



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO
INTEGRAL DEL AGUA



MODELO DINÁMICO DE BALANCE DE ENERGÍA Y EFICIENCIA EN
EL USO DE LA ENERGÍA EN LA PRODUCCIÓN DE TOMATE

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA
Y USO INTEGRAL DEL AGUA

PRESENTA

ANA CRISTINA SÁNCHEZ MARTÍNEZ

BAJO LA SUPERVISIÓN DE:

DRA. RAQUEL SALAZAR MORENO

Diciembre 2017

Chapingo, Estado de México



**MODELO DINÁMICO DE BALANCE DE ENERGÍA Y EFICIENCIA EN EL USO
DE LA ENERGÍA EN LA PRODUCCIÓN DE TOMATE**

Tesis realizada por **Ana Cristina Sánchez Martínez** bajo la dirección del Comité
Asesor indicado, aprobado por el mismo y aceptada como requisito parcial para
obtener el grado de:

**MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO
INTEGRAL DEL AGUA**

DIRECTOR: 
Dra. Raquel Salazar Moreno

ASESOR: 
Dr. Irineo Lorenzo López Cruz

ASESOR: 
Dr. Abraham Rojano Aguilar

AGRADECIMIENTOS

Al consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico recibido para la realización y culminación de este trabajo de investigación durante mi estancia en el posgrado.

A la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) por el apoyo económico brindado para la realización de mis estudios de maestría.

Al programa de posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua de la Universidad Autónoma Chapingo, por la oportunidad brindada para la realización de mis estudios de maestría.

A la Dra. Raquel Salazar, que con su acertada dirección, consejos, motivación y sugerencias hizo posible la culminación de este trabajo.

Al Dr. Irineo Lorenzo López Cruz y Dr. Abraham Rojano Aguilar, por sus sugerencias y experiencias compartidas para la realización de este trabajo.

A todas aquellas personas que desinteresadamente me brindaron su apoyo.

A ti Dios por hacer realidad mis sueños ¡Gracias!

DEDICATORIA

A mi madre GEMZA MARTÍNEZ GABRIEL, por su incondicional apoyo, amor, cariño y comprensión en los momentos más difíciles y emotivos de mi vida, por sus sabios consejos los cuales me sirvieron para cumplir mis metas y propósitos.

A mis hermanos ARACELI y ORLANDO por su amor incondicional, por todos sus consejos y ánimos para seguir adelante.

A mis sobrinas y sobrino NAHOMI, TERESA, CITLALI y RAFAEL por todos los momentos de felicidad.

DATOS BIOGRÁFICOS DE AUTOR

Nació el 24 de julio de 1991 en el municipio de Motozintla, Chiapas. Realiza sus estudios de media superior en la preparatoria del “Mariscal” en el mismo municipio de nacimiento.

En el año 2009 ingreso para tomar el curso de propedéutico en la Universidad Autónoma Chapingo y una vez concluida ingresa al departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola donde termina sus estudios de licenciatura obteniendo el título de Ingeniero Mecánica Agrícola por mérito académico en el año 2014.

En el año 2015 fue aceptada para ingresar al programa de posgrado en Ingeniería Agrícola Uso Integra del Agua.

MODELO DINÁMICO DE BALANCE DE ENERGÍA Y EFICIENCIA EN EL USO DE LA ENERGÍA EN LA PRODUCCIÓN DE TOMATE

DYNAMIC MODEL OF ENERGY BALANCE AND ENERGY USE EFFICIENCY IN TOMATO PRODUCTION

Ana Cristina Sánchez Martínez¹
Raquel Salazar Moreno²

RESUMEN

Este estudio se desarrolló en un invernadero experimental de baja tecnología de 120 m² con producción de tomate y está dividido en dos partes. En la primer parte se realizó la cuantificación del uso de energía en el invernadero para todo un ciclo agrícola, teniendo en cuenta todos los insumos en el proceso de producción, con el fin de evaluar la productividad energética en el invernadero, la cual se estimó en 0.298 kg MJ⁻¹. En la segunda parte, se implementó un modelo dinámico de balance de energía para simular la temperatura interna, considerando todos los flujos de calor. Los resultados muestran un MSE de 6.75 entre los valores de temperatura simulada y predicha. Después se realizó el análisis de sensibilidad, así como la calibración del modelo, para encontrar los parámetros más importantes y los valores óptimos. El índice de sensibilidad más alto se encontró para el coeficiente de transmisión de la cubierta. Utilizando los valores óptimos de los parámetros se logró reducir el MSE a 3.92.

Palabras clave: Invernadero, producción, análisis de sensibilidad, temperatura, calibración.

¹Tesista

² Director

ABSTRACT

A two-part study was conducted in a 120 m² experimental low-tech greenhouse with tomato production. In the first part, a quantification of the energy use in the greenhouse was done for the entire season, taking into account all inputs in the production process, in order to measure the energy productivity in the greenhouse, which was estimated as 0.298 Kg MJ⁻¹. In the second part, a dynamic energy balance model was implemented to simulate the inside temperature, considering all heat fluxes. The results show an MSE of 6.75 between simulated and predicted temperature values. Then a sensitivity analysis and model calibration were performed for finding the most important parameters and their optimal values. The highest sensitivity index was found for the transmission coefficient of the cover. Using the optimal parameter values it was possible to reduce the MSE to 3.92.

Keywords: Greenhouse, production, sensitivity analysis, temperature, calibration.

¹Thesis author

² Thesis director

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	3
DEDICATORIA	4
DATOS BIOGRÁFICOS DE AUTOR	5
RESUMEN.....	6
ABSTRACT	6
ÍNDICE DE CUADROS.....	10
ÍNDICE DE FIGURAS.....	12
1. INTRODUCCIÓN	14
1. Revisión bibliográfica	17
1.1 Consumo de energía en los invernaderos	17
1.1.1 Indicadores utilizados para evaluar el uso de la energía (EUE) en invernaderos.....	20
1.1.2 Necesidades energéticas	24
1.2 Variables que influyen en el balance energético de un invernadero...	25
1.2.1 Radiación solar.....	26
1.2.2 Cubierta.....	28
1.2.3 Ventilación.....	28

1.2.4	Transpiración	30
1.2.5	Suelo	33
1.3	Modelo dinámico del balance de energía	34
1.3.1	Forma general de un modelo dinámico	35
2.	Materiales y métodos	37
2.1	Localización y descripción del invernadero.....	37
2.2	Manejo del cultivo	39
2.3	Modelo dinámico de balance de energía	42
3.3.1	Supuestos del modelo	42
3.3.2	Estados, entradas de control y entradas externas	43
3.3.3	Modelado de la temperatura.....	44
2.4	Adquisición de datos.....	50
2.5	Cálculo del índice de área foliar.....	53
2.6	Calculo de los índices de energía en el invernadero	54
2.7	Implementación de los modelos en MATLAB	55
2.7.1	Análisis de sensibilidad	55
2.7.2	Calibración	56
3.	Resultados y discusión.....	58

3.1 Modelo dinámico de balance de energía.....	58
3.2 Eficiencia en el uso de energía	67
Conclusiones	73
Literatura citada	75
Apéndice.....	85
Apéndice A. NOTACIÓN	85
Apéndice B. IMPLEMENTACION DEL MODELO DINÁMICO DE BALANCE DE ENERGÍA	88
Apéndice B.1 PROGRAMA PRINCIPAL DE MODELO DINÁMICO DE BALANCE DE ENERGIA EN MATLAB	88
Apéndice B.2 SUBROUTINA EN C.....	91
Apéndice C. ECUACIONES DE SENSIBILIDAD	97
Apéndice D. IMPLEMENTACION DEL PROGRAMA PARA LA CALIBRACIÓN EN MATLAB	103

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 1. EQUIVALENTES DE ENERGÍA EN MJ POR UNIDAD DE ÁREA, PROPUESTOS POR OZKAN (2011), PAHLAVAN ET AL. (2011) Y REZVANI ET AL. (2011).....	22
CUADRO 2. VALORES TÍPICOS DE LAS RESISTENCIAS ESTOMÁTICAS (BONTSEMA ET AL, 2007)	31
CUADRO 3 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE ALGUNOS TIPOS DE SUELO, K_s ($Wm^{-1}K$).	34
CUADRO 4. SOLUCIÓN NUTRITIVA UTILIZADA EN EL INVERNADERO PARA EL FERTIRRIEGO.	39
CUADRO 5. VALORES DE LOS ÍNDICES DE SENSIBILIDAD PARA LOS PARÁMETROS $\tau_{tot}, ac, rb, ks, k$ Y V	63
CUADRO 6. LÍMITE SUPERIOR E INFERIOR DE CADA PARÁMETRO CALIBRAR.....	64
CUADRO 7. ÍNDICES ESTADÍSTICOS PARA EL MEJOR RANGO DE VARIACION Y VALOR ÓPTIMO PARA CADA UNO DE LOS PARAMETROS, MANTENIENDO CONSTANTE EL RESTO.	65
CUADRO 8. MEDIDAS DE AJUSTE INICIAL Y FINAL, VALOR NOMINAL Y ÓPTIMO.....	65
CUADRO 9 VOLUMEN TOTAL DE RIEGO EN 120 m ² PARA LA PRODUCCIÓN DE TOMATE. 67	
CUADRO 10 SOLUCIÓN NUTRITIVA APLICADA EN 120 m ²	68
CUADRO 11. MANO DE OBRA EN 120 m ²	69
CUADRO 12. INSUMOS UTILIZADOS EN LA PRODUCCIÓN DE TOMATE	70
CUADRO 13. ÍNDICES DE ENERGÍA.....	71

CUADRO 14 PARÁMETROS DEL MODELO DE BALANCE DE ENERGÍA.....	85
CUADRO 15 VARIABLES DEL BALANCE DE ENERGÍA.....	86
CUADRO 16 SALIDAS DEL MODELO DE BALANCE DE ENERGÍA.....	87
CUADRO 17 PARÁMETROS PARA EL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	87

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. RADIACIÓN SOLAR QUE INCIDE SOBRE UNA CUBIERTA DE PLÁSTICO (ABSORBIDA, REFLEJADA Y TRANSMITIDA).....	27
FIGURA 2. MEDICIÓN DEL LARGO (L) Y ANCHO (W) DE LA HOJA DE UNA PLANTA DE JITOMATE.	33
FIGURA 3. INVERNADERO TIPO CENITAL CON VENTILACIÓN NATURAL LOCALIZADO EN LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO.	37
FIGURA 4. SISTEMA DE RIEGO POR GOTEIO.....	38
FIGURA 5. CHAROLA DE POLIESTIRENO CON PLÁNTULAS DE JITOMATE.....	39
FIGURA 6. PLÁNTULAS DE JITOMATES RECIÉN TRASPLANTADAS.	40
FIGURA 7. TUTORADO DE PLANTAS	40
FIGURA 8. ENTRADAS Y SALIDAS DE FLUJO DE ENERGÍA QUE INTERVIENEN EN EL BALANCE ENERGÉTICO DEL INVERNADERO.....	43
FIGURA 9. LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES HOBO FUERA Y DENTRO DEL INVERNADERO	50
FIGURA 10. ESTACIÓN HOBO, ANEMÓMETRO, SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA.....	51
FIGURA 11. ESTACIÓN HOBO Y SENSORES DENTRO DEL INVERNADERO.	52
FIGURA 12. VENTANAS LATERALES Y VENTANA CENITAL DEL INVERNADERO.....	52
FIGURA 13. INTEGRADOR DE AREA FOLIAR MARCA LI-COR MODELO LI-3100.	53

FIGURA 14. VARIABLES MEDIDAS DE ENTRADA DEL MODELO, I_{RAD} [$W\ m^2$] (RADIACIÓN SOLAR), T_s [$^{\circ}C$] (TEMPERATURA DEL SUELO), T_c [$^{\circ}C$] (TEMPERATURA DE LA CUBIERTA), T_e [$^{\circ}C$]; (TEMPERATURA EXTERNA), V_{in} [$m\ s^{-1}$] (VELOCIDAD DEL VIENTO), RH [%]; (HUMEDAD RELATIVA).....	59
FIGURA 15. COMPARACIÓN ENTRE LA TEMPERATURA DEL AIRE DEL INVERNADERO, OBSERVADO Y SIMULADO.	60
FIGURA 16. SENSIBILIDAD RELATIVA DE LA TEMPERATURA CON RESPECTO A LOS PARÁMETROS $\tau_{tot}, \alpha_c, RB, KS, K$ Y V	62
FIGURA 17. COMPARACIÓN DEL MODELO DINÁMICO GENERAL DE BALANCE DE ENERGÍA ANTES Y DESPUÉS DE LA CALIBRACIÓN.	66

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura es un usuario y proveedor de energía. La energía se utiliza en todas las formas de insumos tales como fertilizante, pesticidas, maquinaria y electricidad, para realizar varias operaciones para la producción agrícola. El uso de energía en la agricultura se ha incrementado en respuesta al aumento de la población, al suministro limitado de tierra cultivable y el deseo de mayor nivel de vida. El uso eficiente de la energía en la agricultura es una de las condiciones para la producción agrícola sostenible, ya que proporciona ahorro económico, preservación de recursos fósiles y reducción de la contaminación de aire (Reza *et al.*, 2011).

Esto evidencia la necesidad de desarrollar métodos más eficientes, conocimientos y habilidades técnicas en el área de invernaderos, así como también, el desarrollo de modelos del clima que permitan predecir el comportamiento de los diferentes componentes que integran el agrosistema en el invernadero y sus interacciones. Dichos modelos permiten controlar mejor las condiciones de crecimiento dentro del invernadero, las cuales están determinadas por factores como radiación, temperatura, humedad, concentración de CO₂ y velocidad del viento (Challa, 1990), y donde todos guardan una estrecha relación con las condiciones climáticas específicas de cada región y son afectados por la cubierta del invernadero. Además, este tipo de herramientas se utiliza en el diseño de invernaderos, para el análisis, diseño de nuevos algoritmos y métodos de control (Bakker *et al.*, 1995). Hay una gran

necesidad de modelos de invernaderos, especialmente en países donde este tipo de tecnología de producción es relativamente nueva.

Los estudios sobre la modelación del clima en invernaderos ha generado el seguimiento de varias tareas de investigación. Existen diferentes modelos matemáticos desarrollados por Singh (Singh *et al.*, 2006), Gupta (Gupta & Chandra, 2002), Ghosal (Ghosal & Tiwari, 2004), modelos difusos jerárquicos desarrolladas por Salgado (Salgado & Boaventura, 2005) y Lafont (Lafont & Balmat, 2002) o los modelos dinámicos presentados por Abdel-Ghary (Abdel-Ghany & Al-Helal, 2011), Luo (Luo *et al.*, 2005) y Takakura (Takakura, 2000). Estos modelos se basan en el mismo principio, lo que varía únicamente es el resultado deseado. Por otra parte, estos modelos se definen mediante la formulación energética de diversos componentes del invernadero que tienen que ser evaluados teniendo en cuenta un número muy elevado de variables (aire interior, cultivo, suelo, cubierta, tipo de sistemas de calefacción). La transpiración del cultivo también se estudia debido a su efecto importante sobre la humedad del invernadero (Monteith, 1994). Todas estas variables están fuertemente influenciadas por el ambiente externo que significa que un proceso de medición permanente de las variables dentro y fuera tienen que ser implementadas con el fin de crear el ambiente óptimo de efecto invernadero para el cultivo específico.

El presente trabajo se desarrolló utilizando información de un invernadero de baja tecnología de la Universidad Autónoma Chapingo con cultivo de tomate, para el cual se generó un modelo dinámico de balance de energía, así como

también, la cuantificación del consumo de energía para la obtención de la productividad y eficiencia energética.

El objetivo general del presente trabajo fue desarrollar un modelo dinámico de balance de energía en un invernadero experimental ubicado en Chapingo, así como la cuantificación de los índices relacionados con el consumo de energía del cultivo de tomate. Los objetivos específicos son:

- Calibrar el modelo de balance de energía con el fin de encontrar los parámetros óptimos.
- Calcular la productividad y eficiencia energética.
- Realizar recomendaciones sobre ahorros de energía para el invernadero bajo estudio.

1. Revisión bibliográfica

1.1 Consumo de energía en los invernaderos

Los invernaderos son considerados como sistemas complejos no lineales, de múltiples entradas y múltiples salidas que presentan comportamientos variables en el tiempo, y están sujetos a las perturbaciones dependiendo generalmente de las condiciones meteorológicas. Todo esto hace que sea difícil describir un invernadero con modelos analíticos y de control con los controladores clásicos. Con el fin de mejorar las condiciones ambientales, el clima del invernadero puede ser modificado por actuadores artificiales, tales como calefacción y ventilación(Ortiz & Hernanz, 2000).

El propósito de la ventilación es eliminar el aire húmedo para reemplazarlo con aire fresco del exterior, al regular las altas temperaturas causadas por la incidencia de la radiación solar, para deshumidificar el aire del invernadero cuando la humedad del aire exterior es muy baja, para proporcionar un flujo de aire uniforme a lo largo de todo el invernadero (Zabelic, 1989).

Los sistemas de nebulización (como nebulizadores, unidades antiniebla, techo o aspersores) son utilizados principalmente para la humidificación del invernadero. Los sistemas de condensación también desempeñan un papel de enfriamiento debido a la pérdida de calor que ocurre cuando el vapor contenido en el aire se condensa. Cuando la humidificación se produce bajo condiciones con alta radiación solar, la ventilación es necesaria, ya que el invernadero pronto se convertiría en un baño de vapor sin proporcionar aire fresco seco. Es necesario tener en cuenta el consumo de energía en el control del clima del

invernadero con el fin de no incrementar mucho los costos en relación de al beneficio (Ponce, 2012).

Los invernaderos son sistemas agrícolas que más energía consumen. El consumo energético es un factor muy importante a considerar dentro de los costos de producción, de ahí que se considere prioritaria la optimización energética de estos sistemas. Por otra parte, optimizando el consumo de energía se facilitará el cumplimiento de las regulaciones ambientales y energéticas, un consumo desmedido de la energía no sólo repercute negativamente en el medio ambiente, sino que también influye negativamente en el balance económico de las explotaciones agrícolas y en la imagen que el sector transmite a la sociedad (Mudahar & Hignett, 1987). De hecho, el gasto medio de los invernaderos en energía ha crecido en los últimos años, en gran parte debido a un uso poco eficiente de ella. Se hace necesario reducir el consumo mejorando la eficiencia y utilizar fuentes de energía amigables con el medio ambiente.

El consumo principal de energía en los invernaderos se realiza en el movimiento de grandes motores eléctricos, los cuales son utilizados para el movimiento del aire, el bombeo de agua, fertilizantes e insecticidas, calefactores y ventiladores/extractores. El uso de los motores es controlado, ya sea de forma manual (operarios humanos) o por sistemas automáticos (controladores) (Ponce, 2012).

Tanto los controladores como los seres humanos administran el uso de los motores dentro de los invernaderos; un controlador representa grandes ventajas en producción y ahorro de energía en comparación con un operario humano.

