPaire*(x[0]-u(2));
Qsol=Epsilon*Acl*u(0);
Qconvec=AlfacI*Acl*(x[0]-u(2));
Qsuelo=Ks*Acl*(x[2]-x[0]);

```

```
/*Ecuaciones de la humedad absoluta interna*/
```

```
Delta1=0.61064*pow((1+1.4142136*sin(0.00581776*(u(2)+0.5))),8.827);
Delta2=0.61064*pow((1+1.4142136*sin(0.00581776*(u(2)-0.5))),8.827);
Delta=Delta1-Delta2;
Rn=(1-exp(-Ke*L))*u(0)*Epsilon;
Lamda=(3.1468-(0.002365)*(x[0]+273.16))*1000000.0;
gws=gwsmin+(gwsmax-gwsmin)*(1-exp(-(Epsilon*u(0))/160))*gD;
Fv=Winter*ROaire*(u(3)-x[1]);
```

```
Etp=(Acl*(Delta*Rn+2*L*ROaire*CPaire*Di*gwb))/((Delta+Gami*(1+gwb/gws))*La
mda);
```

```
if (x[1] < xSat)
    Cvapo=1.0;
else
    Cvapo=0.0;
```

```
dx[0]=(1/(ROaire*CPaire*Vgrh))*(Qsol-Qvent-Qconvec+Qsuelo);
dx[1]=(1/(ROaire*Vgrh))*(Fv+Cvapo*Etp);
dx[2]=(1/Cs)*(-Ks*(x[2]-x[0])+Kd*(Td-x[2])+Epsilon*u(0)*Alfam);
```

```
/* matriz A */
```

```
d1Tin=(1/(Vgrh*ROaire*CPaire))*(-Fvent*ROaire*CPaire-Alfac1*Acl-Ks*Acl);
```

```
dPsat2Ti=0.4434750452275683857408e-1*pow((1+1.4142136*sin(.581776e-
2*x[0]-0.2908880e-2)),7.827)*cos(.581776e-2*x[0]-0.2908880e-2);
dPsat1Ti=0.4434750452275683857408e-1*pow((1+1.4142136*sin(0.581776e-
2*x[0]+0.2908880e-2)),7.827)*cos(.581776e-2*x[0]+0.2908880e-2);
dDeltaTi=dPsat1Ti-dPsat2Ti;
```

```
dPsatTi=0.4434750452275683857408e-1*pow((1+1.4142136*sin(.581776e-
2*x[0])),7.827)*cos(.581776e-2*x[0]);
dxSatTi=0.611/9.81*dPsatTi;
dIxSatTi=(x[1]/(xSat*xSat))*dxSatTi;
dDiTi=Psat*dIxSatTi+(1.0-x[1]/xSat)*dPsatTi;
```

```
d21Tin=Acl*Rn*dDeltaTi+2*L*ROaire*CPaire*gwb*dDiTi;
```

```
dLamdaTi=-2365.0;
dgDTi=-0.39/pow(0.029+Di,2.0)*dDiTi;
dgws1Ti=(gwsmax-gwsmin)*(1.0-exp(-(Epsilon*u(0))/160))*dgDTi;
```

```

dgwsTi=-1/(gws*gws)*dgws1Ti;
d221Tin=dDeltaTi+Gami*gwb*dgwsTi;
d22Tin=Lamda*d221Tin +(Delta+Gami*(1.0+gwb/gws))*dLamdaTi;
d2TinNum=Lamda*(Delta+Gami*(1+gwb/gws))*d21Tin-
Acl*(Delta*Rn+2*L*ROaire*CPaire*Di*gwb)*d22Tin;
d2Tinden=pow(Lamda*(Delta+Gami*(1+gwb/gws)),2.0);

d2Tin=(1/(ROaire*Vgrh))*Cvapo*d2TinNum/d2Tinden;

d3Tin=Ks*Acl/Cs;

d1Hin=0;

d2Hin=(1/(Vgrh*ROaire))*(-Winter*ROaire-
(Cvapo*(2*L*ROaire*CPaire*gwb*9.81)))/((Delta+Gami*(1.0+gwb/gws))*Lamda*0.6
1));

d3Hin=0;

d1Ts=-Ks*Acl/(Vgrh*ROaire*CPaire);

d2Ts=0;

d3Ts=-(Ks*Acl+Kd)/Cs;

