

01126
56

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERIA



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



**APLICACIÓN DEL MÉTODO DE PARÁMETROS
CONCENTRADOS AL ESTUDIO DE UN INVERNADERO
SEMICILÍNDRICO CON CALENTAMIENTO MEDIANTE EL
USO DE LA DIGESTIÓN TERMOFÍLICA**

TESIS PROFESIONAL

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

P R E S E N T A :
JUAN CÉSAR VALDÉS ABAROA

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. FEDERICO MÉNDEZ LAVIELLE**

**MÉXICO, D. F.
OCTUBRE DE 2003**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Agradezco a:

Mi Señor Jesús, a la UNAM, al Dr. Federico, a mi papá, a mi jefa, a mi Elita, a mi abuelita Natalia, a Miss Stacy, a Felipón y Minojín, a Felipito, a Vere y Fer, a Verenicita, a Karla Fernanda, a Ma. Teresa, a David y la Reyna Valera, a Gracia, a Renata, a Ma. José, a Ramiro y Clau, a Andrés, a Paola, a Esli, a cada uno de mis hermanos en Cristo, a Bety, a Pancho y a muchos más que tuvieron que ver en este periodo de mi vida.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la
UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el
contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Juan Cesar Valdes
Abraon

FECHA: 30 Septiembre 2003

FIRMA: [Firma]

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Índice General

Nomenclatura	1
Introducción	3
Objetivos	7
Capítulo 1	
Revisión Bibliográfica	8
1.1 Modelado de Cultivos	8
1.2 Cultivos Controlados	9
1.3 Invernaderos	9
1.3.1 Tipos de Invernaderos	10
1.3.2 Invernaderos de Techumbre Curva	10
1.4 Reactores Termofílicos	11
Capítulo 2	
Modelado	15
2.1 Justificación del uso del Método de Parámetros Concentrados	15
2.2 Descripción del Sistema	16
2.3 Balances de Energía	18
2.3.1 Balance de Energía de la Cubierta	19
2.3.2 Balance de Energía del Aire Interior	22
2.3.3 Balance de Energía del Cultivo	24
2.4 Adimensionalización	25
2.4.1 Variables Dependientes Adimensionales	25
2.4.2 Parámetros Adimensionales	27
2.4.3 Sistema Adimensionalizado	29
Capítulo 3	
Definición de Parámetros	31
3.1 Propiedades y Constantes	31
3.2 Cálculo de Parámetros Adimensionales	35
3.3 Condiciones Iniciales	36
3.4 Excitaciones del Sistema	37
Capítulo 4	
Resultados y Conclusiones	41
4.1 Resultados de las Simulaciones	41
4.2 Conclusiones Generales	46

Apéndice	
Método de Runge-Kutta	64
Bibliografía	66

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Nomenclatura

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Simbología:

A	Área, (m^2).
Bi	Número de Biot.
c_p	Calor específico, ($J/kg\ K$).
F_i	Factor de Forma.
h_1	Coefficiente de película cubierta/aire exterior, ($W/m^2\ K$).
h_2	Coefficiente de película cubierta/aire interior, ($W/m^2\ K$).
h_3	Coefficiente de película cultivo/aire interior, ($W/m^2\ K$).
h_4	Coefficiente de película aire interior/suelo, ($W/m^2\ K$).
k	Conductividad térmica, ($W/m\ K$).
l	Duración del pulso rectangular, (s).
L	Longitud, (m).
L_c	Longitud característica, (m).
Q_s	Radiación solar total, (W).
Q_s^*	Flujo de radiación solar, (W/m^2).
\bar{Q}_s^*	Flujo de radiación solar promedio, (W/m^2).
Q_{sg}^*	Flujo de radiación solar propuesta por Glushchenko y Fan [1], (W/m^2).
Q_c	Transferencia de calor de origen termofílico, (W).
R_e	Resistencia convectiva exterior, (K/W).
R_i	Resistencia convectiva interior, (K/W).
$Rect_s$	Función pulso rectangular asociada a la radiación solar.
$Rect_c$	Función pulso rectangular asociada al suministro de energía termofílica.
s	Tiempo de inicio del pulso rectangular, (s).
t	Tiempo real, (s).
T	Temperatura, (K).
T_∞	Temperatura ambiente (aire exterior), (K).
\bar{T}_∞	Temperatura ambiente promedio (aire exterior), (K).
T_{∞_0}	Amplitud de variación de la temperatura ambiente (aire exterior).
V	Volumen, (m^3).
X	Temperatura adimensional de la cubierta.
Y	Temperatura adimensional del aire interior.
Z	Temperatura adimensional del cultivo.