El consumo de energía por día se incrementa cuando la temperatura interior disminuye, especialmente en temporada de invierno (Ponce, 2012). Esto es debido a que se consume mayor energía por medio de la calefacción entre otros dispositivos que nos permitan tener las condiciones óptimas para el cultivo. La alimentación de todos los sistemas eléctricos del invernadero es por medio de energía alterna; en algunos casos se utilizan rectificadores para obtener alimentación en forma de corriente directa para motores pequeños que puedan estar colocados para mover pequeñas cargas mecánicas (Mudahar & Hignett, 1987).

La contribución relativa de cada uno de los factores mencionados es calculada utilizando una base de datos del clima ambiental actual y el uso de sistemas de medición de temperatura en el interior del invernadero. Los procesos físicos o de transferencia de calor son:

- Conducción y convección de calor por medio de la cubierta del invernadero
- Infiltraciones de aire
- Conducción de calor hacia el suelo
- Transpiración

1.1.1 Indicadores utilizados para evaluar el uso de la energía (EUE) en invernaderos

El consumo de energía total para un cultivo depende del tiempo que tarda en ser cosechado y el consumo de energía por día para generar las condiciones ambientales óptimas para ese cultivo. Para obtener este dato se debe considerar que mientras el tiempo de cosecha decrece, el consumo de energía por día incrementa, mientras que las condiciones ambientales óptimas para el cultivo dentro del invernadero se incrementan. Existen diferentes medidas del desempeño de la energía en el proceso de producción dados por Djevic y Dimitrijevic (2004) y Pahlavan *et al.* (2011).

1) Eficiencia en el uso de la energía

La eficiencia en el uso de energía se puede calcular como el cociente de las salidas de energía (MJ por unidad de área) y las entradas de energía (MJ por unidad de área) (Djevic & Dimitrijevic, 2004).

2) Productividad energética

Djevic y Dimitrijevic (2004) mencionan que la productividad energética se puede calcular como el coeficiente de la producción total de tomate (Ton por unidad de área) y las entradas de energía (MJ por unidad de área).

3) Energía específica

La energía específica es el coeficiente de las entradas de energía (MJ por unidad de área) y la producción de tomate (Ton por unidad de área) (Djevic & Dimitrijevic, 2004).

La eficiencia en el uso de energía se define como la cantidad de energía requerida para producir un kg de frutos comerciales y se expresa como $MJ\ kg^{-1}$. Los cálculos se realizarán de forma acumulativa, del consumo de energía del invernadero y la producción de tomate. En este contexto, las variables tales como la energía consumida (EC) para las bombas de circulación (CP) y para los procesos de bomba de calor (HP), el factor de energía primaria para la energía eléctrica (PFEE) y el colector de GH como sistema de producción de calor se considerarán para calcular la EUE para el colector GH (Dannehl *et al.*, 2013).

1) La eficiencia en el uso de energía en el colector

Es el cociente del sistema de producción del calor y producción total (Dannehl *et al.*, 2013).

El análisis de entradas y salidas de energía, así como la estimación de algunos índices relacionados con el uso eficiente de energía, provee a los investigadores y tomadores de decisiones con las oportunidades para evaluar las iteraciones del uso de la energía sobre la economía de la empresa agrícola. La energía indirecta incluye la energía de las semillas, fertilizantes, herbicidas,

pesticidas, fungicidas, estiércol y maquinaria, mientras la energía directa incluye mano de obra, diésel, gasolina, electricidad y riego. En la Cuadro 1 se muestra los equivalentes de energía por unidad de área.

Cuadro 1. Equivalentes de energía en MJ por unidad de área, propuestos por Ozkan (2011), Pahlavan et al. (2011) y Rezvani et al. (2011).

EQUIVALENTES DE ENERGIA (MJ m ⁻³)			
INSUMO	UNIDAD	*Ozkan (2011), Pahlavan et al. (2011)	*Rezvani et al. (2011)
Agua para riego	m ³	0.63	1.02
Electricidad	kW h	3.60	3.60
Fertilizante, Nitrógeno	kg	66.14	75.46
Fosfato (P ₂ O ₅)	kg	12.44	13.07
Fungicidas	kg	-	181.90
Herbicidas	kg o L	-	238.30
Jitomate	kg	0.80	0.80
Macroelementos (Mandal et al., 2002)	kg	120.00	-
Mano de obra	h	2.30	1.95
Maquinaria	h	64.80	62.70
Oxido de Potasio (K ₂ O)	kg	11.15	11.15
Micronutrientes	kg	120.00	120.00
Pesticidas	kg	-	101.20
Químicos	kg	101.20	-
Semillas	kg	1.00	1.00
Sulfuro (S)	kg	-	1.20
Zinc (Zn)	kg	-	8.40

El uso eficiente de insumos ayuda a incrementar la producción y productividad, contribuye a la economía, redituabilidad y competencia para la sostenibilidad agrícola de las comunidades rurales (Rezvani et al., 2011).

Para contribuir a la mejora de la eficiencia energética, deben considerarse una serie de factores directamente implicados (Martínez *et al.*, 2008):

- Las condiciones climáticas de la región.
- Las particularidades locales de la zona.
- Las necesidades climáticas en el interior de los invernaderos de acuerdo a cultivos, variedades, época del año y estado fisiológico de las plantas.
- La relación costo-eficiencia de las inversiones en los equipos de control climático en los invernaderos.

Las recomendaciones para dicha mejora estarán basadas en una combinación de normas de construcción y equipamiento de los invernaderos: materiales de construcción, aislamientos, ventilación, calefacción e iluminación principalmente, de tal forma que se pueda garantizar un funcionamiento integrado de los diferentes sistemas sin que el funcionamiento de alguno de ellos suponga un derroche de energía (Martínez *et al.*, 2008).

Los aspectos básicos sobre los que se incide y que se consideran más importantes para contribuir al ahorro y eficiencia energética, son los siguientes:

- Aislamiento y estanqueidad adecuados de los invernaderos.
- Regulación correcta de los equipos de climatización.
- Iluminación eficiente.
- Revisión y mantenimiento de los equipos.
- Aplicación de energías renovables para la generación de calor

1.1.2 Necesidades energéticas

La demanda energética de un invernadero depende de la relación entre las condiciones climáticas exteriores y las necesidades ambientales de los cultivos dentro del invernadero. El control climático mejora el confort de las plantas y ayuda a conseguir los objetivos productivos del invernadero (Martínez *et al.*, 2008).

Varios investigadores han estudiado modelos para el cálculo del balance de energía de los invernaderos, éstos se modifican dependiendo del tipo de cultivo, condiciones climáticas exteriores y localización geográfica del invernadero. Las entradas del modelo son la temperatura de referencia del cultivo y una base de datos de condiciones climáticas del lugar (p. ej. temperatura del bulbo de cultivo seco y mojado, radiación solar y velocidad del viento) (Ponce, 2012)

El modelo entonces calcula las pérdidas de energía y ganancias, llamándolas conducción por medio de la cubierta, infiltración de aire exterior, conducción de calor hacia el suelo y balance de radiación. Si la energía total de entrada es menor a la energía total de salida, el modelo calcula la energía necesaria para mantener la temperatura de referencia establecida (Ponce, 2012).

Las necesidades energéticas del invernadero dependen fundamentalmente del salto térmico, es decir, la diferencia entre la temperatura interior y exterior que se desea mantener. En el cálculo de las necesidades de climatización del invernadero intervienen tanto las condiciones climáticas a las que está expuesto

el invernadero como las condiciones climáticas que es necesario mantener en su interior para el correcto desarrollo de los cultivos (Martínez *et al.*, 2008).

Las principales condiciones climáticas internas del invernadero son: la radiación interceptada por la cubierta, temperatura de la cubierta, temperatura interna, temperatura del suelo, humedad relativa y absoluta, así como también, la temperatura de las hojas del cultivo. Las condiciones externas que se deben tomar en cuenta son la radiación solar, humedad relativa, y velocidad del viento.

1.2 Variables que influyen en el balance energético de un invernadero

Para modelar el clima que se genera dentro de un invernadero sobre la base de principios físicos, fisiológicos, biológicos y químicos, los balances de energía tienen que aplicarse a todos sus elementos constitutivos. Los principales elementos climáticos que influyen en el balance energético en un invernadero son (Zabeltitz, 1998):

- La radiación solar
- Temperatura
- Precipitación
- Humedad
- La evaporación y la evapotranspiración
- La velocidad del viento

1.2.1 Radiación solar

La radiación solar es la fuente de energía usada por las plantas en el proceso de fotosíntesis mediante el cual producen materia vegetal creciendo y desarrollándose. Parte de esta materia vegetal es el producto cosechable del cultivo (sea fruto, hoja, tallo o raíz). Así pues, existe una relación directa entre la cantidad de radiación solar que un cultivo ha recibido (suele medirse en horas de sol, como primera aproximación) y la cosecha que podemos obtener de él si lo cultivamos correctamente (Hernández *et al.*, 2001).

La radiación solar recibida en la superficie de la tierra varía con la temporada debido a la relación geográfica entre el sol y la tierra. Por lo tanto, es importante para calcular la cantidad de esta energía que puede ser utilizada en un determinado lugar en la tierra en un momento determinado del año. Los revestimientos pueden mejorar el medio ambiente mediante el aumento de la temperatura interior, pero no pueden aumentar el nivel de radiación solar (Druma, 1998).

La cantidad mínima de radiación necesaria para asegurar el crecimiento y la floración suficiente corresponde a una radiación global diaria es de $2.0 - 2.3 \text{ kW h}^{-1}$ (Druma, 1998). Lo más importante para la fotosíntesis, es decir, el crecimiento de las plantas, es la potencia de radiación solar (W m^{-2}).

1.2.1.1 Transmisión de la radiación solar por el invernadero

La radiación solar que incide sobre una cubierta de plástico que cubre un invernadero puede ser transmitida (atravesando dicha cubierta), reflejada por

dicha cubierta o absorbida (Figura 1). La proporción de radiación que atraviesa la cubierta se conoce como transmisividad y dependerá de las características de la cubierta del invernadero y del tipo de radiación (directa o difusa). La calidad de la luz es, asimismo, afectada al atravesar la cubierta plástica(Hernández *et al.*, 2001).

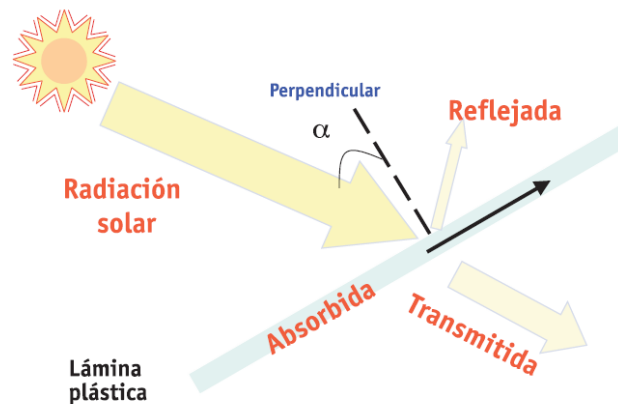


Figura 1. Radiación solar que incide sobre una cubierta de plástico (absorbida, reflejada y transmitida) (Hernández *et al.*, 2001).

Las cubiertas plásticas usuales de polietileno empleadas en los invernaderos tienen transmisiones máximas (a la luz solar directa) del orden del 85 al 92%. Cuando la radiación solar atraviesa la cubierta se modifica la proporción entre radiación directa y difusa. En algunos materiales poco difusores la proporción entre radiación directa y difusa es poco alterada. En cambio, con radiación directa la geometría de la cubierta del invernadero y su orientación (norte-sur, este-oeste) determinarán los ángulos de incidencia de los rayos solares sobre la cubierta y, en consecuencia, la transmisión global del invernadero (Van Beveren *et al.*, 2015).

1.2.2 Cubierta

Es un medio sólido y homogéneo que transmite parcialmente la radiación solar y térmica. Su principal objetivo es aislar la atmósfera interna de las condiciones climáticas externas, haciendo un puente entre los dos entornos (Rodríguez *et al.*, 2015)

La mayoría de las cubiertas de los invernaderos están construidas con materiales plásticos (polietileno). Estos materiales son muy delgados, por lo que la diferencia de temperatura entre el exterior e interior se puede ignorar y considerar una temperatura homogénea para la cubierta T_r . Los flujos de energía que afectan a la cubierta se deben a la convección al interior y exterior de la misma (q_{cub}^{conv}), absorción de radiación solar (q_{cub}^{abs}), intercambios de radiación de onda larga (q_{cub}^{rad}) y ($q_{cub-atm}^{rad}$). La densidad de flujo de energía por convección en la cubierta del invernadero está caracterizado por el coeficiente de transferencia de calor de convección (Iga *et al.*, 2005; Takakura, 2000)

1.2.3 Ventilación

El aire que rodea a las plantas es uno de los factores más importantes ya que éstas respiran y realizan sus funciones fisiológicas en función de esta actividad. Es por ello que la ventilación dentro de un invernadero es uno de los factores clave a controlar (Cervantes, 2002.).

El aislamiento del material de cubierta y laterales del invernadero implica una gran reducción del viento respecto al exterior (Day & Bailey, 1999). Esta reducción del viento tiene una gran repercusión sobre la fisiología del cultivo y

sobre el microclima del invernadero. Los intercambios de aire con el exterior dependen mucho del viento exterior (Castilla, 2007).

La ventilación de los invernaderos se justifica por tres razones (Castilla, 2007):

- Evitar el calentamiento excesivo de día.
- Asegurar niveles mínimos de CO₂.
- Controlar la humedad.

Estudios realizados por Baptista *et al.* (2010) confirmaron que la ventilación es una de las herramientas más importantes para controlar el clima del invernadero. Existen dos posibilidades para ventilar los invernaderos (Zabeltitz, 1998):

- La ventilación natural mediante la apertura de ventanas en las paredes laterales, aguilones cresta o techo de la zona.
- Ventilación forzada a través de ventiladores, que depende de suministro de energía eléctrica y el costo de la electricidad.

Criterios importantes para los sistemas de ventilación son (Zabeltitz, 1998):

- La tasa de ventilación
- La diferencia de temperatura interior hacia el exterior.
- La homogeneidad de distribución de la temperatura dentro del invernadero.
- La velocidad del aire cerca y dentro del dosel del cultivo.

1.2.4 Transpiración

El cultivo absorbe la energía transmitida por la cubierta. El porcentaje de calor transferido y absorbido depende del coeficiente de transmisión de la cubierta y del coeficiente de emisión de las hojas. Con las superficies de los alrededores (suelo y cubierta) existe una transferencia de calor vía radiación. Otro flujo de energía que afecta el cultivo es el del proceso de convección. La cantidad de calor transferido por evaporación de las hojas depende de la concentración de vapor de agua.

Las necesidades de agua de los cultivos bajo invernadero son menores que los cultivos a campo abierto. En regiones con alta radiación solar, un invernadero de plástico puede reducir el uso del agua en un cultivo en 30%. Las densidades de flujo de calor entrantes y salientes en las hojas son igual a su capacidad de almacenar calor (Bakker *et al.*, 1995). Por otro lado, Antón *et al.* (2003) mencionan que la evapotranspiración en un invernadero se reduce un 70% respecto a la del aire libre.

En los últimos años se han realizado un gran número de estudios para determinar el valor del calor latente en condiciones de invernadero y para diversos cultivos hortícolas. En el cálculo de la pérdida de calor debido a la transpiración, influyen varios parámetros y variables como son la concentración de vapor de agua en el cultivo e invernadero, la conductancia de la transpiración, el índice de área foliar, la radiación neta del cultivo, así como también, el parámetro de resistencia estomática (Bakker *et al.*, 1995).

Radiación neta

En la mayoría de las condiciones ambientales, la contribución de la radiación a la transpiración del cultivo puede estimarse solamente a través de la radiación solar (Baille, 1999).

Resistencia estomática

La resistencia estomática está determinada por el grado de apertura de estoma, de la densidad de estomas y su tamaño, es la resistencia que limita la transpiración. De tal modo que la resistencia estomática es la resistencia asociada a la difusión a través de los poros estomáticos (Taiz & Zeiger, 2006).

La resistencia de los estomas cambia mucho durante un día, en particular en respuesta a la luz, y presenta valores elevados durante la noche (estomas cerrados), típicamente 1000 ms^{-1} o superiores, y disminuye con la luz a un valor mínimo de cultivos específicos (Jarvis, 1976). Algunos valores típicos de las resistencias estomáticas para algunos cultivos bajo invernadero se muestra en el Cuadro 2 (Bontsema *et al.*, 2007).

Cuadro 2. Valores típicos de las resistencias estomáticas (Bontsema *et al.*, 2007)

Cultivo	$r_s \text{ (sm}^{-1}\text{)}$
Tomate	200
Pimiento dulce	200
Pepino	100
Berenjena	100

Índice del área foliar LAI

El área foliar y el índice de área foliar son parámetros ampliamente utilizados en estudios de ecofisiología de cultivos (Coombs & Hall, 1982). Para su determinación se utilizan diferentes métodos pueden clasificarse en destructivos (Astegiano & Favaro, 1987; Dengler, 1984; Jatimlinsky & Gimenez, 1993; Payne *et al.*, 1991; Troiani & Mirasson, 1996) y no destructivos, tanto indirectos como directos. Entre los indirectos se destacan los que utilizan correlaciones alométricas entre magnitudes de las hojas y el área foliar (Coombs & Hall, 1982 ; Goenaga & Singh, 1996), mediciones del grado de cobertura de suelo (Andrieu *et al.*, 1997), o de la relación entre la penetración de la radiación y la estructura de la cubierta vegetal (Kucharik *et al.*, 1998; Watanabe *et al.*, 1997. ; Welles & Norman, 1991). Los métodos directos son los que utilizan medidores de área foliar, que son instrumentos diseñados con este propósito y que tienen una resolución del orden de mm².

La medición directa, aunque resulta más precisa, requiere de equipos de alto costo y en ocasiones no fácilmente utilizables, principalmente con hojas de gran tamaño y profundamente lobuladas. La estimación del área foliar basada en características alométricas de su crecimiento permite superar la dificultad operativa que presenta su determinación en hojas grandes como las de Cucurbitáceas (Fargo *et al.*, 1986) o Compuestas imparipinnadas como el tomate (Astegiano & Favaro, 1987; Dengler, 1984; Jackson, 1980; Khaddar *et al.*, 1984; Shaykewich & Warkentin. B.P., 1970). Estas relaciones incluyen la conversión de una o dos dimensiones lineales de las hojas a su área foliar. Las funciones que

relacionan estas dimensiones varían claramente entre especies, según el estadio de desarrollo, genotipo, estación de crecimiento y edad de hojas (Astegiano & Favaro, 1987; Kvet & Marshall J.K.. 1971).

El Área foliar (AF) por el método directo, consiste en utilizar un medidor de área foliar, se extraen muestras aleatorias de plantas al azar, se considera el ancho y largo de las hojas de la planta (Figura 2), así como también, la biomasa y el peso en seco (Iglesias, 2015). Se determina una relación entre el área de la hoja y las dimensiones de la misma o el producto de ambas. Mediante modelos de regresión se establece la mejor relación entre el área y las dimensiones de la hoja (Melgarejo, 2010).