/* matriz M */

d1epsilon=Acl*u(0)/(Vgrh*ROaire*CPaire);

d1Acl=(1/(Vgrh*ROaire*CPaire))*(Epsilon*u(0)-Alfaci*(x[0]-u(2))+Ks*(x[2]-x[0]));

d1Alfaci=-Acl*(x[0]-u(2))/(Vgrh*ROaire*CPaire);

d1Td=0;

d1Kd=0;

d1Ks=Acl*(x[2]-x[0])/(Vgrh*ROaire*CPaire);

d1Cs=0;

d1gwb=0;

d1L=0;

```



```

d1Ke=0;

d1gwsmin=0;

d1gwsmax=0;

d1gami=0;

d1Kappa=-(x[0]-u(2))/Vgrh;

d1Theta=-(u(1)*(x[0]-u(2)))/Vgrh;

d1Nu=-(u(4)*u(1)*(x[0]-u(2)))/Vgrh;

d1Alfam=0;

d1Fi=0;

d1Ve=0;


d2epsilon=Cvapo*(Acl*Delta*(1-exp(-
Ke*L))*u(0))/((ROaire*Vgrh)*Lamda*(Delta+Gami*(1+gwb/gws)));

d2Acl=Cvapo/(ROaire*Vgrh)*(Delta*Rn+2*L*ROaire*CPaire*Di*gwb)/((Delta+Gami
*(1+gwb/gws))*Lamda);

d2Alfac1=0;

d2Td=0;

d2Kd=0;
d2Ks=0;

d2Cs=0;

d2numgwb=Acl*2.0*L*ROaire*CPaire*Di;
d2dengwb=Lamda*Gami/gws;
d2gwb=Cvapo/(ROaire*Vgrh)*((Delta+Gami*(1+gwb/gws))*Lamda*d2numgwb-
Acl*(Delta*Rn+2*L*ROaire*CPaire*Di*gwb)*d2dengwb)/pow((Delta+Gami*(1+gwb/
gws))*Lamda,2.0);


d2L=Cvapo*(Acl*(Delta*Epsilon*u(0)*Ke*exp(-
Ke*L)+2*ROaire*CPaire*Di*gwb))/((ROaire*Vgrh)*Lamda*(Delta+Gami*(1+gwb/gw
s)));

```

$$d2Ke=Cvapo*(Acl*(Delta*u(0)*Epsilon*L*exp(-Ke*L)))/((Delta+Gami*(1+gwb/gws))*Lamda*ROaire*Vgrh);$$

$$\begin{aligned} dgwsmin &= 1-gD*(1-exp(-Epsilon*u(0)/160)); \\ dgwsmax &= gD*(1-exp(-Epsilon*u(0)/160)); \\ d2gwsmin &= Lamda*Gami*(-gwb*dgwsmin)/(gws*gws); \\ d2gwsmax &= Lamda*Gami*(-gwb*dgwsmax)/(gws*gws); \\ d2gwsmin &= Cvapo/(ROaire*Vgrh)*(- \\ &Acl*(Delta*Rn+2*L*ROaire*CPaire*Di*gwb)*d2gwsmin)/pow(Lamda*(Delta+Gami*(1+gwb/gws)),2.0); \\ d2gwsmax &= Cvapo/(ROaire*Vgrh)*(- \\ &Acl*(Delta*Rn+2*L*ROaire*CPaire*Di*gwb)*d2gwsmax)/pow(Lamda*(Delta+Gami*(1+gwb/gws)),2.0); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d2dengami &= Lamda*(1+gwb/gws); \\ d2gami &= Cvapo/(ROaire*Vgrh)*(- \\ &Acl*(Delta*Rn+2*L*ROaire*CPaire*Di*gwb)*d2dengami)/pow(Lamda*(Delta+Gami*(1+gwb/gws)),2.0); \end{aligned}$$

$$d2Kappa=(u(3)-x[1])/Vgrh;$$

$$d2Theta=0;$$

$$d2Nu=0;$$

$$d2Alfam=0;$$

$$d2Fi=u(1)*(u(3)-x[1])/Vgrh;$$

$$d2Ve=u(1)*u(4)*(u(3)-x[1])/Vgrh;$$

$$d3epsilon=Alfam*u(0)/Cs;$$

$$d3Acl=-Ks*(x[2]-x[0])/Cs;$$

$$d3Alfac=0;$$

$$d3Td=Kd/Cs;$$

$$d3Kd=(Td-x[2])/Cs;$$

$$d3Ks=-(x[2]*Acl)/Cs;$$

$$d3Cs=(1/pow(Cs,2))*((Kd*(Td-x[2]))-(Ks*(x[2]-x[0]))+Alfam*u(0)*Epsilon);$$