Simbolos Griegos:

α_c	Capacitancia adimensional asociada al cultivo.
α_e	Capacitancia adimensional asociada a la cubierta.
β_i	Flujo de calor adimensional asociado al suministro de energia de origen termofílico.
β_s	Flujo de calor adimensional asociado a la radiación solar.
ε_c	Resistencia térmica por convección adimensional asociada al cultivo.
ε_e	Resistencia térmica por convección adimensional asociada a la cubierta.
ε_s	Resistencia térmica por convección adimensional asociada al suelo.
γ	Frecuencia adimensional de oscilación de la temperatura ambiente y de la radiación solar.
θ	Temperatura adimensional asociada al medio ambiente (aire exterior).
ρ	Densidad, (kg/m^3).
τ	Tiempo adimensional (variable independiente).
τ_e	Transmisividad de la cubierta.
ω	Frecuencia de oscilación de la temperatura ambiente y de la radiación solar (rad).
φ	Fracción de radiación que traspasa la pantalla de cultivo.

Subíndices:

a	Asociado al aire interior.
c	Asociado al cultivo.
e	Asociado a la cubierta.
ex	Asociado al área de la cubierta expuesta a la radiación directa del sol.
s	Asociado al suelo.
t	Asociado al suministro termofílico de energia.
z	Asociado a la radiación solar.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Dentro de la industria agrícola existen cultivos que por sus características requieren de condiciones climáticas muy precisas para su desarrollo. Tal es el caso del cultivo hortícola, que requiere de condiciones rigurosas de iluminación y temperatura propias de cada especie para lograr iniciar y mantener un período de floración que asegure la calidad del producto y un rendimiento satisfactorio del cultivo. Para lograr las condiciones adecuadas y evitar pérdidas de producción muchos horticultores tradicionalmente han hecho uso de diversos métodos de manipulación de las condiciones climáticas bajo las cuales se desarrollan sus cultivos. Tales métodos son parte de los llamados cultivos controlados que son una manipulación del entorno climático del cultivo con el objetivo de dirigir su desarrollo. Los cultivos controlados de mayor difusión en la horticultura son los sistemas de invernadero que son empleados a distintos niveles de complejidad, pero que tienen en común constituir una frontera entre las condiciones atmosféricas y el cultivo, regulando su interacción.

Los sistemas de invernadero, a pesar de dar mayor control al productor sobre las condiciones en que se desarrolla un cultivo determinado, también elevan los costos de producción, razón por la cual estos sistemas no han sido capaces de desplazar por completo al cultivo a cielo abierto. Sin embargo, debido a la evolución de los hábitos de la población, a la creciente necesidad de ahorro de agua y suelo y a diversas razones de índole económica los cultivos controlados y principalmente los sistemas de invernadero han ganado rápidamente terreno dentro de la industria agrícola dejando de estar limitados a la horticultura. En el último siglo, los sistemas de invernadero han evolucionado rápidamente pasando de ser una curiosidad para aficionados a ser una próspera industria demandante de avances tecnológicos y constituyéndose en una de las principales opciones para dar respuesta a la creciente escasez de recursos y necesidad de grandes volúmenes de alimentos con el más alto control de calidad en cualquier época del año.

Los métodos de cultivo controlado pueden ejercer control a distintos niveles y con distintos grados de sofisticación. Dentro de los cultivos controlados de mayor difusión en la industria agrícola están aquellos que ejercen control sobre las condiciones climáticas en las que el cultivo se desarrolla. La influencia sobre tales condiciones es determinante en el desarrollo y rendimiento del cultivo, por lo que constituye un importante medio para el productor de manipular los períodos de producción y la calidad de la cosecha con relativa independencia de las condiciones atmosféricas y la época del año en que se encuentre. Dentro del tipo de control climático existen diversos niveles que van desde simples cubiertas colocadas sobre el suelo en el que se desarrolla el cultivo hasta estructuras complejas de materiales especializados que encierran al cultivo, el suelo y el aire circundante. Para considerar como sistema de invernadero a un cultivo controlado, es necesario que exista una cubierta que incluya además del cultivo y el suelo, al aire circundante que sufre las principales manipulaciones que el sistema es capaz de ejercer. De acuerdo a esto, los invernaderos pueden considerarse como cubiertas que constituyen una frontera entre el cultivo, su suelo y el aire que lo circunda respecto a las condiciones atmosféricas exteriores que dan al producto la posibilidad de regular las interacciones entre ambos sistemas para lograr que el cultivo se desarrolle de manera óptima de acuerdo a sus propios objetivos. Los distintos niveles de sofisticación de los sistemas de invernadero