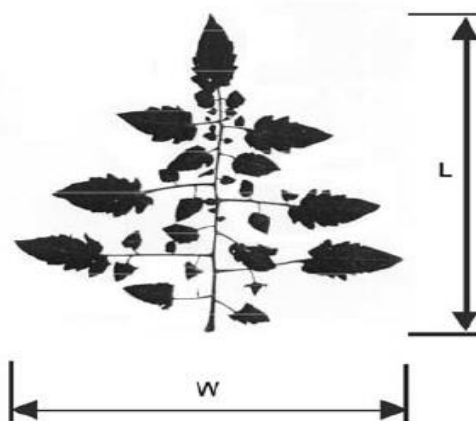


Figura 2. Medición del largo (L) y ancho (W) de la hoja de una planta de jitomate.

1.2.5 Suelo

El suelo (efecto invernadero masa térmica) desempeña un papel importante en el clima del invernadero. Durante el tiempo diurno, el suelo absorbe la radiación solar en su superficie, el calentamiento de las capas profundas del suelo. Durante la noche, las transferencias de suelo calor al ambiente de invernadero a partir de

estas capas. Por lo tanto, los flujos conductores son significativos porque este proceso es la fuente de los flujos de calor entre ellos (Rodríguez *et al.*, 2015). Una parte de las pérdidas de calor en el invernadero, alrededor del 10%, se producen a través del suelo. Para cada tipo de suelo se tiene diferentes conductividades térmicas en cual se muestra en el Cuadro 3.

Cuadro 3 Conductividad térmica de algunos tipos de suelo, K_s ($W m^{-1} K$).

Material	K_s ($W m^{-1} K$)	Material	K_s ($W m^{-1} K$)
Arena de cuarzo	7.7	Lana de roca	0.038-0.048
Arcilla seca	1.0-1.2	Cemento	1.16
Arena de granito	2.7	Hormigón	0.88
Grava	2.3-2.8	Hormigón celular	0.11
Tierra húmeda	2	Hormigón armado	0.39-1.6
Tierra seca	1	Turba seca	0.08

1.3 Modelo dinámico del balance de energía

Los términos que intervienen en el balance energético de un invernadero se indican en la forma de intensidad de energía. Según el Primer Principio de la Termodinámica, la energía ganada por el sistema se equilibra con la energía perdida por el mismo. Sin embargo, cada autor considera una serie de componentes del balance energético despreciando otros. Existen diversos modelos simplificados del balance de energía (Al-Jamal, 1994; Arinze *et al.*, 1984; Baille, 1999; Boulard & Baille, 1987; Kindelan, 1980; Walker, 1965; Walker *et al.*, 1976).

Para cada balance, la cantidad de energía o masa ganada menos la pérdida, es igual a la energía o masa acumulada. Para simplificar los cálculos de los balances de energía, se determinaron los coeficientes de transferencia de calor

para los procesos de radiación, conducción y convección (Sissom & Pitts, 1972). El flujo de energía debido a la condensación no se considera en los balances, suponiendo que el sistema de control no permitirá que ocurra.

El modelo dinámico desarrollado por Seginer *et al.* (1991) contiene dos ecuaciones diferenciales no lineales que describen el calor latente y calor sensible, y el equilibrio del vapor de agua. Sólo las alteraciones primarias se consideran: temperatura exterior y la humedad, y la radiación solar.

1.3.1 Forma general de un modelo dinámico

El procedimiento general de la modelación dinámica de un sistema empieza por la definición de un problema y su análisis (Ljung & Glad, 1994; Rabbinge *et al.*, 1989; Straten, 2012). Por consiguiente se lleva a cabo experimentos para poder generar una modelación empírica basada en mediciones de variables de entradas y salidas del sistema (Thornley & France, 2007). Una vez que se ha generado el conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias no lineales, se procede a obtener simulaciones o sus soluciones numéricas para producir valores de las variables que representan los componentes del sistema con respecto al tiempo (Wallach *et al.*, 2013).

La forma general de un modelo dinámico de un sistema en un tiempo continuo es:

$$\frac{d(X_1(t))}{dt} = g_1(X(t), U(t), \theta)$$

$$\begin{matrix} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{matrix}$$

$$\frac{d(X_s(t))}{dt} = g_s(X(t), U(t), \theta)$$

Donde t es el tiempo, $X(t) = [X_1(t), \dots, X_s(t)]^T$ es el vector de las variables de estado con respecto al tiempo t , son la temperatura, la humedad del aire, la concentración de CO_2 , $U(t)$ es el vector de las variables ambientales con respecto al tiempo t , θ es el vector de las propiedades de los componentes del sistema que se incluye en el modelo para calcular las tasas de cambio, y $g_1 \dots g_s$ son relaciones matemáticas que describen las relaciones entre las variables de estado, los parámetros y las variables ambientales (Brun *et al.*, 2006).

2. Materiales y métodos

2.1 Localización y descripción del invernadero

El estudio se realizó en un invernadero con cultivo de tomate tipo saladette (*solanum lycopersicum L.*), variedad “Cid F1” de crecimiento indeterminado, bajo un sistema hidropónico, localizado en la Universidad Autónoma Chapingo (Figura 3).

El invernadero es de carga completa tipo cenital, con una resistencia máxima al viento de 120 km h^{-1} , con una capacidad de carga de 30 kg m^{-2} , de dimensiones 8 m de ancho y 15 m de largo, con una superficie total de 120 m^2 . La cubierta es de plástico blanco (polietileno) calibre 720. Cuenta con dos ventanas laterales y una cenital, con un sistema de apertura y cierre manual con malacates galvanizados de 600 lb protegidos con mallas antiinsectos de 25×25 y de 1 m de ancho en cenitales y malla antiviral en ventanas laterales de 40×26 .



Figura 3. Invernadero tipo cenital con ventilación natural localizado en la universidad autónoma Chapingo.

El riego se llevó acabo de forma manual en los primeros días de siembra, después del trasplante se utilizó el sistema de fertirriego por goteo (Figura 4), con válvulas PVC, con manguera ciega de 16 mm, capacidad de gotero de 8 L h^{-1} , distribuidor de 4 salidas, se realizaron 12 riegos por día de 1, 2, 3, 4 y 5 min, posteriormente se aumentó el tiempo de riego de acuerdo a la etapa fenológica en la que se encontraba el cultivo y de los valores de la medición del drenado.



Figura 4. Sistema de riego por goteo.

La solución nutritiva que se utilizó en el sistema de fertirriego se muestra en la Cuadro 4 se utilizó ácido sulfúrico y fosfórico para ajustar el pH. Cabe mencionar que durante el ciclo del cultivo se realizó un cambio de dosis de fertilización en el nitrógeno y potasio, se hizo con el fin de mejorar la etapa de fructificación.

Cuadro 4. Solución nutritiva utilizada en el invernadero para el fertirriego.

Fertilizante	Primera dosis	Segunda dosis	Unidades
Ácido sulfúrico (H_2SO_4)	81.88	81.88	ml
Ácido fosfórico (H_3PO_4)	508.50	540.44	ml
Nitrato de potasio (KNO_3)	2216.95	1964.45	g
Nitrato de calcio ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$)	4489.90	4784.90	g
Sulfato de potasio (K_2SO_4)	1948.35	1700.85	g
Sulfato de magnesio (MgSO_4)	1703.55	1703.55	g
Macroelementos	125.00	150.00	g
Boro (B)	0.00	11.25	g

2.2 Manejo del cultivo

La siembra se realizó el 6 de marzo del 2016, se utilizaron charolas de poliestireno de 200 cavidades. La semilla de jitomate se colocó en cada cavidad de la charola y se cubrió con 0.5 cm de sustrato turba (Peat moss). El 22 de marzo del 2016 emergieron las plántulas (Figura 5).



Figura 5. Charola de poliestireno con plántulas de jitomate

El trasplante de las plántulas de jitomate se llevó acabo el 24 de abril, se trasplantó en bolsas de 10 litros a una distancia 30 cm entre cada bolsa y 80 cm entre hilera, como sustrato se utilizó tezontle (Figura 6). Con una densidad de 3.5 plantas por m².



Figura 6. Plántulas de jitomates recién trasplantadas.

El tutorado de las plantas (Figura 7) se realizó a los diez días después del trasplante y posteriormente se llevó acabo la poda de brotes auxiliares así como también en el follaje, esto con el fin de tener una mejor iluminación, facilitando así la ventilación.



Figura 7. Tutorado de plantas

El 8 de mayo emergieron los primeros racimos florales, y se comenzó la polinización de forma manual, esto fue debido a que las condiciones del invernadero no permite una buena polinización lo cual solo se lleva de manera parcial, ya que no se cuenta con la ayuda de insectos que realicen este proceso, y también la acción del viento es limitada, por lo cual no existe mucho movimiento entre las plantas. La polinización manual consiste en mover suavemente los hilos que se colocaron en el tutorado, con el fin de mover la planta y así permitir el desprendimiento del polen sobre los estigmas de la flor, esta actividad se realizó diariamente antes del medio día durante toda la etapa de floración.

Finalmente la cosecha se realizó de manera manual, se cortaron únicamente los frutos que alcanzaron el grado de madurez, es decir que se encontraran entre los colores naranja y rojo.

2.3 Modelo dinámico de balance de energía

Los términos que intervienen en el balance energético de un invernadero se indican en forma de intensidad de energía. Según el Primer Principio de la Termodinámica, la energía ganada por el sistema se equilibra con la energía perdida por el mismo.

3.3.1 Supuestos del modelo

Los supuestos de modelado que se tomaron en cuenta para el desarrollo del modelo de balance de energía son los siguientes:

- Condiciones de contorno: temperatura exterior, $T_e (^{\circ}C)$; humedad relativa externa, $HR_e (\%)$; velocidad del viento externa $V_e (m s^{-1})$; radiación neta $R_n (W m^2)$; Temperatura del suelo $T_{suelo} (^{\circ}C)$.
- Entradas del sistema el invernadero cuenta con dos ventanas laterales y una cenital.
- Se considera el principio de distribución homogénea de las variables.
- El modelo de temperatura considera los procesos: ganancias de calor por radiación solar $Q_{sol} (W m^{-2} s^{-1})$ y debido a la condensación del techo $Q_{cond} (W)$, pérdidas de calor debidas a la transferencia de calor por cubierta $Q_{cub} (W m^{-2})$, transferencia de calor en el suelo $Q_{suelo} (W)$, transferencia de calor debido a la transpiración del cultivo $Q_{trans} (W m^{-2} s^{-1})$ y transferencia de calor debido a la ventilación $Q_{vent} (W m^{-2} s^{-1})$.

3.3.2 Estados, entradas de control y entradas externas

El modelo del invernadero está escrito en la forma de espacios de estado:

$$\dot{\mathbf{x}}(\mathbf{t}) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(\mathbf{t}), \mathbf{u}(\mathbf{t})|\mathbf{p})$$

Donde $\mathbf{t}$ es el tiempo, $\mathbf{x}$ son los estados, $\mathbf{u}$ son las entradas o variables de control, $\mathbf{w}$ son las entradas externas o climáticas y $\mathbf{f}$ es una función no lineal, y $\mathbf{p}$ es un vector de parámetros.

En la Figura 8 se muestran las variables de estado T_a , las entradas Q_{cond} (W) y Q_{sol} ($Wm^{-2}s^{-1}$) y salidas del sistema Q_{cub} (Wm^{-2}), Q_{vent} ($Wm^{-2}s^{-1}$), Q_{trans} ($Wm^{-2}s^{-1}$) y Q_{suelo} (W).

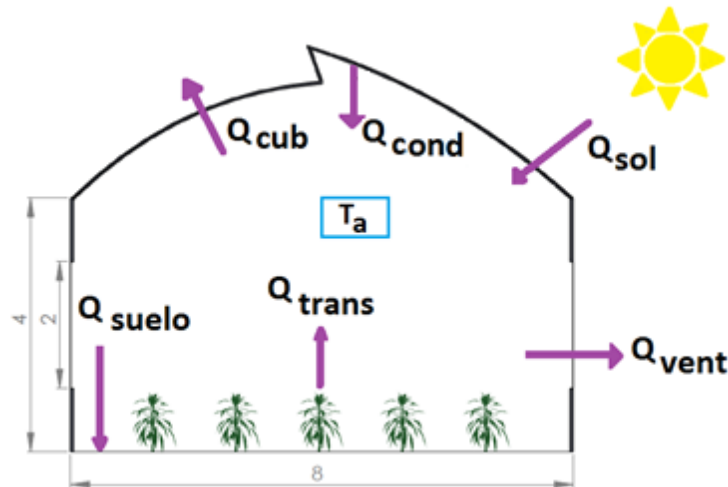


Figura 8. Entradas y salidas de flujo de energía que intervienen en el balance energético del invernadero.

Existen diversos modelos simplificados del balance de energía en invernaderos (Al-Jamal, 1994; Arinze et al., 1984; Baille, 1999; Boulard & Baille, 1987; Kindelan, 1980; Walker, 1965; Walker et al., 1976). En el presente trabajo

se desarrolló un modelo dinámico de balance de energía basado en los modelos descritos por Zwart (1996); Van Henten (1994); Van Henten y Bontsema (2009); Van Ooteghem (2010) y Vanthoor (2011) .

3.3.3 Modelado de la temperatura

El balance de energía para la temperatura en estado no estacionario está dado por la siguiente ecuación diferencial ordinaria (ODEs), donde la variable dependiente es el tiempo (t) y la variable dependiente es la temperatura del aire (Ta):

$$\frac{dT_a}{dt} = \frac{1}{C_{cap}} (Q_{sol} - Q_{cub} - Q_{trans} - Q_{vent} - Q_{suelo} + Q_{cond}) (^{\circ}C s^{-1}) \quad (3.1)$$

Donde:

Q_{sol} = Ganancia de calor por radiación solar ($W m^{-2} s^{-1}$)

Q_{cub} = Pérdida de calor por la cubierta ($W m^{-2}$)

Q_{trans} = Pérdida de calor por la transpiración del cultivo ($W m^{-2} s^{-1}$)

Q_{vent} = Pérdida de calor debido a la ventilación ($W m^{-2} s^{-1}$)

Q_{suelo} = Pérdida de calor por el suelo (W)

Q_{cond} = Ganancia de calor debido a la condensación del techo (W)

C_{cap} = Capacidad calorífica del invernadero ($J m^{-2} C^{-1}$)

La capacidad calorífica del invernadero se calcula de la siguiente forma (Van Beveren et al., 2015):

$$C_{cap} = \frac{V \rho C_p}{A} (J m^{-2} C^{-1}) \quad (3.2)$$

Donde:

V = Volumen del invernadero (m^3)

ρ = Densidad del aire ($kg m^{-3}$)

$C_p = \text{Calor específico del aire } (Jkg^{-1}C^{-1})$

$A = \text{Área del invernadero } (m^2)$

La altura del invernadero se calcula de la siguiente forma:

$$h = \frac{V}{A} \quad (m) \quad (3.3)$$

Donde:

$V = \text{Volumen del invernadero } (m^3)$

$A = \text{Área del invernadero } (m^2)$

1. Ganancia de calor debido a la radiación solar

La transmisión de la radiación solar a través de la cubierta influye tanto en el balance energético del invernadero, como en la actividad fotosintética del cultivo (Iglesias, 2015). La ganancia de la energía por la radiación solar según el modelo de Van Beveren *et al.* (2015), se puede obtener de la siguiente manera:

$$Q_{sol} = \tau_{tot} I_{rad} \quad (Wm^{-2}s^{-1}) \quad (3.4)$$

Donde:

$I_{rad} = \text{Radiación solar externa } (W m^{-2})$

$\tau_{tot} = \text{Coeficiente de transmisión total de la cubierta } (1)$

2. Pérdida de calor debido a la cubierta

El grado de la transferencia de calor α , y de la cubierta, determina la eficiencia de ésta como barrera entre el aire interior y exterior. La mayoría de las cubiertas de los invernaderos están contruidos con materiales plásticos (polietileno). Estos materiales son muy delgados, por lo que la diferencia de temperatura entre

el exterior e interior se puede ignorar y considerar una temperatura homogénea para la cubierta (Castañeda *et al.*, 2007). La fórmula para la pérdida de calor por la cubierta se muestra en la ecuación 4.5:

$$Q_{cub} = \alpha_c \left(\frac{A_c}{A_s} \right) (T_a - T_e) \quad (Wm^{-2}) \quad (3.5)$$

Donde:

A_c = Área de la cubierta (m^2)

A_s = Área de la superficie del invernadero (m^2)

T_e = Temperatura externa ($^{\circ}C$)

T_a = Temperatura interna ($^{\circ}C$)

α_c = Coeficiente de la transferencia de calor de la cubierta (0.7)

3. Pérdida de calor por la transpiración

Para el cálculo de transpiración en cultivo de tomate en invernadero se puede utilizar la siguiente expresión (Salim, 1993; Bakker *et al.*, 1995), el siguiente modelo para el cálculo de la transpiración está basado en los modelos obtenidos por Stanghellini y de Jong (1995):

$$Q_{trans} = G_E \lambda (\chi_{cul} - \chi_a) \quad (Wm^{-2}s^{-1}) \quad (3.6)$$

Donde:

χ_{cul} = Concentración de vapor de agua absoluto en el cultivo (gm^{-3})

χ_a = Concentración de vapor de agua en el invernadero (gm^{-3})

El calor latente de vaporización (λ) se calcula como (Blasco *et al.*, 2007a):

$$\lambda = 3.1468 - 0.002365(T_a + 273) \times 10^6 \quad (3.7)$$

La conductancia de transpiración (G_E) está dada por:

$$G_E = \frac{2LAI}{(1+\epsilon)r_b + r_s} \quad (\text{ms}^{-1}) \quad (3.8)$$

Donde:

$$LAI = \text{índice de área foliar (cm}^2 \text{ cm}^{-2}\text{)}$$

La relación del calor latente y sensible contenido del aire saturado (ϵ) se calcula como:

$$\epsilon = 0.7584e^{0.0518T_a} \quad (3.9)$$

Donde:

$$r_b = \text{Resistencia a la capa límite de la hoja (sm}^{-1}\text{)}$$

El parámetro de resistencia estomática (r_s) es estimado en:

$$r_s = \left(82 + 570e^{\frac{-kR_n}{LAI}} \right) (1 + 0.023(T_a - 20)^2) \quad (\text{sm}^{-1}) \quad (3.10)$$

Donde:

$$k = \text{Parámetro de transpiración específica del cultivo (0.4)}$$

La radiación neta (R_n) a nivel del cultivo es estimado mediante la ecuación propuesta por Bontsema *et al.* (2007) :

$$R_n = 0.86(1 - \exp(-0.7LAI))Q_{\text{sun}} \quad (3.11)$$

La concentración de vapor de agua en el cultivo se expresa como:

$$\chi_{\text{cultivo}} = \chi_{a \text{ sat}}^* + \epsilon \frac{r_b}{2LAI} \frac{R_n}{\lambda} \quad (\text{gm}^{-1}) \quad (3.12)$$