```

d3gwb=0;

d3L=0;

d3Ke=0;

d3gwsmin=0;

d3gwsmax=0;

d3gami=0;

d3Kappa=0;

d3Theta=0;

d3Nu=0;

d3Alfam=u(0)*Epsilon;

d3Fi=0;

d3Ve=0;

```

```

/*MATRICES DE SENSIBILIDAD*/

```

```

A[0][0]=d1Tin;
A[0][1]=d1Hin;
A[0][2]=d1Ts;
A[1][0]=d2Tin;
A[1][1]=d2Hin;
A[1][2]=d2Ts;
A[2][0]=d3Tin;
A[2][1]=d3Hin;
A[2][2]=d3Ts;

M[0][0]=d1epsilon;
M[0][1]=d1Acl;
M[0][2]=d1Alfac1;
M[0][3]=d1Td;
M[0][4]=d1Kd;
M[0][5]=d1Ks;
M[0][6]=d1Cs;
M[0][7]=d1gwb;
M[0][8]=d1L;
M[0][9]=d1Ke;

```

M[0][10]=d1gwsmin;
M[0][11]=d1gwsmax;
M[0][12]=d1gami;
M[0][13]=d1Kappa;
M[0][14]=d1Theta;
M[0][15]=d1Nu;
M[0][16]=d1Alfam;
M[0][17]=d1Fi;
M[0][18]=d1Ve;

M[1][0]=d2epsilon;
M[1][1]=d2Acl;
M[1][2]=d2Alfac1;
M[1][3]=d2Td;
M[1][4]=d2Kd;
M[1][5]=d2Ks;
M[1][6]=d2Cs;
M[1][7]=d2gwb;
M[1][8]=d2L;
M[1][9]=d2Ke;
M[1][10]=d2gwsmin;
M[1][11]=d2gwsmax;
M[1][12]=d2gami;
M[1][13]=d2Kappa;
M[1][14]=d2Theta;
M[1][15]=d2Nu;
M[1][16]=d2Alfam;
M[1][17]=d2Fi;
M[1][18]=d2Ve;

M[2][0]=d3epsilon;
M[2][1]=d3Acl;
M[2][2]=d3Alfac1;
M[2][3]=d3Td;
M[2][4]=d3Kd;
M[2][5]=d3Ks;
M[2][6]=d3Cs;
M[2][7]=d3gwb;
M[2][8]=d3L;
M[2][9]=d3Ke;
M[2][10]=d3gwsmin;
M[2][11]=d3gwsmax;
M[2][12]=d3gami;
M[2][13]=d3Kappa;
M[2][14]=d3Theta;
M[2][15]=d3Nu;
M[2][16]=d3Alfam;

M[2][17]=d3Fi;
M[2][18]=d3Ve;

/*CALCULO DE LAS ECUACIONES DE SENSIBILIDAD */

dx[3]=A[0][0]*x[3]+A[0][1]*x[4]+A[0][2]*x[5]+M[0][0];
dx[4]=A[1][0]*x[3]+A[1][1]*x[4]+A[1][2]*x[5]+M[1][0];
dx[5]=A[2][0]*x[3]+A[2][1]*x[4]+A[2][2]*x[5]+M[2][0];

dx[6]=A[0][0]*x[6]+A[0][1]*x[7]+A[0][2]*x[8]+M[0][1];
dx[7]=A[1][0]*x[6]+A[1][1]*x[7]+A[1][2]*x[8]+M[1][1];