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

influyen principalmente en la certidumbre de los resultados que se obtendrán del cultivo y a su eficiencia en la transformación de energía luminosa en enlaces químicos que constituirán los tejidos de las plantas. Parte de esta sofisticación depende de los avances tecnológicos disponibles en materia de estructuras, sistemas auxiliares, interacciones térmicas y materiales y otra parte de los avances tecnológicos de los que se dispone relacionados con la interacción de las plantas con el medio ambiente.

Debido al aislamiento del cultivo respecto a las condiciones atmosféricas es preciso hacer múltiples consideraciones para asegurar que un sistema de invernadero particular, cumpla con los requerimientos climáticos específicos de un cultivo determinado. Para esto se requiere la mayor cantidad de información disponible de las condiciones climáticas en las que se desea instalar el cultivo, así como las condiciones climáticas que el mismo cultivo necesita para su desarrollo. Una vez que se dispone de tal información se requiere de un estudio sobre las interacciones energéticas entre ambos sistemas que aseguren las condiciones adecuadas de desarrollo en el interior del invernadero a lo largo del tiempo. Como resultado de tal estudio se establecen las características de la cubierta, dimensiones, configuración, sistemas auxiliares, etc. así como los lineamientos de operación a los que se verá sujeto el sistema de invernadero.

Las interacciones entre un sistema de invernadero y el medio ambiente exterior son principalmente de tipo energético dado que las propiedades más importantes a controlar son la temperatura, la humedad relativa, y la cantidad de radiación que incide sobre el cultivo dentro de cierto espectro luminoso. En términos generales, el objetivo del sistema de invernadero es proveer al cultivo de la energía suficiente y adecuada para realizar sus funciones metabólicas y mantener las propiedades termodinámicas del aire circundante que optimicen su desarrollo. Puesto que ambos sistemas son dinámicos y las condiciones óptimas que requiere un cultivo varían con el tiempo, las interacciones energéticas resultantes también serán variantes con el tiempo y éstas pueden requerirse en uno o en ambos sentidos, es decir, flujo de energía hacia el interior del sistema de invernadero o flujo hacia el exterior. Además de controlar el sentido de flujo de energía puede ser necesaria una extracción de energía cuando la radiación es excesiva o un suministro adicional que contrarreste las pérdidas. Tal es el caso de situaciones en las que la temperatura del interior del invernadero se requiere que sea mayor a la temperatura exterior en momentos en los que la radiación solar no está presente o es insuficiente y las pérdidas de energía a través de la cubierta hacen descender la temperatura en el interior, con lo que se hace necesario un suministro adicional de energía. Existe además el caso inverso en el que se requiere hacer descender la temperatura en momentos en los que la radiación es intensa, con lo que resulta indispensable la extracción de energía por algún método de enfriamiento o de ventilación.

En la actualidad, el uso de invernaderos ha encontrado una de sus principales aplicaciones en la producción de distintos cultivos de regiones climáticas con temperaturas por debajo de las requeridas para un óptimo desarrollo. Esta situación imposibilita al agricultor la práctica del cultivo a cielo abierto y da oportunidad a los invernaderos a contribuir con su principal función de atrapar la radiación en su interior, elevando la temperatura del aire circundante y creando un entorno climático favorable. A pesar de esto es común que se presenten situaciones en las que la radiación es insuficiente para elevar la temperatura en el interior del invernadero, por lo que se requiere un suministro adicional de

energía que generalmente se hace por medio de calentadores eléctricos, de combustión, etc. Todo suministro adicional de energía tiende a elevar los costos de producción y a disminuir la eficiencia térmica del sistema de invernadero, por lo cual continuamente se hacen estudios que contribuyan a minimizar la necesidad de tal suministro y disminuir su costo. Para tal efecto existen considerables avances encaminados a minimizar las pérdidas de energía del interior del invernadero y múltiples sistemas auxiliares que emplean distintos tipos de energía para elevar la temperatura del interior. Hasta el momento los sistemas más comunes son los calentadores que emplean algún tipo de combustible para elevar la temperatura de un fluido de trabajo que posteriormente se hace circular por el interior del sistema de invernadero. Los sistemas de calentamiento eléctricos también son empleados en muchos invernaderos aunque en términos generales éste es más costoso pero en ocasiones el único suministro disponible, por lo que su uso es más común en sistemas que requieren un suministro de energía esporádico o de emergencia. Para tales casos los sistemas eléctricos tienen como ventaja adicional su bajo costo de instalación respecto a los sistemas de combustión. Existen además una serie de sistemas que emplean para su funcionamiento otros tipos de energía, como solar y eólica, pero su difusión es menor por diversas razones como son, la disponibilidad, costo de instalación, confiabilidad, etc.