La concentración de vapor saturado ($\chi_{a \text{ sat}}^*$) puede ser aproximado como:

$$\chi_{a \text{ sat}}^* = 5.563e^{0.0572T_a} (gcm^{-3}) \quad (3.13)$$

4. Ventilación

Para el invernadero bajo estudio, se utilizó la ecuación de Blasco *et al.* (2007b):

$$Q_{vent} = Ts * \rho * C_{p,aire} * (T_a - T_e) \quad (Wm^{-2}s^{-1}) \quad (3.14)$$

Donde:

$\rho = \text{Densidad del aire } (1.225 \text{ kg}_{\text{aire}}m^{-3})$

$C_{p,aire} = 1000 \text{ J kg}^{-1}{}^{\circ}\text{C}^{-1}$

$T_a = \text{Temperatura interna } (^{\circ}\text{C})$

$T_e = \text{Temperatura externa } (^{\circ}\text{C})$

La tasa de ventilación se puede calcular de la siguiente manera:

$$T_s = \left(\frac{A_{vent}}{2} \right) (Cd) \sqrt{Cw} * v_{in} + Ts_v$$

Donde:

$A_{vent} = \text{Área de ventilación } (171 \text{ m}^2)$

$Cd = \text{Largo de la ventana } (3.2 \text{ m})$

$Cw = \text{Ancho de la ventana } (0.8 \text{ m})$

$v_{in} = \text{Velocidad del viento } (m \text{ s}^{-1})$

$Ts_v = \text{Tasa de ventilación } (0.25)$

5. Condensación

Para el cultivo de tomate se utilizó la ecuación de Speetjens *et al.* (2010)

$$Q_{cond} = \lambda(\varphi_{cond}) \quad (W)$$

Donde:

λ = El calor latente de vaporización ($J \, kg^{-1}$)

El flujo de condensación (φ_{cond}) se puede calcular de la siguiente manera:

$$\varphi_{cond} = k_{po} * \rho_{air} * A_{cub} * (\chi - \chi_{sat}) \quad (W)$$

Para la conversión de la humedad relativa a absoluta se utilizó la siguiente formula (Blasco *et al.*, 2007a):

$$H_i(t) = \begin{cases} 100, & H_i > 100 \\ H_i, & H_i \leq 100 \end{cases}, \quad H_i = \frac{100 \chi P}{0.611 \chi_{sat}(T_a)}$$

Donde:

$$\chi_{sat}(T_a) = 0.61(1 + 1.414 \sin(5.82e^{-3}T_a))^{8.827}$$

6. Intercambio de calor entre el aire del invernadero y el suelo

Para el invernadero tipo cenital se utilizó ecuación de Van Ooteghem (2010), donde la profundidad a la que se estimó la temperatura del suelo fue a 0.5 m de la primer capa del suelo:

$$Q_{suelo} = \frac{k_s S_c (T_a - T_s)}{p}$$

Donde:

k_s = Coeficiente de intercambio a través del suelo (1.5)

S_c = Superficie del suelo (120 m^2)

T_a = Temperatura interna ($^{\circ}\text{C}$)

T_s = Temperatura del suelo ($^{\circ}\text{C}$)

p = Profundidad a la que se estima la temperatura del suelo (0.5 m)

2.4 Adquisición de datos

En el cálculo de las necesidades de climatización del invernadero intervienen tanto las condiciones climáticas a las que está expuesto el invernadero como las condiciones climáticas que es necesario mantener en su interior para el correcto desarrollo de los cultivos (Martínez *et al.*, 2008). Para la medición de las variables del clima se instaló dos estaciones HOBO una dentro del invernadero y otra fuera del invernadero (Figura 9). Las lecturas de los sensores para ambos casos fueron en un intervalo de un minuto. En el caso de la temperatura del techo se instalaron dos sensores en la cubierta y los datos se almacenaron en un datalogger cada minuto.

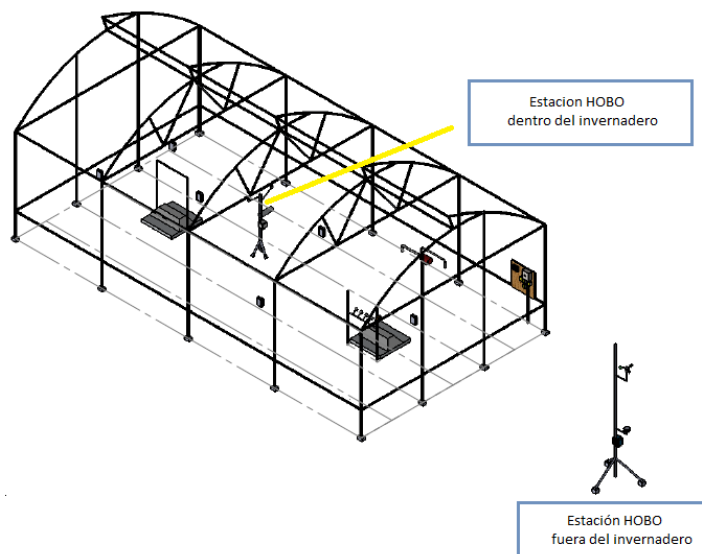


Figura 9. Localización de las estaciones HOBO fuera y dentro del invernadero

Las variables que se midieron fuera del invernadero fueron la velocidad del viento, el anemómetro fue colocado a 2.5 m del suelo, el sensor de temperatura fue fijado a 1.6 m del suelo y el sensor de humedad relativa se colocó a 1.6 m del suelo, los sensores se conectaron a la estación HOB0 y la lectura de los sensores fueron tomados a cada minuto (Figura 10).

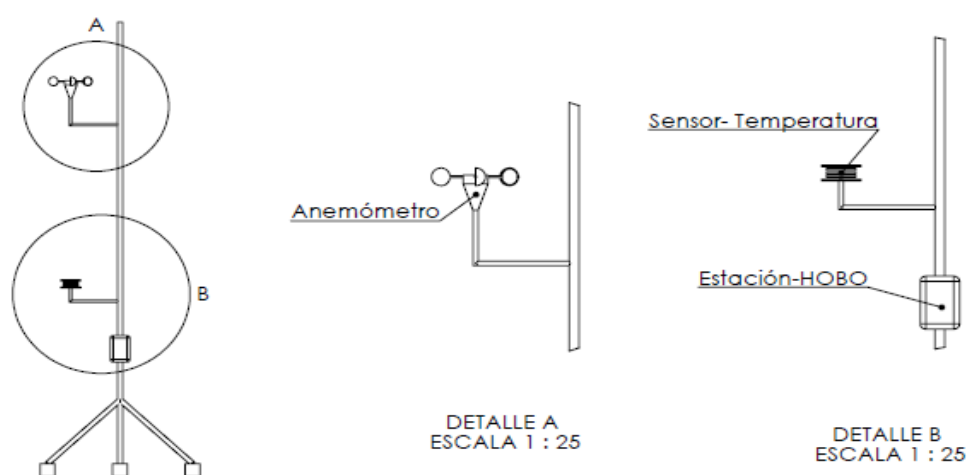


Figura 10. Estación HOBO, anemómetro, sensor de temperatura y humedad relativa.

Las variables que se midieron dentro del invernadero fueron temperatura interior, temperatura del suelo, radiación global, humedad relativa las cuales se conectaron a la estación meteorológica HOBO que fue ubicado en el centro del invernadero (Figura 11).

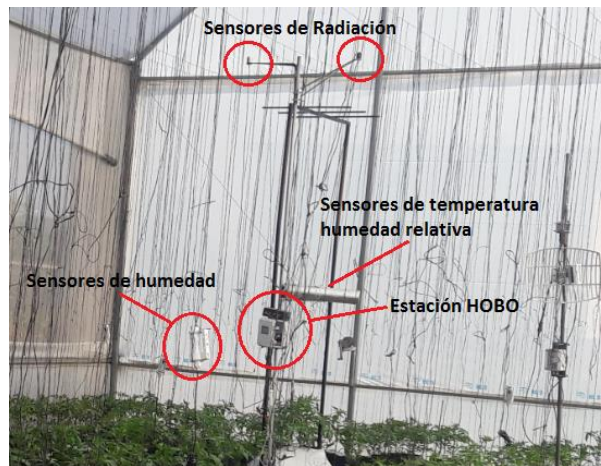


Figura 11. Estación HOBO y sensores dentro del invernadero.

El invernadero cuenta con dos ventanas laterales y una ventana cenital. La apertura y cierre de las ventanas se realizó de forma manual, el tamaño de las ventanas laterales es de 6 m de ancho por 13 m de largo y de la cenital es de 15 m de largo por 1 m de ancho (Figura 12).

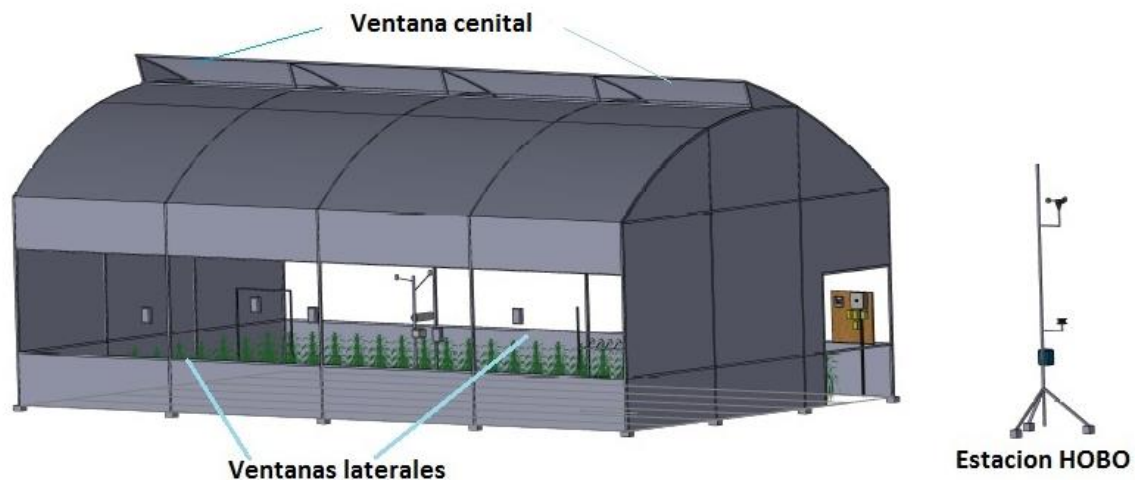


Figura 12. Ventanas laterales y ventana cenital del invernadero.

2.5 Cálculo del índice de área foliar

Para el cálculo del área foliar (AF) se estimó mediante el método destructivo, en donde se realizaron mediciones cada diez días durante el ciclo del cultivo, el método consistió en escoger tres plantas de manera aleatoria las cuales fueron llevadas al laboratorio ahí se midió el largo y ancho de cada hoja, así como también el peso de la biomasa de la planta. En un integrador marca LI-COR modelo LI-3100 (Figura 13) se determinó el área foliar real.



Figura 13. Integrador de area foliar marca LI-COR modelo LI-3100.

A partir del área foliar se puede estimar el Índice de área foliar (LAI) (Iglesias, 2015):

$$LAI = \frac{AF}{AS} \quad (m^2 * m^{-2}) \quad (3.31)$$

Donde:

$AF = \text{área foliar} (m^2)$

$AS = \text{área del suelo} (m^2)$

Área foliar específica (SLA), se obtiene de la siguiente ecuación:

$$SLA = \frac{AF}{w} \quad (cm^2 * g^{-1}) \quad (3.32)$$

Donde:

$AF = \text{área foliar } (cm^2)$

$w = \text{peso seco foliar } (g)$

Peso Seco de hojas (PS), Se obtiene secando la parte aérea de las plantas en una estufa a 65°C hasta peso constante (Iglesias, 2015).

2.6 Cálculo de los índices de energía en el invernadero

Con los datos obtenidos se realizó la medición y cuantificación del consumo de energía en la producción de jitomate para un invernadero de baja tecnología, a través de la Eficiencia en el Uso de la Energía considerando todos los insumos de la producción.

Existen diferentes medidas del desempeño de la energía en el proceso de producción dados por Djelic y Dimitrijevic (2004) y Pahlavan *et al.* (2011)

1. Eficiencia en el uso de la energía

$$\text{Eficiencia en el uso de energía} = \frac{\text{salida de energía(MJ por unidad de área)}}{\text{entradas de energía(MJ por unidad de área)}} \quad (3.33)$$

2. Productividad energética

$$\text{Productividad energética} = \frac{\text{Producción de jitomate(Ton por unidad de área)}}{\text{entradas de energía(MJ por unidad de área)}} \quad (3.34)$$

3. Energía específica

$$Energía\ específica = \frac{entradas\ de\ energía(MJ\ por\ unidad\ de\ área)}{Producción\ de\ jitomate(Ton\ por\ unidad\ de\ área)} \quad (3.35)$$

Para el cálculo de la eficiencia en el uso de energía dado por el consumo de electricidad y el combustible, se puede calcular de la siguiente manera (Djevic & Dimitrijevic, 2004):

$$EUE_{electricidad} = \frac{Entrada\ de\ energía\ (MJ)}{Producción\ Total\ (kg)} \quad (3.36)$$

2.7 Implementación de los modelos en MATLAB

Para la implementación de los modelos se utilizó la plataforma de MATLAB/SIMULINK. Este consta de un programa principal donde se definen los parámetros, variables de entrada y salidas, así como las opciones de simulación; y un archivo C-MEX S-function donde se implementan las ecuaciones del modelo que es llamado por un archivo mdl de SIMULINK. Para la simulación numérica se utilizó en el modelo el método de integración Runge-Kutta con paso de integración variable ode45 con tolerancia de 1×10^{-8} .

2.7.1 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad es el estudio de cómo la incertidumbre en la salida de un modelo se puede distribuir a diferentes fuentes en la entrada del modelo (Saltelli, 2000). Se puede dividir en dos grandes categorías: análisis de sensibilidad local y global. Métodos de análisis de sensibilidad local se refieren a

pequeños cambios de los parámetros, mientras que los métodos globales se refieren al efecto de los cambios simultáneos (Saltelli, 2000).

La ecuación general para el cálculo del análisis de sensibilidad se muestra en la siguiente formula(Saltelli, 2000):

$$\frac{dS_I}{dt} = \frac{\partial f}{\partial x} S_j + \frac{\partial f}{\partial p_j}; \quad j = 1 \dots n \quad (3.37)$$

Donde:

S_j =Es la sensibilidad de la salida

p_j = Es el valor del parámetro.

En este modelo de balance de energía para la temperatura, se llevó acabo el análisis de sensibilidad local, se realizó la derivada de cada uno de los parámetros designados (ver apéndice C). Después del análisis de sensibilidad se procedió a la realización de la calibración del modelo.

2.7.2 Calibración

Estimación de parámetros o calibración de un modelo es el proceso de alterar los parámetros para obtener un mejor ajuste entre los resultados del modelo y los datos medidos (Ruiz, 2009).

De acuerdo con Tap (2000), los parámetros seleccionados para calibración son aquellos:

- Que son inciertos
- Que más afectan el comportamiento del modelo (sensibilidad)
- Que afectan el comportamiento del modelo de manera que es necesario obtener un mejor ajuste entre datos simulados y medidos.

La calibración es un problema de optimización no lineal, en donde el objetivo es la minimización del error cuadrado medio sujeto a los límites inferiores y superiores de los parámetros:

$$\text{Min } \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n} \quad (3.38)$$

$$L_{Ipi} < p_i < L_{Spi}$$

Donde:

L_{Ipi} y L_{Spi} son el límite inferior y superior del valor de los parámetros del modelo
 p_i es el i -ésimo parámetro con $i = 1, \dots, n$

Para la calibración se implementaron las ecuaciones de las derivadas en el programa principal de balance de energía donde se utilizó la función `lsqnonlin` de Matlab y se ubicaron los rangos dentro de los cuales los parámetros fueran óptimos. Los límites inferior y superior se variaron de un 10% a 60% alrededor de los valores nominales de los parámetros.

3. Resultados y discusión

3.1 Modelo dinámico de balance de energía

El modelo dinámico de balance de energía descrito en el apartado 3.3 se implementó en el ambiente MATLAB/SIMULINK. Se tiene un programa principal donde se definieron los parámetros y las variables de entrada y salida (ver Apéndice B.1), y un archivo en SIMULINK en donde se llamó una subrutina en C-MEX S-function que contiene las ecuaciones del modelo (ver Apéndice B.2). Para la obtención de la solución numérica del modelo de balance de energía se utilizó el método de integración Runge-Kutta con tamaño de paso de integración variable ode45, se utilizó un total de 10428 datos para la construcción y simulación del modelo.

En la Figura 14 se muestran las gráficas de las variables medidas (radiación solar, temperatura del suelo, temperatura de la cubierta, temperatura externa, velocidad del viento y humedad relativa) durante un periodo de 2 meses y 10 días.

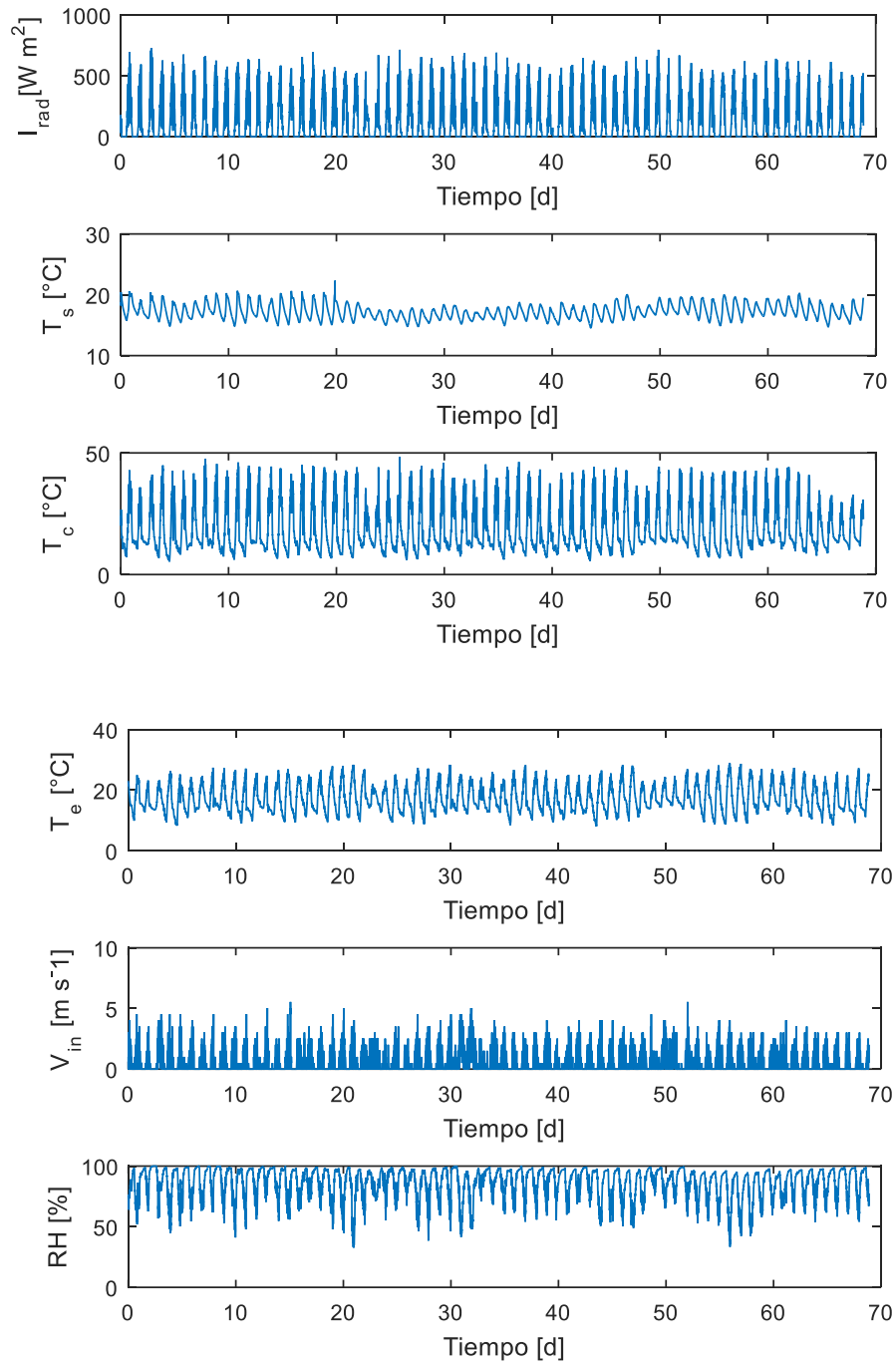


Figura 14. Variables medidas de entrada del modelo, $I_{rad} [W m^2]$ (Radiación solar), $T_s [^{\circ}C]$ (Temperatura del suelo), $T_c [^{\circ}C]$ (Temperatura de la cubierta), $T_e [^{\circ}C]$; (temperatura externa), $V_{in} [m s^{-1}]$ (Velocidad del viento), $RH [\%]$; (Humedad relativa).