dx[8]=A[2][0]*x[6]+A[2][1]*x[7]+A[2][2]*x[8]+M[2][1];

dx[9]=A[0][0]*x[9]+A[0][1]*x[10]+A[0][2]*x[11]+M[0][2];
dx[10]=A[1][0]*x[9]+A[1][1]*x[10]+A[1][2]*x[11]+M[1][2];
dx[11]=A[2][0]*x[9]+A[2][1]*x[10]+A[2][2]*x[11]+M[2][2];

dx[12]=A[0][0]*x[12]+A[0][1]*x[13]+A[0][2]*x[14]+M[0][3];
dx[13]=A[1][0]*x[12]+A[1][1]*x[13]+A[1][2]*x[14]+M[1][3];
dx[14]=A[2][0]*x[12]+A[2][1]*x[13]+A[2][2]*x[14]+M[2][3];

dx[15]=A[0][0]*x[15]+A[0][1]*x[16]+A[0][2]*x[17]+M[0][4];
dx[16]=A[1][0]*x[15]+A[1][1]*x[16]+A[1][2]*x[17]+M[1][4];
dx[17]=A[2][0]*x[15]+A[2][1]*x[16]+A[2][2]*x[17]+M[2][4];

dx[18]=A[0][0]*x[18]+A[0][1]*x[19]+A[0][2]*x[20]+M[0][5];
dx[19]=A[1][0]*x[18]+A[1][1]*x[19]+A[1][2]*x[20]+M[1][5];
dx[20]=A[2][0]*x[18]+A[2][1]*x[19]+A[2][2]*x[20]+M[2][5];

dx[21]=A[0][0]*x[21]+A[0][1]*x[22]+A[0][2]*x[23]+M[0][6];
dx[22]=A[1][0]*x[21]+A[1][1]*x[22]+A[1][2]*x[23]+M[1][6];
dx[23]=A[2][0]*x[21]+A[2][1]*x[22]+A[2][2]*x[23]+M[2][6];

dx[24]=A[0][0]*x[24]+A[0][1]*x[25]+A[0][2]*x[26]+M[0][7];
dx[25]=A[1][0]*x[24]+A[1][1]*x[25]+A[1][2]*x[26]+M[1][7];
dx[26]=A[2][0]*x[24]+A[2][1]*x[25]+A[2][2]*x[26]+M[2][7];

dx[27]=A[0][0]*x[27]+A[0][1]*x[28]+A[0][2]*x[29]+M[0][8];
dx[28]=A[1][0]*x[27]+A[1][1]*x[28]+A[1][2]*x[29]+M[1][8];
dx[29]=A[2][0]*x[27]+A[2][1]*x[28]+A[2][2]*x[29]+M[2][8];

dx[30]=A[0][0]*x[30]+A[0][1]*x[31]+A[0][2]*x[32]+M[0][9];
dx[31]=A[1][0]*x[30]+A[1][1]*x[31]+A[1][2]*x[32]+M[1][9];
dx[32]=A[2][0]*x[30]+A[2][1]*x[31]+A[2][2]*x[32]+M[2][9];

dx[33]=A[0][0]*x[33]+A[0][1]*x[34]+A[0][2]*x[35]+M[0][10];
dx[34]=A[1][0]*x[33]+A[1][1]*x[34]+A[1][2]*x[35]+M[1][10];