Debido a la frecuente necesidad de un suministro adicional de energía y al creciente costo que esto representa, es necesario encontrar formas distintas de generar dicha energía mediante métodos novedosos que minimicen el costo y armonicen con el tipo de industria en el que serán empleados. En la actualidad existen diversos estudios que señalan a la energía procedente de desechos orgánicos como una prometedora opción para generar grandes cantidades de energía y combustible mediante el aprovechamiento de materia orgánica que además pueda ser reintegrada al ciclo de producción. La industria agropecuaria es una de las principales fuentes de tales desechos orgánicos además de ser la industria más demandante de sustancias que eleven la productividad del suelo. Por esto es conveniente lograr que los desechos orgánicos pasen por un proceso de digestión bacteriológica, que los convierta en material asimilable por las plantas cerrando el ciclo de producción tal como sucede en la naturaleza. Con esto se elimina el problema de manejar y acumular los desechos, el paulatino empobrecimiento del suelo y la necesidad de fertilizantes químicos; además de ser una valiosa fuente de energía renovable. En la actualidad existen diversos esfuerzos encaminados a hacer de la digestión bacteriológica una solución a la gran cantidad de desechos orgánicos generados en grandes hacinamientos poblacionales, pero es indispensable descubrir en este tipo de procesos su gran potencial como reintegradores de desechos orgánicos al suelo que eleven su productividad, disminuyan su empobrecimiento y reduzcan la contaminación. Para impulsar el empleo de estas tecnologías es necesario realizar estudios encaminados a lograr que se conviertan en opciones rentables para la producción agrícola. Por tanto es indispensable realizar modelos que incluyan a estos procesos como fuente adicional de energía para analizar su impacto y encontrar parámetros de diseño adecuados para su implementación.

A medida que el uso de invernaderos se ha desarrollado, principalmente durante el último siglo, se ha venido acumulando una serie de experiencias, resultados empíricos, estadísticas y correlaciones que han sentado las bases para su estudio riguroso en las últimas décadas. En la actualidad el uso de invernaderos en el ámbito mundial es una práctica común que ha generado una demanda de estudios científicos multidisciplinarios que fundamentan y perfeccionan las técnicas empleadas para su diseño y operación y dan

mayor certeza de los resultados que el productor obtendrá de ellos. Al mismo tiempo debido a la escasez de recursos y a la competencia entre productores, es preciso obtener resultados útiles al menor costo y con el mayor grado de certidumbre en el desempeño de los invernaderos, su interacción con las plantas y con el medio ambiente y sobre una infinidad de fenómenos involucrados en su operación. Gracias al advenimiento de las computadoras y el desarrollo de programas de simulación, se ha abierto una amplia gama de posibilidades en el estudio de los invernaderos al igual que en otras áreas, dando la oportunidad de manejar grandes cantidades de información en poco tiempo.

TEC. CON
FALLA DE ORIGEN

Objetivos

- Desarrollar un conjunto de ecuaciones que modelen el comportamiento térmico de un sistema de invernadero.
- Determinar la influencia de distintos regímenes de suministro adicional de energía a un sistema de invernadero sobre sus propiedades termodinámicas.
- Analizar la conveniencia del uso de energía procedente de la digestión termofílica de desechos orgánicos como forma de calentamiento en un sistema de invernadero.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Capítulo 1