En la Figura 15 se muestran los resultados del modelo dinámico de balance de energía (ver apéndice B), donde se muestra el comportamiento de la temperatura en el invernadero, se puede observar que la temperatura simulada con respecto a lo observado presenta una sobrestimación y subestimación es decir que no se encuentran ajustados. Se requiere de la calibración de los principales parámetros que afectan al modelo, para poder obtener los valores óptimos que mejoren el ajuste del modelo.

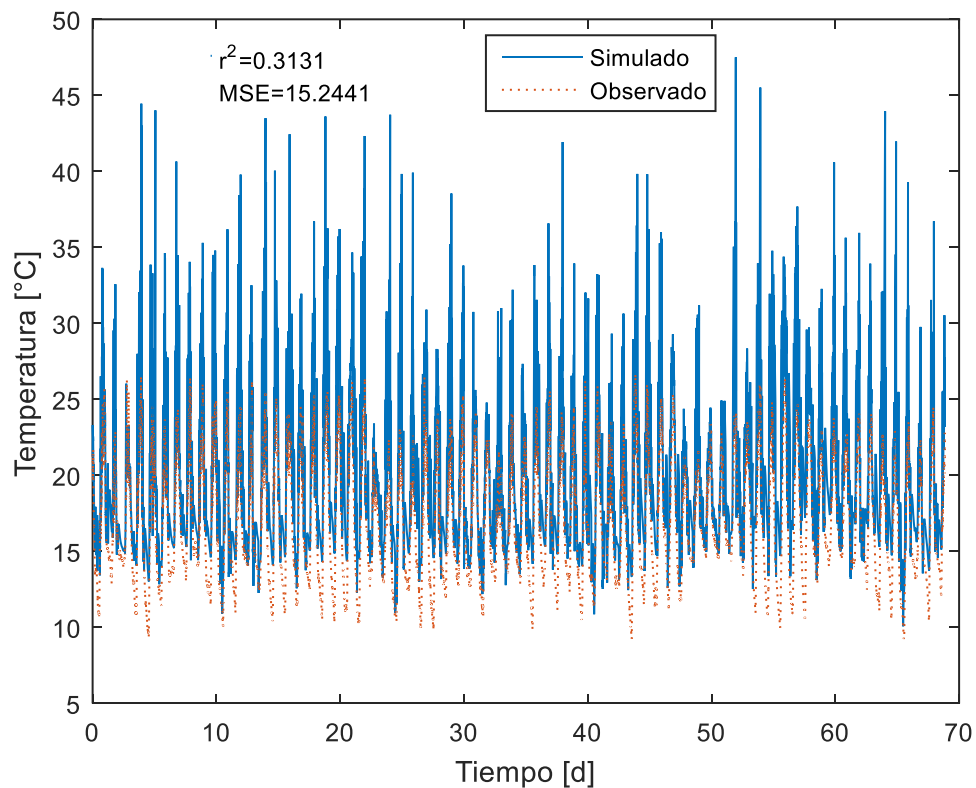
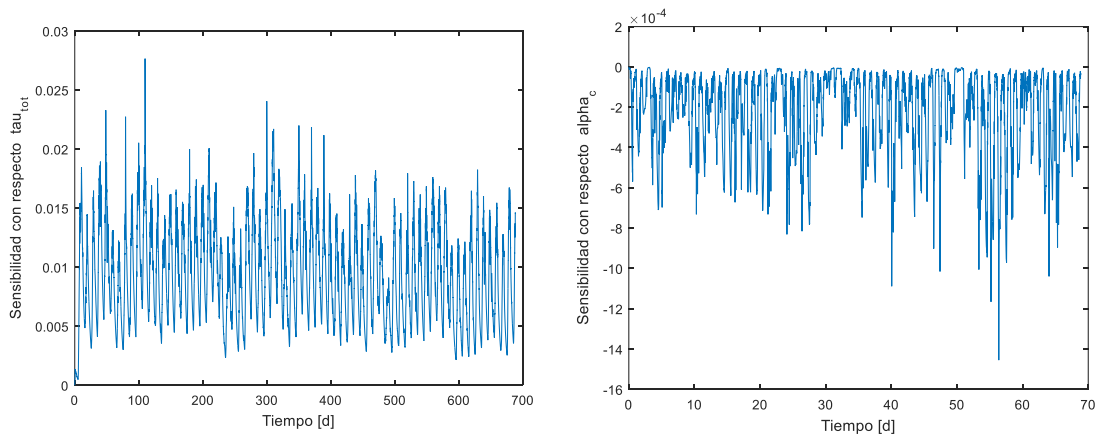


Figura 15. Comparación entre la temperatura del aire del invernadero, observado y simulado.

Para obtener los valores óptimos de los principales parámetros que más influyen en el modelo, se realizó el análisis de sensibilidad global, para los siguientes parámetros T_{inf} (Tasa infiltración), α_c (coeficiente de transferencia de calor de la cubierta), r_b (Resistencia aerodinámica), k_s (coeficiente de intercambio térmico a través del suelo), k (parámetro de transpiración específica del cultivo) y V (volumen de invernadero) (ver Apéndice C).

Haciendo uso de las ecuaciones para el análisis de sensibilidad que fueron descritas en el apartado 3.7.1, se generó la Figura 16 para los principales parámetros que más influye en el modelo.



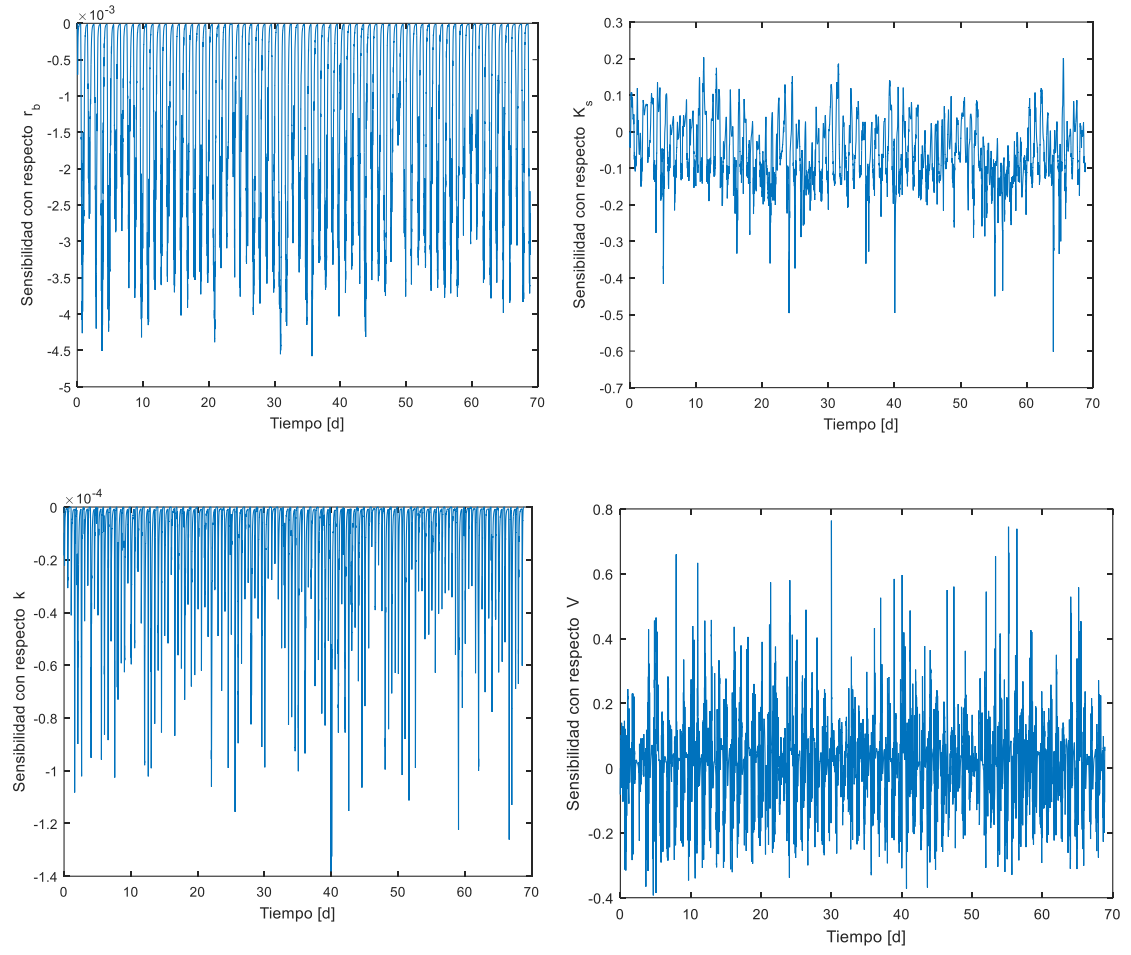


Figura 16. Sensibilidad relativa de la temperatura con respecto a los parámetros $T_{inf}, \alpha_c, r_b, k_s, k$ y V

En la Cuadro 5 se presenta los índices de sensibilidad para todos los parámetros mencionados anteriormente, se eligieron los parámetros con mayor índice de sensibilidad, es decir los que más afectan al modelo y se procedió a realizar la calibración.

Cuadro 5. Valores de los índices de sensibilidad para los parámetros T_{inf} , α_c , r_b , k_s , k y V .

Parámetro	Descripción	Índices de sensibilidad
T_{inf}	Tasa de infiltración	0.12
α_c	Coeficiente de transferencia de calor de la cubierta	-0.0082
r_b	Resistencia aerodinámica	-0.0762
k_s	Coeficiente de intercambio térmico a través del suelo	-3.5505
k	Parámetro de transpiración específica del cultivo	$-8.1567e^{-4}$
V	Volumen del invernadero	1.2879

Los índices de sensibilidad muestran que el parámetro que más influye en modelo de balance de energía es el volumen del invernadero (V), seguido por el tasa de infiltración T_{inf} , los demás parámetros que son α_c , r_b , k_s y k , tienen un índice de sensibilidad bajo lo que indica que no son muy influyentes en el modelo.

Después de realizar el análisis, se procedió a realizar la calibración y dado que no fueron muchos parámetros se decidió a calibrar todos los parámetros, cada parámetro se perturbo entre un 5% hasta un 65% alrededor del valor

nominal, para esto se utilizó la función lsqnonlin de MATLAB, donde se asignó el límite inferior y límite superior (Cuadro 6).

Cuadro 6. Límite superior e inferior de cada parámetro calibrar.

Parámetro	Descripción	Límite inferior	Límite superior
T_{inf}	Tasa de infiltración	0.00	10.00
α_c	Coeficiente de transferencia de calor de la cubierta	0.32	1.06
r_b	Resistencia aerodinámica	67.50	200.00
k_s	Coeficiente de intercambio térmico a través del suelo	0.68	2.33
k	Parámetro de transpiración específica del cultivo	0.18	0.62
V	Volumen del invernadero	1777.50	6122.50

En el Cuadro 7 se muestran el rango de variación donde se encontraron las mejores medidas de ajuste (MSE = Error cuadrado medio, RMSE = Raíz del error cuadrado medio, MAE = Error absoluto medio, r^2 = Coeficiente de determinación, RMAE = Error absoluto medio relativo) y los valores óptimos para los parámetros T_{inf} , α_c , r_b , k_s , k y V . Cada uno de los parámetros se varió uno a la vez manteniendo el valor fijo de los demás y así consecutivamente, se eligieron los valores óptimos que generaban un MSE mínimo entre la temperatura simulada y la observada.

En la Cuadro 8 se muestra en resumen los valores nominales y valores de ajuste óptimos, así como también las medidas de ajuste inicial y final.

Cuadro 7. Índices estadísticos para el mejor rango de variación y valor óptimo para cada uno de los parámetros, manteniendo constante el resto en su valor nominal.

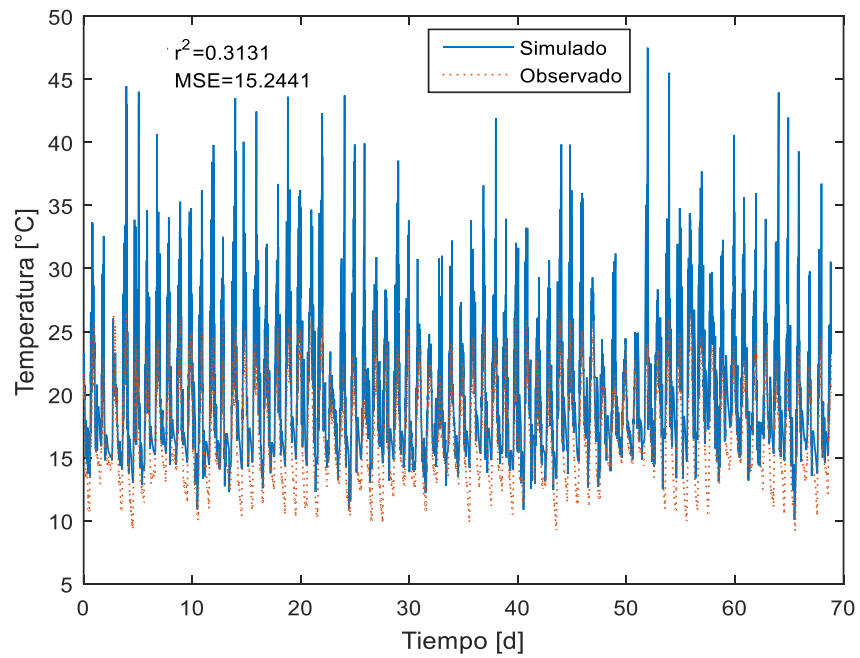
Parámetro	Rango de variación	r^2	MSE	RMSE	MAE	RMAE	Valor óptimo
V	1777.5-6122.5	0.5238	8.7488	2.9578	2.3846	0.1422	$V = 6122.5$ $T_{inf} = 5.00$ $k = 0.18$ $\alpha_c = 1.085$ $r_b = 200.0$ $k_s = 2.325$
T_{inf}	0.00-10.00	0.9217	2.7203	1.6493	1.2334	0.0736	
k	0.18-0.62	0.9227	2.7005	1.6433	1.2292	0.0733	
α_c	0.315-1.085	0.9227	2.7004	1.6433	1.2292	0.0733	
r_b	67.5-200.00	0.9302	2.4175	1.5548	1.1748	0.0701	
k_s	0.675-2.325	0.9273	2.3602	1.5363	1.1572	0.0690	

Cuadro 8. Medidas de ajuste inicial y final, valor nominal y óptimo.

Valor nominal	Medidas de ajuste inicial	Rango de variación	Valor después de la calibración (Óptimos)	Medidas de ajuste final
$V = 1943$	MSE=15.2441	$0.00 < T_{inf} < 10.00$	$V = 6122.5$	MSE=2.3602
$T_{inf} = 0.25$	RMSE=3.9044	$0.315 < \alpha_c < 1.085$	$T_{inf} = 5.0$	RMSE= 1.5363
$k = 0.4$	MAE= 2.9799	$67.5 < r_b < 200.00$	$k = 0.18$	MAE=1.5772
$\alpha_c = 0.7$	$r^2=0.3131$	$0.675 < k_s < 2.325$	$\alpha_c = 1.085$	$r^2 = 0.9273$
$r_b = 150$	RMAE=0.1777	$0.18 < k < 0.62$	$r_b = 200.00$	RMAE=0.0690
$k_s = 1.5$		$1777.5 < V < 6122.5$	$k_s = 2.325$	

Después de obtener los mejores valores óptimos se procedió a la calibración del modelo, donde los valores presentados en la cuadro 8 se utilizaron e implementaron en el modelo, teniendo como resultado un mejor ajuste de la temperatura de lo estimado con respecto a lo observado como se muestra en la Figura 17.

Antes de la calibración



Después de la calibración

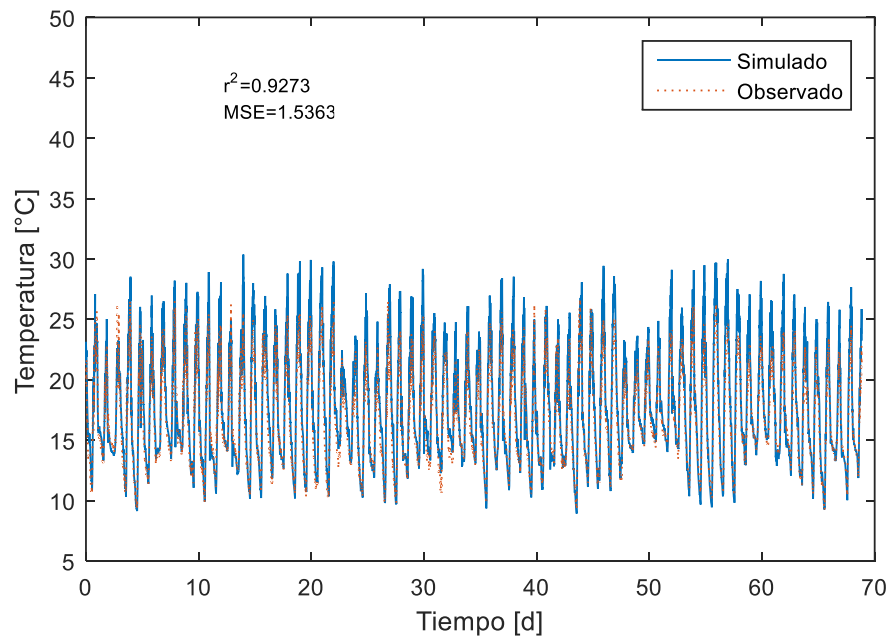


Figura 17. Comparación del modelo dinámico general de balance de energía antes y después de la calibración.