```

dx[35]=A[2][0]*x[33]+A[2][1]*x[34]+A[2][2]*x[35]+M[2][10];

dx[36]=A[0][0]*x[36]+A[0][1]*x[37]+A[0][2]*x[38]+M[0][11];
dx[37]=A[1][0]*x[36]+A[1][1]*x[37]+A[1][2]*x[38]+M[1][11];
dx[38]=A[2][0]*x[36]+A[2][1]*x[37]+A[2][2]*x[38]+M[2][11];

dx[39]=A[0][0]*x[39]+A[0][1]*x[40]+A[0][2]*x[41]+M[0][12];
dx[40]=A[1][0]*x[39]+A[1][1]*x[40]+A[1][2]*x[41]+M[1][12];
dx[41]=A[2][0]*x[39]+A[2][1]*x[40]+A[2][2]*x[41]+M[2][12];

dx[42]=A[0][0]*x[42]+A[0][1]*x[43]+A[0][2]*x[44]+M[0][13];
dx[43]=A[1][0]*x[42]+A[1][1]*x[43]+A[1][2]*x[44]+M[1][13];
dx[44]=A[2][0]*x[42]+A[2][1]*x[43]+A[2][2]*x[44]+M[2][13];

dx[45]=A[0][0]*x[45]+A[0][1]*x[46]+A[0][2]*x[47]+M[0][14];
dx[46]=A[1][0]*x[45]+A[1][1]*x[46]+A[1][2]*x[47]+M[1][14];
dx[47]=A[2][0]*x[45]+A[2][1]*x[46]+A[2][2]*x[47]+M[2][14];

dx[48]=A[0][0]*x[48]+A[0][1]*x[49]+A[0][2]*x[50]+M[0][15];
dx[49]=A[1][0]*x[48]+A[1][1]*x[49]+A[1][2]*x[50]+M[1][15];
dx[50]=A[2][0]*x[48]+A[2][1]*x[49]+A[2][2]*x[50]+M[2][15];

dx[51]=A[0][0]*x[51]+A[0][1]*x[52]+A[0][2]*x[53]+M[0][16];
dx[52]=A[1][0]*x[51]+A[1][1]*x[52]+A[1][2]*x[53]+M[1][16];
dx[53]=A[2][0]*x[51]+A[2][1]*x[52]+A[2][2]*x[53]+M[2][16];

dx[54]=A[0][0]*x[54]+A[0][1]*x[55]+A[0][2]*x[56]+M[0][17];
dx[55]=A[1][0]*x[54]+A[1][1]*x[55]+A[1][2]*x[56]+M[1][17];
dx[56]=A[2][0]*x[54]+A[2][1]*x[55]+A[2][2]*x[56]+M[2][17];

dx[57]=A[0][0]*x[57]+A[0][1]*x[58]+A[0][2]*x[59]+M[0][18];
dx[58]=A[1][0]*x[57]+A[1][1]*x[58]+A[1][2]*x[59]+M[1][18];
dx[59]=A[2][0]*x[57]+A[2][1]*x[58]+A[2][2]*x[59]+M[2][18];

}
#endif /* MDL_DERIVATIVES */

/*Function:mdlTerminate
=====
* Abstract:
*   In this function, you should perform any actions that are necessary
*   at the termination of a simulation. For example, if memory was
*   allocated in mdlInitializeConditions, this is the place to free it.
*/
static void mdlTerminate(SimStruct *S)
{
}

```

```

/*=====
 * See sfuntmpl.doc for the optional S-function methods *
 *=====*/

/*=====
 * Required S-function trailer *
 *=====*/

#ifdef MATLAB_MEX_FILE /* Is this file being compiled as a MEX-file? */
#include "simulink.c" /* MEX-file interface mechanism */
#else
#include "cg_sfun.h" /* Code generation registration function */
#endif

```

Programa simm.mdl