3.2 Eficiencia en el uso de energía

En el Cuadro 9 se muestra el consumo total de volumen total de riego por día en el invernadero durante un ciclo de producción para el cultivo de tomate correspondiente del 24 de abril al 17 de octubre del 2016, para un total de 315 plantas por los 120 m², se obtuvo una densidad de plantas de 3.5 plantas por m². La variación de agua por día se debe a la etapa fenológica en la que se encuentra el cultivo, así como también a la medición del drenaje, si el cultivo en un día no presentaba agua en el recipiente, se le aumentaba un minuto más de riego.

Cuadro 9 Volumen total de riego en 120 m² para la producción de tomate

Fecha	Total de días	Volumen total de agua por día (m ³)
30 de abril -18 mayo	19	0.168
19 de mayo-5 junio	18	0.336
6 de junio-9 de julio	34	0.504
10 julio-24 de julio	15	0.672
25 de julio -14 agosto	21	0.504
15 de agosto-3 septiembre	20	0.672
4 septiembre-16 octubre	43	0.504

La solución nutritiva aplicada durante el ciclo de producción se muestra en el Cuadro 10, el método de aplicación fue fertirriego, se manejaron dos dosis, la primera corresponde a las primeras etapas del cultivo que comprenden desde la siembra hasta la primera floración, debido a que se mejoró el rendimiento del

cultivo se procedió a aplicar la segunda dosis que fue desde la primer floración, hasta la cosecha.

Cuadro 10 Solución nutritiva aplicada en 120 m²

Fertilizante	Dosis semanal (kg / 120 m ²)		Número de semanas		Total (kg/120 m ²)
	1ra dosis	2da dosis	1ra dosis	2da dosis	
kNO ₃ (Nitrato de Potasio)	2.21695	1.965	3	8	22.367
Ca(NO ₃) ₂ (Nitrato de Calcio)	4.4899	4.785	3	8	51.749
K ₂ SO ₄ (Sulfato de Potasio)	1.94835	1.701	3	8	19.452
MgSO ₄ (Sulfato de Magnesio)	1.70355	1.704	3	8	18.739
H ₃ PO ₄ (Ácido Fosfórico)	0.5085	0.540	3	8	5.849
H ₂ SO ₄ (Ácido Sulfúrico)	0.08185	0.082	3	8	0.901
Macroelementos	0.125	0.003	3	8	0.399
B (Boro)	-	0.011	-	8	0.090

El total de horas requeridas para llevar a cabo todas las actividades requeridas para un ciclo de producción en el invernadero en actividades como siembra, llenado de bolsas, trasplante, tutorio, mantenimientos, limpieza y cosecha están descritas en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Mano de obra en 120 m²

Concepto	Horas (h)	Equivalencia de energía(MJ por unidad de área)	Energía total (MJ)
Siembra	16	-	-
Llenado de bolsas	20	-	-
Trasplante	24	-	-
Tutoreo	42	-	-
Mantenimiento y Limpieza	591	-	-
Cosecha	65	-	-
Total de horas en un ciclo	758	2.3	1743.4

En el Cuadro 12 se puede apreciar los insumos totales utilizados durante un ciclo de producción de jitomate, se muestra la cantidad por unidad de área que multiplicado por su equivalente de energía que se describió anteriormente en la Cuadro 1, nos da como resultado la energía total en MJ requeridas para cada actividad.

Haciendo uso de las formulas dadas en la sección 3.6 para el cálculo de los índices de energía como son la productividad energética, energía específica y la eficiencia en el uso de la energía se obtuvo el Cuadro 13.

Cuadro 12. Insumos utilizados en la producción de tomate

Insumos	Unidades	Cantidad por unidad de área	Equivalencia de energía(MJ por unidad de área)	Energía total (MJ)
Agua para riego	m ³	82.15	0.63	51.76
Mano de obra	h	758.00	2.30	1743.00
semillas	kg	0.00	1.00	0.00
plantas	unidad	315.00	0.80	252.00
Motor monofásico	kW h	18.29	3.60	65.84
insecticida stick buk	kg	0.10	101.20	9.72
Nitrato de calcio	m ³	22.37	66.14	1479.32
Nitrato de potasio	h	22.37	66.14	1479.32
Sulfato de potasio	kg	19.45	11.15	216.89
Sulfato de magnesio	kg	18.74	120.00	2248.69
Macroelementos	kg	0.40	120.00	47.88
ácido fosfórico	kg	5.85	12.44	72.76
ácido sulfúrico	kg	0.90	1.20	1.08
Boro	kg	0.09	120.00	10.80
Producción de jitomate	kg	2288.94	0.80	1831.15
Total de energía de los insumos	-	-	-	7679.45
Productividad energética	kgMJ ⁻¹	-	-	0.30
Energía específica	MJ t ⁻¹	-	-	3355.02
Eficiencia en el uso de energía	kgMJ ⁻¹	-	-	0.24

Fuente: Ozkan (2011), Pahlavan *et al.* (2011).

Cuadro 13. Índices de energía.

Índice de energía	Unidades	Valor
Productividad energética	kg MJ ⁻¹	0.298
Energía específica	MJ t ⁻¹	3355.024
Eficiencia en el uso de energía	MJ MJ ⁻¹	0.238

La eficiencia en el uso de energía que se encontró fue de 0.238 MJ/MJ es un valor más alto que el que encontró Pahlavan *et al.* (2011) de 0.001 MJ/MJ, pero para el que encontró Sepat *et al.* (2013) de 1.36 MJ/MJ es demasiado bajo.

Otra medida de eficiencia en el uso de energía comúnmente usada está dada en MJ m² y se obtiene a continuación:

$$\text{Eficiencia en el uso de energía} = \frac{7679.44 \text{ (MJ)}}{120 \text{ (m}^2\text{)}} = 63.99 \text{ MJ m}^{-2}$$

El uso eficiente de energía por m², es elevado comparado con lo reportado por Djevic y Dimitrijevic (2004), de 9.76 MJ m⁻² para un invernadero multitúnel y con el obtenido para un túnel que es de 63.99 MJ m⁻².

Análisis de energía basado en el consumo de energía en electricidad y consumo de combustible.

Tomando en cuenta todas las entradas se tiene lo siguiente:

$$\text{Eficiencia en el uso de energía} = \frac{\text{Entradas de energía (MJ)}}{\text{Producción (Kg)}}$$

$$\text{Eficiencia en el uso de energía} = \frac{7679.44 \text{ (MJ)}}{2288.9 \text{ (Kg)}} = 3.35 \text{ MJ kg}^{-1}$$

Considerando únicamente el motor, tenemos:

$$Eficiencia\ en\ el\ uso\ de\ energia = \frac{Entradas\ de\ energia\ (MJ)}{Producción(Kg)}$$

$$Eficiencia\ en\ el\ uso\ de\ energia = \frac{65.83\ (MJ)}{2288.9(Kg)} = 0.028\ MJ\ kg^{-1}$$

Conclusiones

En el presente trabajo se desarrolló un modelo dinámico de balance de energía en estado no estacionario. El modelo de simulación describe el comportamiento de la temperatura dentro del invernadero con ventilación natural, tomando en cuenta los fenómenos de radiación solar, transpiración, ventilación, condensación, así como la incidencia de las variables, temperatura de la cubierta y temperatura del suelo. Por consiguiente se llevó acabo la cuantificación de los índices relacionados con el consumo de energía del cultivo de tomate, para un ciclo de producción.

Después de realizar el análisis de sensibilidad se procedió a la realización de la calibración, con el fin de tener un mejor ajuste en el modelo y mejorar el comportamiento de la temperatura. Los principales parámetros que influyeron más en el balance de energía son el volumen del invernadero, la resistencia aerodinámica y la tasa de infiltración, donde el volumen del invernadero aumento con respecto a lo real. En el caso de la resistencia aerodinámica aumento, lo que indica que a mayor resistencia es menor la tasa de transpiración, por último la tasa de infiltración aumento. Después de la calibración del modelo se obtuvo un mejor ajuste entre la temperatura medida y la simulada, se obtuvo un coeficiente de determinación inicial de 0.3131 con un coeficiente final de determinación de 0.9273. El modelo podría utilizarse para propósitos de investigación.

La producción en invernaderos es uno de los principales consumidores de energía. En el análisis de los índices de energía, la productividad energética encontrada fue de 0.238 MJ/MJ, este resultado se encuentra entre los reportados

por Pahlavan *et al.* (2011) de 0.001 y Sepat *et al.* (2013) de 1.36, el consumo principal de energía es debido a la fertilización, siendo el mayor aportador el Sulfato de Magnesio con un 29.28 %, seguida por el Nitrato de Calcio con un 22.70% y el Nitrato de Potasio con 19.26%. La mano de obra es un componente importante en el consumo de energía especialmente en un invernadero de baja tecnología.

El consumo de energía obtenido en este estudio fue bastante elevado ya que se requieren 63.99 MJ m⁻², que dan un total de 7679.44 MJ por todo el invernadero de 120 m², lo anterior se debe a que se manejó con un invernadero pequeño comparado al encontrado por Djevic y Dimitrijevic (2004) de 9.76 MJ m⁻² para un invernadero multitunel de 1000 m².

El consumo de energía debido a la fertilización se debió a que se aumentó el rendimiento de la planta de tomate, obteniendo así una mayor producción, para aumentar la eficiencia de energía en el invernadero se recomienda mantener la dosis de fertilización necesaria para el cultivo, sin embargo esto significa que no se tendría el mismo rendimiento y producción.

Literatura citada

- Abdel-Ghany, A. M., & Al-Helal, I. M. (2011). Solar energy utilization by a greenhouse: General relations. *Renewable Energy*, 36(1), 189-196. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.020>
- Al-Jamal, K. (1994). Greenhouse cooling in hot countries. *Energy*, 19(11), 1187-1192.
- Andrieu, B., Allirand, J. M., & Jaggard, K. (1997). Ground cover and leaf area index of maize and sugar beet crops. *Agronomie* 17 (6-7), 315-321.
- Antón, A., Montero, J. I., & Muñoz, P. (2003). Necesidades de agua del cultivo de tomate en invernadero. Comparación con el cultivo al aire libre. IRTA, proyecto de investigación INIA SC00 080 C2. Barcelona, España. Disponible en World Wide Web: <http://biblioteca.idict.villaclara.cu/UserFiles/File/CI%20Cultivos%20en%20invernaderos/24.pdf> .
- Arinze, E., Schoenau, G., & Besant, R. (1984). A dynamic thermal performance simulation model of an energy conserving greenhouse with thermal storage. *Transactions of the ASAE*, 27(2), 508-519.
- Astegiano, E. D., & Favaro, J. C. (1987). Desarrollo del área foliar en tres cultivares de tomate. Resúmenes de la XVIII Reunión Nacional de Fisiología Vegetal. Corrientes. Argentina, 4 pp.
- Baille, A. (1999). Overview of greenhouse climate control in the mediterranean regions. *Cahiers options mediterraneennes*, 31, 59-76.

- Bakker, J., Bot, G., Challa, H., & deBraak, N. V. (1995). Greenhouse Climate Control: An Integrated Approach. *Wageningen Press. The Netherlands*. 279 pp.
- Baptista, F., Bailey, B., Meneses, J., & Gracia, L. M. N. (2010). Greenhouses climate modelling: tests, adaptation and validation of a dynamic climate model. *Spanish journal of agricultural research*(2), 285-298.
- Blasco, X., Martínez, J. M., Herrero, C., & Ramos, J. S. (2007a). Model-based predictive control of greenhouse climate for reducing energy and water consumption. *ELSEVIER*. doi: 10.1016/j.compag.2006.12.001
- Blasco, X., Martínez, J. M., Herrero, C., & Ramos, J. S. (2007b). Model-based predictive control of greenhouse climate for reducing energy and water consumption. *ELSEVIER* doi: 10.1016/j.compag.2006.12.001
- Bontsema, J., Hemming, J., Stanghellini, C., De Visser, P., Van Henten, E. J., Budding, J., . . . Nieboer, S. (2007). On-line monitoring van transpiratie en fotosynthese activiteit. Nota 451. Wageningen UR GL astuinbouw, Wageningen. . *The Netherlands*, 78 p.
- Boulard, T., & Baille, A. (1987). Analysis of thermal performance of a greenhouse as a solar collector. *Energy in Agriculture*, 6(1), 17-26.
- Brun, F., Wallach, D., Makowski, D., & Jones, J. W. (2006). *Working with dynamic crop models: evaluation, analysis, parameterization, and applications*: Elsevier.
- Castañeda, M. R., Ventura-Ramos Jr, E., Peniche-Vera, R. d. R., & Herrera-Ruiz, G. (2007). Analysis and simulation of a greenhouse physical model under

- weather conditions of the central region of Mexico. *Agrociencia*, 41(3), 317-335.
- Castilla, P. N. (2007). Invernaderos de plástico. Tecnología y manejo. (Ed.) Mundi-Prensa, 2ª ed. .
- Cervantes, M. A. (2002.). Ventilación en cultivos intensivos. Artículo obtenido de la página web www.infoagro.com. Consultado en octubre 2017.
- Coombs, J., & Hall, D. O. (1982). Whole Plant Photosynthesis and Productivity. In: Techniques in Bioproductivity and Photosynthesis. *Pergamon Press, Oxford*. 171 pp.
- Challa, H. (1990). Crop growth models for greenhouse climate control. Theoretical Production Ecology.125-145 pp.
- Dannehl, D., Schuch, I., & Schmidt, U. (2013). Plant Production in Solar Collector Greenhouses-Influence on Yield, Energy Use Efficiency and Reduction in CO2 Emissions. *Journal of Agricultural Science*, 5(10), 34.
- Day, W., & Bailey, B. J. (1999). Physical principles of microclimate modification. In Greenhouse ecosystems. Stanhill G.; Enoch H.Z. (Ed.). *Elsevier. Amsterdam. Netherlands*: 71-96. .
- Dengler, N. G. (1984). Comparison of leaf development in normal (+/+), entire (e/e) and lanceolated (La/+) plants of tomato, *Lycopersicon esculentum* Mill. «Ailsa craig». *Botanical Gazette* 145, 66-77.
- Djevic, M., & Dimitrijevic, A. (2004). Greenhouse energy consumption and energy efficiency. *Balkan Agric Eng Rev* 2004;5:1–9.
- Druma, M. A. (1998). Dynamic climate model of a greenhouse. *The United Nations University, Vol. 3*.

- Fargo, W. S., Bonjour, E. L., & Wagner, T. L. (1986). An estimation equation for squash leaf area using leaf measurements. *Can. J. Plant Sci.* 66, 677-682.
- Ghosal, M. K., & Tiwari, G. N. (2004). Mathematical modeling for greenhouse heating by using thermal curtain and geothermal energy. *Elsevier, Vol. 76*.
- Goenaga, R., & Singh, U. (1996). Estimation of leaf area of taro (*Colocasia esculenta* Schott.) from linear measurements. *J. Agric. University Puerto Rico* 80 (3), 183-185.
- Gupta, M. J., & Chandra, P. (2002). Effect of greenhouse design parameters on conservation of energy for greenhouse environmental control. 27:777–94.
- Hernández, J., Escobar, I., & Castilla, N. (2001). La radiación solar en invernaderos mediterráneos. *Caja Rural de Granada*.
- Iga, J. L., García, E. A., & Fuentes, H. R. (2005). MODELING AND VALIDATION OF A GREENHOUSE CLIMATE MODEL. *IFAC Proceedings Volumes*, 38(1), 173-178. doi: <http://dx.doi.org/10.3182/20050703-6-CZ-1902.02200>
- Iglesias, N. (2015). Tomate en invernadero estudios referidos a aspectos de ecofisiología de la producción forzada para las condiciones del Norte de la Patagonia: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (Argentina).
- Jackson, J. E. (1980). Light interception and utilization by orchard systems. *Horticultural Review* 2, 208-267.
- Jarvis, P. G. (1976). The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Phil. Trans. Roy. Soc. London, B*, 273:593-610.

- Jatimlinsky, J. R., & Gimenez, D. O. (1993). Un método para estimar el área foliar en Cebadilla Criolla. XX Reunión Argentina de Fisiología Vegetal. S.C. de Bariloche. pp. 142-145.
- Khaddar, V. K., Ray, N., Gupta, R. K., & Shrivastava, M. K. (1984). Effect of salt concentrations and moisture regimes on physiological characteristics of tomato plants. *Z. Acker und Pflanzenbau* 153, 1-13.
- Kindelan, M. (1980). Dynamic modeling of greenhouse environment. *Transactions of the ASAE*, 23(5), 1232-1239.
- Kucharik, C. J., Norman, J. M., & Grower, S. T. (1998). Measurement of branch area and adjusting leaf area index indirect measurement. *Agric. Forest Meteorol.* 91(1-2), 69-88.
- Kvet, J., & Marshall J.K.. (1971). Assessment of leaf area and other assimilating plant surfaces. In: *Plant Photosynthetic Production: Manual of Methods*. Z. Sestak, J. Catsky and P.G. Jarvis eds. The Hague. Junk. pp. 517-574.
- Lafont, F., & Balmat, J. F. (2002). Optimized fuzzy control of a greenhouse. *Fuzzy Sets Syst.* 128, 47–59.
- Ljung, L., & Glad, T. (1994). Modeling of dynamic systems. Prentice-Hall. *Englewood Cliffs, NJ.*, 361.
- Luo, W., de Zwart, H. F., Dail, J., Wang, X., Stanghellini, C., & Bu, C. (2005). Simulation of greenhouse management in the subtropics, Part I: Model validation and scenario study for the winter season. *Biosystems engineering*, 90(3), 307-318.

- Mandal, K. G., Saha, K. P., Ghosh, P. K., & Hati, K. M. (2002). Bioenergy and economic analysis of soybeanbased crop production systems in central India. Bandyopadhyay KK. *Biom. Bioenergy*. 23(5):337-45.
- Martínez, D.-L. V., Molina, F. D., & Álvarez, A. J. (2008). *Ahorro y eficiencia energética en invernaderos*: IDAE.
- Melgarejo, L. M. (2010). Experimentos en Fisiología Vegetal. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Monteith, J. L. (1994). Validity of the correlation between intercepted radiation and biomass. *Agricultural and Forest Meteorology* 68:213-220.
- Mudahar, M. S., & Hignett, T. P. (1987). Energy requirements, technology and resources in fertilizer sector, . *Energy in Plant Nutrition and Pest Control*. *Energy in World Agriculture*, Vol. 2, ed. Helsel, Z. R., pp. 25-61.
- Ortiz, C. J., & Hernanz, J. L. (2000). Energy Analysis and Saving, In CIGR Handbook of Agricultural Engineering, Volume V, Energy and Biomass Engineering.
- Ozkan, B. C., R. F. and Kizilay, H. . (2011). Comparison of energy inputs in glasshouse double crop (fall and summer crops) tomato production. Science Direct.
- Pahlavan, R., Omid, M., & Akram, A. (2011). Energy use efficiency in greenhouse tomato production in Iran. *Energy*, 36(12), 6714-6719.
- Payne, W. A., Wendt, C. W., Hossner, L. R., & GATES C.E. (1991). Estimating Pearl Millet Area and Specific Leaf Area. *Agron. J.* 83, 937-941.

- Ponce, C. P. (2012). Ahorra energía en tu invernadero.
<http://www.hortalizas.com/horticulturaprotegida/invernadero/ahorra-energia-en-tu-invernadero/>. Consultado en enero del 2016.
- Rabbinge, R., Ward, S.A., Laar, v., & (editors)., H. H. (1989). Simulation and systems management in crop protection. *PUDOC, Wageningen*, 420.
- Reza, P., Mahmoud, O., & Asadollah, A. (2011). Energy use efficiency in greenhouse tomato production in Iran. *ELSEVIER*. doi: 10.1016/j.energy.2011.10.038
- Rezvani, M. P., Feizi, H., & Mondani, F. (2011). Evaluation of tomato production systems in terms of energy use efficiency and economical analysis in Iran. ISSN: 2067-3205. *Not Sci. Biol.* 3(4):58-65.
- Rodríguez, F., Berenguel, M., Guzmán, J. L., & Ramírez-Arias, A. (2015). *Modeling and Control of Greenhouse Crop Growth*: Springer.
- Ruiz, G. A. (2009). Modelos para simulación y control del clima de un invernadero con ventilación natural. Tesis de maestría. Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Salgado, P., & Boaventura, C. J. (2005). Greenhouse climate hierarchical fuzzy modelling. *Control Eng. Pract.* 13, 613-628.
- Saltelli, A., K. Chan, y E. M. Scott. Eds. (2000). Sensitivity Analysis. John Wiley & Sons Ltd. Chichester.
- Seginer, I., Shina, G., Albright, L. D., & Marsh, L. S. (1991). Optimal temperature setpoints for greenhouse lettuce. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 49, 209-226.

- Sepat, N. K., Sepat, S. R., Sepat, S., & Kumar, A. (2013). Energy use efficiency and cost analysis of tomato under greenhouse and open field production system at Nubra valley of Jammu and Kashmir. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCES* Volume 3, No 4, 2013. ISSN 0976 – 4402.
- Shaykewich, C. F., & Warkentin. B.P. (1970). Effects of caly content and aggregate size on availability of soil water to tomato plants. *Can. J. Soil Sci.* 50, 205-217.
- Singh, G., Singh, P. P., Lubana, P. P. S., & Singh, K. (2006). Formulation and validation of a mathematical model of the microclimate of a greenhouse. *Renewable Energy*, 31(10), 1541-1560.
- Sissom, L. E., & Pitts, D. R. (1972). *Elements of Transport Phenomena*. First edition. McGraw-Hill. New York. 814 p.
- Speetjens, S. L., Stigter, G., & Van Ctraten, G. (2010). Physics-based model for a water-saving greenhouse. *ELSEVER* Pags 1-11. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2009.06.026
- Stanghellini, C., & de Jong, T. (1995). A model of humidity and its applications in a greenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology*, 76(2), 129-148.
- Straten, G. (2012). *Systems dynamics for bio-engineers. Lectures Notes. University of Chapingo, Chapingo, Mexico*, 146.
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2006). *Fisiología vegetal.*, vol. 1, Castelló de la Plana: publicacions de la universitat Jaume I.
- Takakura, T. (2000). *Climate under cover: digital dynamic simulation in plant bio-engineering/by Tadashi Takakura*.

- Tap, F. (2000). Economics-based optimal control of greenhouse tomato crop production. Ph.D. Thesis, Agricultural University, Wageningen, The Netherlands.
- Thornley, J. H. M., & France, J. (2007). Mathematical models in agriculture. *CABI*.
- Troiani, M., & Mirasson, E. (1996). Comparación de dos métodos para estimar el área foliar en Amaranto. XXI Reunión Argentina de Fisiología Vegetal Actas. Mendoza, Argentina. pp 138-139.
- Van Beveren, P., Bontsema, J., Van Straten, G., & Van Henten, E. (2015). Optimal control of greenhouse climate using minimal energy and grower defined bounds. *Applied energy*, 159, 509-519.
- Van Henten, E. (1994). *Greenhouse climate management: an optimal control approach*: Van Henten.
- Van Henten, E., & Bontsema, J. (2009). Time-scale decomposition of an optimal control problem in greenhouse climate management. *Control Engineering Practice*, 17(1), 88-96.
- Van Ooteghem, R. J. (2010). Optimal control design for a solar greenhouse. *IFAC Proceedings Volumes*, 43(26), 304-309.
- Vanthoor, B. H. (2011). *A model-based greenhouse design method*.
- Walker, J. (1965). Predicting temperatures in ventilated greenhouses. *Transactions of the ASAE*, 8(3), 445-0448.
- Walker, J., Peterson, W., Duncan, G., & Anastasi, D. (1976). Temperature and humidity in a greenhouse ventilated with coal mine air. *Transactions of the ASAE*, 19(2), 311-0317.

- Wallach, D., Makowski, D., Jones, J. W., & Brun, F. (2013). *Working with Dynamic Crop Models: Methods, Tools and Examples for Agriculture and Environment*: Academic Press.
- Watanabe, J., Pool, R. M., & Watabe, K. N. (1997.). The evaluation of an optical method to estimate the leaf area of grapevines. *J. Jap. Soc. Hort. Sc.* 66 (2), 235-244.
- Welles, J. M., & Norman, J. M. (1991). Instrumental for indirect measurement of canopy architecture. *Agron. J.* 83, 818-825.
- Zabelic, V. C. (1989). Energy Savings in Protected Cultivation, *Acta Horticulturae*, 245. *Energy substitution*.
- Zabeltitz, C. V. (1998). Greenhouse structures. En G. Stanhill y H. Z. Enoch (eds.), *Ecosystems of the World*, 20: greenhouse ecosystems. *Amsterdam: Elsevier: pp. 17-69*.
- Zwart, H. F. d. (1996). Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using a simulation model. *PhD. Thesis Wageningen University. ISBN 90-5485-533-9. NUGI 849*.

Apéndice

Apéndice A. NOTACIÓN

Cuadro 14 Parámetros del modelo de balance de energía

SIMBOLO	DESCRIPCION	UNIDADES EN SI	VALOR
V	Volumen del invernadero	m ³	1943.00
C _p	Calor específico del aire	J kg ⁻¹ °C ⁻¹	1000.00
A	Aire del invernadero	m ²	120.00
A _{cub}	Área de la cubierta	m ²	120.00
ρ	Densidad del aire	kg m ⁻³	1.23
h	Altura del invernadero	m	4.00
λ	Calor latente de vaporización	KJ kg ⁻¹	2450.00
ε	La relación del calor latente sensible	m	0.60
	Parámetro de transpiración específica del		
k	cultivo	m	0.40
L ₁	Longitud de la ventana	m	3.20
L ₂	Ancho de la ventana	m	0.80
g	Aceleración de la gravedad	m s ⁻¹	9.81
L _{win lsd}	Longitud de la apertura de la ventana	m	3.20
Y _{rad}	Angulo de inclinación del techo	rad	0.80
θ _{max}	Angulo de apertura	°	-
N _{vent}	Numero de ventanas		3.00
	Profundidad a la que se estima la		
p	temperatura del suelo	m ²	0.05
A _{vent}	Área de ventilación	m ²	171.00
T _{sv}	Tasa de ventilación		0.25
K _{po}	Coeficiente de transferencia de masa	m s ⁻¹	5e ⁻³
P _{atm}	Presión atmosférica	m s ⁻²	98.1

Cuadro 15 Variables del balance de energía

SIMBOLO	DESCRIPCION	UNIDADES
T_a	Temperatura interior	$^{\circ}\text{C}$
T_c	Temperatura de la cubierta	$^{\circ}\text{C}$
T_s	Temperatura del suelo	$^{\circ}\text{C}$
T_e	Temperatura exterior	$^{\circ}\text{C}$
HR_{in}	Humedad relativa interna	%
V_{in}	Velocidad inicial del viento	ms^{-1}
χ_{cul}	Concentración de vapor de agua absoluto en el cultivo	g m^{-3}
	Concentración de vapor de agua en el invernadero	g m^{-3}
LAI	Índice de área foliar	$\text{Cm}^2 \text{ cm}^{-2}$
R_n	Radiación neta	W m^{-2}
$\chi_{a \text{ sat}}$	Concentración de vapor saturado	g m^{-1}
I_{rad}	Radiación solar externa	W m^{-2}
G_E	Conductancia de la transpiración	m s^{-1}
ϕ_{cond}	Flujo de condensación	Kg s^{-1}
χ	Contenido de humedad	Kg kg^{-1}
χ_{sat}	Contenido de humedad saturado	
T_{tot}	Coeficiente de transmisión total de la cubierta	$\text{m }^{\circ}\text{C m}^2$
	Coeficiente de transferencia de calor de la cubierta	-
α_c		
r_b	Resistencia aerodinámica	s m^{-1}
r_s	Resistencia estomática	s m^{-1}
T_s	Tasa de ventilación	-

Cuadro 16 Salidas del modelo de balance de energía.

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	UNIDADES
Qsol	Ganancia de calor por radiación solar	W m ⁻² s ⁻¹
Qcub	Pérdida de calor por la cubierta	W m ⁻²
Qtrans	Pérdida de calor por la transpiración del cultivo	W m ⁻² s ⁻¹
Qsuelo	Pérdida de calor por el suelo	W m ⁻²
Qcond	Pérdida de calor por la condensación	W m ⁻² s ⁻¹
Qven	Pérdida de calor por ventilación	W m ⁻²

Cuadro 17 Parámetros para el análisis de sensibilidad

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	UNIDADES	VALOR
τ_{tot}	Coeficiente de transmisión total de la cubierta	m °C m ²	1.0
α_c	Coeficiente de transferencia de calor de la cubierta	-	0.7
r_b	Resistencia aerodinámica	s m ⁻¹	150.0
k_s	Coeficiente de intercambio térmico a través del suelo	W m ⁻² °C	1.5
k	Parámetro de transpiración específica del cultivo	-	0.4
v	Volumen del invernadero	m ³	1943.0
c_p	Calor específico del aire	J kg ⁻¹ °C ⁻¹	1000.0
ρ	Densidad del aire	kg m ⁻³	1.225

Apéndice B. IMPLEMENTACION DEL MODELO DINÁMICO DE BALANCE DE ENERGÍA

El modelo de balance de energía se implementó en el software Matlab donde se generó el programa principal para después llamar una subrutina en C++.

Apéndice B.1 PROGRAMA PRINCIPAL DE MODELO DINÁMICO DE BALANCE DE ENERGIA EN MATLAB

```
% MODELO: SIMULACIÓN DE LA TEMPERATURA
% Programa elaborado por el Dr. Irineo López Cruz y Dra. Raquel Salazar
Moreno
% adaptado por Ana Cristina Sánchez Martínez
% Tesis de Maestría Ana Cristina Sánchez Martínez
% Posgrado IAUIA, Universidad Autónoma Chapingo
% Chapingo México, octubre de 2017.
global Parametros
global UT Tin
variables12= xlsread('conventsinneb.xlsx',1,'A3:R10431');
TiempoSim=variables12(:,2);
Tin=variables12(:,6);    % Temperatura interna [° C]
Radin=variables12(:,4);  % Radiación interna [° W m-2]
Tsoil=variables12(:,9);  % Temperatura del suelo [° C]
Tcover=variables12(:,11); % Temperatura de la cubierta [° C]
Tout=variables12(:,12);  % Temperatura externa [° C]
WindVel=variables12(:,14); % Velocidad del viento [m s-1]
Hin=variables12(:,7);    % Humedad relativa interna [%]
T=[0:60:10428*60]';
myopts = simset('solver','ode45','reltol',1e-8,'abstol',1e-10);
myopts = simset('solver','ode23s','reltol',1e-8,'abstol',1e-10);
UT=[T Radin Tsoil Tcover Tout WindVel Hin];
T0=Tin(1,1);
ASOIL=120; % Área del suelo
EPSIINV=0.6; % Relación del calor latente sensible
RHOAIRE=1.225; % Densidad del aire
CPAIRE=1000; % Calor especifico del aire
AREACUB=120; % Área de la cubierta
PATM=98.1; % Presión atmosférica
LAI=2.2; % Índice de Área Foliar
```

```

CCAP=20000; % Capacidad calorífica del invernadero.
rb=150; % Resistencia aerodinámica
H=4; % Altura del invernadero
NWINDOWS=3; % Número de ventanas
AREAFLOOR=120; % Área foliar.
% VOLINV=6.32 VOLUMEN ENTRE AREA
VOLINV=10000; % Volumen del invernadero
EXCHAREA=120; % Área del invernadero
GAMMA=0.4; % Parámetro de transpiración del cultivo
PROF=0.5; % Profundidad a la que se estima la temperatura del suelo
TasaVentilacion0=0.25; % Tasa de ventilación
Tau_rad=1.0; % Coeficiente de transferencia
Kpo=5e-3; % Coeficiente de transferencia de masa
PAtm=98.1; % presión atmosférica
k_s=1.5; % Coeficiente de intercambio a través del suelo
Alfa_c= 0.7; % coeficiente de transferencia a través de la cubierta
Cw=3.2; % Largo de la vetana
Cd=0.8; % Ancho de la ventana
AreaVentilacion=171; % Área de ventilación
Parametros=[T0 ASOIL RHOAIRE CPAIRE AREACUB rb LAI GAMMA PROF
TasaVentilacion0 VOLINV Tau_rad Kpo PAtm k_s Alfa_c Cd Cw
AreaVentilacion];
Tsim=UT(:,1);

[t,x,y]= sim('modsimi',UT(:,1),myopts,UT);
t1=t/(360*24);

figure(1);
subplot(4,1,1);
plot(t1,UT(:,2));
xlabel('Tiempo [d]');
ylabel('Rad. [W m^2]');
subplot(4,1,2);
plot(t1,UT(:,3));
xlabel('Tiempo [d]');
ylabel('Tsoil. [°C]');
subplot(4,1,3);
plot(t1,UT(:,4));
xlabel('Tiempo [d]');
ylabel('Tcover. [m s^(-1)]');
subplot(4,1,4);

```

```

plot(t1,UT(:,5));
xlabel('Tiempo [d]');
ylabel('Tout. [W m^2]');

```

```

figure(2);
subplot(2,1,1);
plot(t1,UT(:,6));
xlabel('Tiempo [d]');
ylabel('windvel. [°C]');
subplot(2,1,2);
plot(t1,UT(:,7));
xlabel('Tiempo [d]');
ylabel('RH [%]');

```

```

title('Variables de entrada medidas');
figure(3);
plot(t1,x(:,1),t1,Tin,':');
legend('simulado','observado');
xlabel('Tiempo [d]')
ylabel('Temperatura [°C]');

```

```

disp('Statistics after calibration: ');
MSET=sum((x(:,1)-Tin).^2)/numel(Tin)
RMSET=sqrt(MSET)
MAET=sum(abs((x(:,1)-Tin)))/numel(Tin)

```

```

ymedT=mean(Tin);
ymedestT=mean(x(:,1));
EFT=1-(sum(x(:,1)-Tin).^2)/(sum((Tin-ymedT).^2))

```

Apéndice B.2 SUBROUTINA EN C

```
#define S_FUNCTION_LEVEL 2
#define S_FUNCTION_NAME modbali
#include "simstruc.h"
#include <math.h>

void CropTranspiration(double , double ,double, double, double ,double, double,
double, double *);
double Psat(double );
double rh2xabs(double , double );
double xSat(double , double );

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

/*Used to read the parameter number 1*/

#define T0          p[0]
#define ASOIL       p[1]
#define RHOAIRE     p[2]
#define CPAIRE      p[3]
#define AREACUB     p[4]
#define rb          p[5]
#define LAI         p[6]
#define GAMMA       p[7]
#define PROF        p[8]
#define TasaVentilacion0 p[9]
#define VOLINV      p[10]
#define Tau_rad     p[11]
#define Kpo         p[12]
#define PAtm        p[13]
#define Ks          p[14]
#define Alpha_c     p[15]
#define Cd          p[16]
#define Cw          p[17]
#define AREAVent    p[18]

static void mdlInitializeSizes(SimStruct *S)
{
    ssSetNumSFcnParams(S, 1);
```

```

    if (ssGetNumSFcnParams(S) != ssGetSFcnParamsCount(S)) {
        return;
    }

    ssSetNumContStates(S, 1);
    ssSetNumDiscStates(S, 0);

    if (!ssSetNumInputPorts(S, 1)) return;
    /*Entradas del modelo*/
    ssSetInputPortWidth(S, 0, 6);

    ssSetInputPortDirectFeedThrough(S, 0, 1);

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

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

    ssSetOptions(S, 0);
}
static void mdlInitializeSampleTimes(SimStruct *S)
{
    ssSetSampleTime(S, 0, CONTINUOUS_SAMPLE_TIME);
    ssSetOffsetTime(S, 0, 0.0);
}

#define MDL_INITIALIZE_CONDITIONS
#ifdef MDL_INITIALIZE_CONDITIONS

static void mdlInitializeConditions(SimStruct *S)
{
    real_T *x0=ssGetContStates(S);
    double *p=mxGetPr(ssGetSFcnParam(S,0));

    x0[0]=T0;

```

```

    }
#endif
#define MDL_START
#if defined(MDL_START)

    static void mdlStart(SimStruct *S)
    {
    }
#endif /* MDL_START */

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];
}

#define MDL_UPDATE
#if defined(MDL_UPDATE)

    static void mdlUpdate(SimStruct *S, int_T tid)
    {
    }
#endif /* MDL_UPDATE */

#define MDL_DERIVATIVES
#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 Qs, Qcub, Qtrans, Qvent, Qsoil, Qcond;
double Irrad,To,Tsoil,Tcover,Wveli,HRin;
double TasaVentilacion, Lambda;
double Tair,Hair,PhiCond, Jip, JiSat;

Tair=x[0];
Irrad=u(0);
Tsoil=u(1);
Tcover=u(2);
To=u(3);
Wveli=u(4);
HRin=u(5);

Lambda=3.1468-0.002365*(Tair+273.15)*pow(10.0,6.0);
TasaVentilacion=(AREAVent/2.0)*Cd*sqrt(Cw)*Wveli+TasaVentilacion0;
// energ solar
Qs=Tau_rad*u(0);
// energ suelo
Qsoil=(Ks*ASOIL*(Tair-Tsoil))/PROF;

// energ cubierta
Qcub=Alpha_c*(AREACUB/ASOIL)*(Tair-To);

Hair=rh2xabs(Tair,HRin);
// Energ flux due to the crop transpiration
CropTranspiration(Irrad,Tau_rad,rb,LAI,Tair, Hair,Lambda,GAMMA,&Qtrans);

// Energy flux due to ventilation
Qvent=TasaVentilacion*RHOAIRE*CPAIRE*(Tair-To);

// Energy fluz due to condensation

JiSat=xSat(Tcover, PAtm);
Jip=(0.611*HRin*Psat(Tair))/(100.0*PAtm);
if (JiSat > Jip)
    PhiCond=Kpo*RHOAIRE*AREACUB*(Jip-JiSat);

```

```

else
    PhiCond=0.0;

Qcond=Lambda*PhiCond;

dx[0]=(1.0/(RHOAIRE*CPAIRE*VOLINV))*(Qs-Qcub-Qsoil-Qvent-
Qtrans+Qcond);

}
#endif /* MDL_DERIVATIVES */

void CropTranspiration(double SolRad,double TauRad,double RBPARG,double
LAICROP,double Tin, double Hin,double LatHeat,double Gamma,
double *LE)
{
    double E,Ge,h_crop, h_sat_a,epsi,rs,Rn;
    double Qsol;

    Qsol=TauRad*SolRad;
    epsi=0.7584*exp(0.0518*Tin);
    Rn=0.86*(1.0-exp(-0.7*LAICROP))*Qsol;
    rs=(82.0+((570.0)*(exp(-Gamma*Rn/(LAICROP)))))*(1.0+0.023*pow((Tin-
20.0),2.0));
    Ge=(2.0*LAICROP)/((1.0+epsi)*RBPARG+rs);
    h_sat_a=5.5638*exp(0.0572*Tin);
    h_crop=h_sat_a+epsi*(RBPARG/(2.0*LAICROP))*(Rn/LatHeat);
    E=Ge*(h_crop-Hin);
    *LE=LatHeat*E; // Energy Flux due to crop transpiration Wm-2
}

static void mdlTerminate(SimStruct *S)
{
}

double xSat(double Ta, double Patm)
{
    double Aux;
    Aux=0.611*Psat(Ta)/Patm;
    return (Aux);
}

```

```

}

double Psat(double x)
{
    double y;
    y=0.61064*pow((1.0+1.4142136*sin(0.0058177*x)),8.827);
    return (y);
}

double rh2xabs(double temp, double rh)
{
    double h_sat,xabs;
    h_sat=5.5638*exp(0.0572*temp);
    xabs=h_sat*(rh/100.0);
    return (xabs);
}

#ifdef MATLAB_MEX_FILE
#include "simulink.c"
#else
#include "cg_sfun.h"
#endif

```

Apéndice C. ECUACIONES DE SENSIBILIDAD

Estructura del modelo

Ganancia de energía debido a la radiación solar ($Wm^{-2}s^{-1}$):

$$Q_{sol} = \tau_{tot} I_{rad} = f_1$$

Pérdida de calor debido a la cubierta (Wm^{-2}):

$$Q_{cub} = \alpha_c \left(\frac{A_c}{A_s} \right) (T_a - T_e)$$

Pérdida de calor debido a la condensación del techo (Wm^{-2}):

$$Q_{cond} = \lambda \phi_{cond}$$

Pérdida de calor por la transpiración ($Wm^{-2}s^{-1}$):

$$Q_{trans} = G_E \lambda (\chi_{cul} - \chi_a)$$

Pérdida de calor debido a la ventilación (Wm^{-2}):

$$Q_{vent} = Ts * \rho * C_{p,aire} * (T_a - T_e)$$

Pérdida de calor por conducción a través del suelo (W):

$$Q_{suelo} = \frac{k_s S_c (T_a - T_s)}{p}$$

Ecuaciones de los procesos

$$C_{cap} = \frac{V \rho C_p}{A}$$

$$G_E = \frac{2LAI}{(1+\varepsilon)r_b + r_s}$$

$$\lambda = 3.1468 - 0.002365(T_a + 273) \times 10^6$$

$$\chi_{cultivo} = \chi_a^* + \varepsilon \frac{r_b}{2LAI} \frac{R_n}{\lambda}$$

$$\chi_a^* = 5.563e^{0.0572T_a}$$

$$\varepsilon = 0.7584e^{0.0518T_a}$$

$$r_b = \frac{1174d^{0.5}}{(d|T_c - T_a| + 207\varphi_{vent}^2)^{0.25}}$$

$$r_s = \left(82 + 570e^{\frac{-kR_n}{LAI}}\right)(1 + 0.023(T_a - 20)^2)$$

$$R_n = 0.86(1 - \exp(-0.7LAI))Q_{sol}$$

$$T_s = \left(\frac{A_{vent}}{2}\right)(Cd)\sqrt{C_w} * v_{in} + Ts_v$$

$$\varphi_{cond} = k_{po} * \rho_{air} * A_{cub} * (\chi - \chi_{sat})$$

$$\chi_{sat}(T_{cub}) = 0.61(1 + 1.414 \sin(5.82e^{-3}T_{cub}))^{8.827}$$

$$\chi = \frac{H_i * 0.611P_{sat}(T_a)}{100P_{atm}}$$

Análisis de sensibilidad

Parámetros: coeficientes de transmisión total de la cubierta (τ_{tot}), coeficiente de transferencia de calor de la cubierta (α_c), resistencia aerodinámica (r_b), coeficiente de intercambio térmico a través del suelo (k_s), capacidad de calor del invernadero (C_{cap}), resistencia estomática (r_s), y parámetro de transpiración específica del cultivo (k).

Calculo de la derivada de la función de estado con respecto a la temperatura

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial T_a} \left[\frac{1}{C_{cap}} (Q_{sol} - Q_{cub} - Q_{trans} - Q_{vent} - Q_{suelo} - Q_{cond}) \right]$$

Derivada de la ganancia de energía debido a la radiación solar con respecto a la temperatura:

$$\frac{\partial Q_{sol}}{\partial T_a} = \frac{\partial}{\partial T_a} (I_{rad}) = 0$$

Derivada pérdida de calor debido a la cubierta con respecto a la temperatura:

$$\frac{\partial Q_{cub}}{\partial T_a} = \frac{\partial}{\partial T_a} \left(\alpha_c \left(\frac{A_c}{A_s} \right) (T_a - T_e) \right) = \alpha_c \left(\frac{A_c}{A_s} \right)$$

Derivada pérdida de calor por la transpiración con respecto a la temperatura:

$$\frac{\partial Q_{trans}}{\partial T_a} = \frac{\partial}{\partial T_a} (G_E \lambda (\chi_{cul} - \chi_a))$$

$$\frac{\partial G_E}{\partial T_a} = \frac{\partial}{\partial T_a} \left(\frac{2LAI}{(1+\varepsilon)r_b + r_s} \right) = - \frac{2LAI(0.03928512e^{0.0518T_a}r_b + 0.046(82+570e^{-\frac{kR_n}{LAI}})(T_a-20))}{((1+0.7584e^{0.0518T_a})r_b + (82+570e^{-\frac{kR_n}{LAI}})(1+0.023(T_a-20)^2))^2}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial T_a} = \frac{\partial}{\partial T_a} (0.7584e^{0.0518T_a}) = 0.03928512e^{0.0518T_a}$$

$$\frac{\partial r_b}{\partial T_a} = \frac{1174d^{0.5}}{(d|T_c - T_a| + 207\phi_{vent}^2)^{0.25}} = 0$$

$$\frac{\partial r_s}{\partial T_a} = \frac{\partial}{\partial T_a} \left[\left(82 + 570e^{\frac{-kR_n}{LAI}} \right) (1 + 0.023(T_a - 20)^2) \right] = \left(82 + 570e^{\frac{-kR_n}{LAI}} \right) (0.46)(T_a - 20)$$

$$\frac{\partial \chi_a}{\partial T_a} = \frac{\partial}{\partial T_a} (5.563e^{0.0572T_a}) = 0.3182036e^{0.0572T_a}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \chi_{cultivo}}{\partial T_a} &= \frac{\partial}{\partial T_a} \left(5.563e^{0.0572T_a} + \epsilon \frac{r_b}{2LAI} \frac{R_n}{\lambda} \right) \\ &= 0.3182036e^{0.0572T_a} + \frac{r_b}{2LAI} \frac{R_n}{\lambda} (0.03928512e^{0.0518T_a}) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial Q_{trans}}{\partial T_a} = - \frac{2LAI(0.03928512e^{0.0518T_a}r_b + 0.046(82 + 570e^{\frac{-kR_n}{LAI}})(T_a - 20))(0. + \frac{r_b R_n \epsilon}{2LAI\lambda})}{((1 + 0.7584e^{0.0518T_a})r_b + (82 + 570e^{\frac{-kR_n}{LAI}})(1 + 0.023(T_a - 20)^2))^2}$$

Derivada pérdida de calor por la ventilación con respecto a la temperatura:

$$\frac{\partial Q_{vent}}{\partial T_a} = \frac{\partial}{\partial T_a} (T_s * \rho * C_{p,aire} * (T_a - T_e)) = T_s * \rho * C_{p,aire}$$

Derivada pérdida de calor por conducción a través del suelo con respecto a la temperatura:

$$\frac{\partial Q_{suelo}}{\partial T_a} = \frac{\partial}{\partial T_a} \left[\frac{k_s S_c (T_a - T_s)}{p} \right] = \frac{k_s S_c}{p}$$

Derivada pérdida de calor debido a la condensación en el techo con respecto a la temperatura:

$$\frac{\partial Q_{cond}}{\partial T_a} = \frac{\partial}{\partial T_a} [\lambda \phi_{cond}] = \lambda \frac{\partial \phi_{cond}}{\partial T_a}$$

$$\frac{\partial \phi_{cond}}{\partial T_a} = k_{po} * \rho_{air} * A_{cub} * \frac{\partial \chi}{\partial T_a}$$

$$\frac{\partial \chi}{\partial T_a} = \frac{H_i * 0.611}{100 P_{atm}} * \frac{\partial P_{sat}(T_a)}{\partial T_a}$$

$$\frac{\partial P_{sat}(T_a)}{\partial T_a} = 0.61(1 + 1.414 \sin(5.82e^{-3}T_a))^{8.827}$$

$$= 0.044347 * \cos(0.0058177 * T_a) * (1 + (1.41421) * (\sin(0.0058177 * T_a)))^{7.827}$$

Sensibilidad para el coeficiente de intercambio térmico a través del suelo

(k_s)

$$\frac{\partial Q_{suelo}}{\partial k_s} = \frac{\partial}{\partial k_s} \left(\frac{k_s S_c (T_a - T_s)}{p} \right) = \frac{S_c (T_a - T_s)}{p}$$

Sensibilidad a la resistencia aerodinámica (r_b)

$$\frac{\partial Q_{trans}}{\partial r_b} = G_E \lambda (\chi_{cul} - \chi_a) = \lambda * (G_E * \frac{\partial \chi_{cultivo}}{\partial r_b} + \chi_{cul} \frac{\partial G_E}{\partial r_b})$$

$$\frac{\partial G_E}{\partial r_b} = \frac{\partial}{\partial r_b} \left(\frac{2LAI}{(1 + \epsilon)r_b + r_s} \right) = - \frac{2LAI\epsilon}{((1 + \epsilon)r_b + r_s)^2}$$

$$\frac{\partial \chi_{cultivo}}{\partial r_b} = \frac{\partial}{\partial r_b} \left(\chi_{a sat} + \epsilon \frac{r_b}{2LAI} \frac{R_n}{\lambda} \right) = \frac{\epsilon}{2LAI} \frac{R_n}{\lambda}$$

Sensibilidad al coeficiente de transferencia (α_c)

$$\frac{\partial Q_{cub}}{\partial \alpha_c} = \frac{\partial}{\partial \alpha_c} \left(\alpha_c \left(\frac{A_c}{A_s} \right) (T_a - T_e) \right) = \left(\frac{A_c}{A_s} \right) (T_a - T_e)$$

Sensibilidad al coeficiente de transmisión total de la cubierta (τ_{tot})

$$\frac{\partial Q_{sol}}{\partial \tau_{tot}} = \frac{\partial}{\partial \tau_{tot}} (\tau_{tot} I_{rad}) = I_{rad}$$

Sensibilidad al Parámetro de transpiración específica del cultivo (k)

$$\frac{\partial Q_{trans}}{\partial r_b} = G_E \lambda (\chi_{cul} - \chi_a) = \lambda (\chi_{cul} - \chi_a) \frac{\partial G_E}{\partial r_b}$$

$$\frac{\partial G_E}{\partial r_b} = \frac{2LAI}{(1+\varepsilon)r_b + r_s} = \frac{2LAI}{((1+\varepsilon)r_b + r_s)^2} * \frac{\partial r_s}{\partial k}$$

$$\frac{\partial r_s}{\partial k} = \frac{\partial}{\partial k} \left[\left(82 + 570 e^{\frac{-kR_n}{LAI}} \right) (1 + 0.023(T_a - 20)^2) \right] = \frac{-570 e^{\frac{-kR_n}{LAI}} R_n (1 + 0.023(T_a - 20)^2)}{LAI}$$

Sensibilidad con respecto al volumen del invernadero (V)

$$\frac{\partial f}{\partial v} = \frac{\partial}{\partial v} \left(\frac{1}{C_{cap}} (Q_{sol} - Q_{cub} - Q_{trans} - Q_{vent} - Q_{suelo} + Q_{cond}) \right)$$

$$= -\frac{1}{V^2 \rho C_p} (Q_{sol} - Q_{cub} - Q_{trans} - Q_{vent} - Q_{suelo} + Q_{cond})$$

Apéndice D. IMPLEMENTACION DEL PROGRAMA PARA LA CALIBRACIÓN EN MATLAB

```
% MODELO: SIMULACIÓN DE LA TEMPERATURA
% Programa elaborado por el Dr. Irineo López Cruz y Dra. Raquel Salazar
Moreno
% adaptado por Ana Cristina Sánchez Martínez
% Tesis de Maestría Ana Cristina Sánchez Martínez
% Posgrado IAUIA, Universidad Autónoma Chapingo
% Chapingo México, octubre de 2017.
```

```
global UT x10 T Tin Parametros
global rb GAMMA Tau_rad k_s Alfa_c VOLINV
warning('off')
```

```
variables12= xlsread('conventsinneb.xlsx',1,'A3:R10431');
```

```
Tin=variables12(:,6);    % Temperatura interna [° C]
Radin=variables12(:,4);  % Radiación interna [° W m-2]
Tsoil=variables12(:,9);  % Temperatura del suelo [° C]
Tcover=variables12(:,11); % Temperatura de la cubierta [° C]
Tout=variables12(:,12);  % Temperatura externa [° C]
WindVel=variables12(:,14); % Velocidad del viento [m s-1]
Hin=variables12(:,7);    % Humedad relativa interna [%]
```

```
T=[0:60:10428*60]';
```

```
T0=Tin(1,1);
```

```
ASOIL=120; % Área del suelo
EPSIINV=0.6; % Relación del calor latente sensible
RHOAIRE=1.225; % Densidad del aire
CPAIRE=1000; % Calor específico del aire
AREACUB=120; % Área de la cubierta
PATM=98.1; % Presión atmosférica
LAI=2.2; % Índice de Área Foliar
CCAP=20000; % Capacidad calorífica del invernadero.
rb=150; % Resistencia aerodinámica
H=4; % Altura del invernadero
NWINDOWS=3; % Número de ventanas
```

```

AREAFLOOR=120; % Área foliar.
% VOLINV=6.32 VOLUMEN ENTRE AREA
VOLINV=10000; % Volumen del invernadero
EXCHAREA=120; % Área del invernadero
GAMMA=0.4; % Parámetro de transpiración del cultivo
PROF=0.5; % Profundidad a la que se estima la temperatura del suelo
TasaVentilacion0=0.25; % Tasa de ventilación
Tau_rad=1.0; % Coeficiente de transferencia
Kpo=5e-3; % Coeficiente de transferencia de masa
PAtm=98.1; % presión atmosférica
k_s=1.5; % Coeficiente de intercambio a través del suelo
Alfa_c= 0.7; % coeficiente de transferencia a través de la cubierta
Cw=3.2; % Largo de la ventana
Cd=0.8; % Ancho de la ventana
AreaVentilacion=171; % Área de ventilación
x10=Tin(1);
%x20=X_abs_in(1);

Parametros=[T0 ASOIL RHOAIRE CPAIRE AREACUB rb LAI GAMMA PROF
TasaVentilacion0 VOLINV Tau_rad Kpo PAtm k_s Alfa_c Cd Cw
AreaVentilacion];

UT=[T          Radin          Tsoil          Tcover          Tout          WindVel
Hin];%Opciones=simset('solver','ode45','reltol',1e-10,'abstol',1e-12);

Opciones=simset('solver','ode45','reltol',1e-10,'abstol',1e-12);

[t,x,y]=sim('cmodsimi',T, Opciones, UT);

fname='Evaluacion2';
options=optimset('MaxIter',200,'Display','Iter','MaxFunEvals',800);

Params=[rb GAMMA Tau_rad k_s Alfa_c VOLINV];

xmin=[67.5 0.18 0.45 0.675 0.315 4500]';
xmax=[232.5 0.62 1.55 2.325 1.085 15500]';
[X,RESNORM,RESIDUAL,EXITFLAG,OUTPUT,LAMBDA1,JACOBIAN]=lsqnonli
n(fname,Params,xmin,xmax,options);

rb=X(1);
GAMMA=X(2);

```

```

Tau_rad=X(3);
k_s=X(4);
Alfa_c=X(5);
VOLINV=X(6);

Opciones=simset('solver','ode45','reitol',1e-10,'abstol',1e-12);

Parametros=[T0 ASOIL RHOAIRE CPAIRE AREACUB rb LAI GAMMA PROF
TasaVentilacion0 VOLINV Tau_rad Kpo PAtm k_s Alfa_c Cd Cw
AreaVentilacion];

[t,x,y]=sim('cmodsimi',T, Opciones,UT);

%figure(after calibration);
figure(1)
subplot(1,1,1);
plot(t/(5*12*24),x(:,1),t/(5*12*24),Tin,':');
title('States model');
legend('simulated', 'real');
xlabel('time');
ylabel('Temperature [°C]');

disp('Statistics after calibration: ');
MSET=sum((x(:,1)-Tin).^2)/numel(Tin)
RMSET=sqrt(MSET)
MAET=sum(abs((x(:,1)-Tin)))/numel(Tin)

ymedT=mean(Tin);
ymedestT=mean(x(:,1));
EFT=1-(sum(x(:,1)-Tin).^2)/(sum((Tin-ymedT).^2))

% Relative statistics
varmedT=sqrt((1/numel(Tin)-1)*((Tin-ymedT)*(Tin-ymedT)));
varestT=sqrt((1/numel(x(:,1))-1)*((x(:,1)-ymedestT)*(x(:,1)-ymedestT)));
covmedestT=(1/numel(Tin)-1)*((x(:,1)-ymedT)*(Tin-ymedestT));
coefcorrT=covmedestT/(varmedT*varestT)
RMAET=MAET/((1/numel(Tin))*sum(abs(Tin)))

```