Revisión Bibliográfica

1.1 Modelado de Cultivos

El modelado de cultivos es un intento por encontrar las principales variables y sus correlaciones que caractericen matemáticamente, el comportamiento de un cultivo y su relación con su entorno. Como punto de partida, Dean y Hinshelwood [2] señalan la importancia de considerar el comportamiento de un cultivo como el resultado de la interacción entre distintos fenómenos involucrados; contrario al enfoque tradicional de considerarlo como una serie de fenómenos aislados. Adicionalmente, Passioura y Thornely [3], proponen el concepto de jerarquía que permite concebir a un cultivo como un conjunto de elementos con distintos niveles jerárquicos (moléculas, organelos, células, tejidos, órganos, plantas y cultivo) en el que la efectividad de los niveles inferiores condiciona la efectividad de los niveles superiores. Esto implica que para determinar el comportamiento de un cultivo es necesario conocer el desempeño de cada elemento y la relación entre cada nivel jerárquico constituyente. En consecuencia, desde este enfoque, el problema central es, por un lado definir los procesos que caracterizan el comportamiento de cada nivel jerárquico y por otro, encontrar la correlación entre dichos procesos de niveles jerárquicos adyacentes. Como lo describe Simon [4], es necesario descubrir una secuencia de procesos que nos permitan determinar las propiedades del cultivo completo a partir de las propiedades del nivel jerárquico más bajo. Este trabajo resulta demasiado complejo y poco práctico, por lo que es empleado principalmente en proyectos de investigación.

Otro enfoque mucho más sencillo es el descrito por Charles y Edwards [5], que consiste en comprender el comportamiento de un cultivo a partir de deducciones basadas en la observación. Posteriormente se generan modelos matemáticos que traten de describir tal comportamiento y se comparan los resultados con datos reales. Si el modelo se desvía significativamente de la realidad, se ajusta hasta lograr un modelo confiable para determinadas condiciones particulares. Este enfoque es el más utilizado en proyectos productivos de bajo nivel de especialización, aunque presenta algunas desventajas importantes. La principal de ellas es que las funciones matemáticas empleadas para describir las variaciones temporales de las propiedades del cultivo, son arbitrarias o intuitivas (regresiones polinomiales, exponenciales, etc.) y sus parámetros prácticamente no tienen relación alguna con la fisiología de la planta ni con las características del medioambiente. Esto implica que los resultados pueden llegar a diferir significativamente de la realidad cuando las condiciones cambian aún en forma natural, por lo que el grado de incertidumbre es muy grande [6].

Existe además, un enfoque fisiológico de modelos matemáticos, en el que los coeficientes y parámetros empleados en modelos empíricos, están ligados a datos estadísticos de la fisiología del cultivo y del historial climático de un lugar determinado [7]. Este enfoque combina la simplicidad de los modelos empíricos pero considerando las



características fisiológicas del cultivo y el historial climático, con lo que se obtiene una mejor descripción cuantitativa de su comportamiento.

Por otro lado, existe una serie de ecuaciones como las propuestas por Jhonson y Thornley [8] fundamentadas en la teoría desarrollada por Arrhenius sobre velocidades de reacción. Estos modelos incluyen funciones temporales para flujo de sustrato a través de las raíces, asimilación de CO_2 , respiración, etc. con resultados satisfactorios en la mayoría de los casos.

Unas de las herramientas que han revolucionado por completo la ciencia y en especial la simulación de distintos fenómenos es la computadora y el desarrollo de "software" especializado. Es posible mediante estas herramientas hacer simulaciones del comportamiento de las variables de un cultivo mediante el uso de sencillos modelos matemáticos obteniendo soluciones numéricas para distintos puntos a intervalos muy cortos de tiempo [9]. Estas herramientas en combinación con el desarrollo continuo de modelos matemáticos más complejos han dado a esta y a muchas otras industrias un poder nunca antes visto.

1.2 Cultivos Controlados

Un cultivo controlado, forzado o protegido es aquel en el que, durante todo el ciclo productivo o en parte del mismo, se actúa sobre el acondicionamiento del microclima que rodea a la planta. A pesar de que se hace hincapié en la modificación del ambiente climático, el cultivo forzado también engloba todos aquellos aspectos relativos a las condiciones en las que un conjunto de plantas se desarrollan, así como a todas aquellas técnicas, fertirrigación, densidad y época de siembra, sanidad vegetal, etc. que inciden en los objetivos que persigue el cultivo controlado, definidos por el incremento de la producción, la mejora de la calidad y la precocidad de la cosecha [10]. Además de lo anterior, el cultivo forzado se orienta a la producción de plantas de origen climático distinto del ambiente natural donde se desea cultivarlas o a la producción de plantas fuera del período climático al que naturalmente correspondería su ciclo de producción.

Los métodos de control de cultivos pueden agruparse en tres grandes conjuntos, los que lo hacen a través del medio ambiente, los que ejercen control sobre las características del cultivo y los que emplean agentes externos. Aunque lo más común es el empleo de una combinación de los tres métodos, el más antiguo y el más común es el control del desempeño de un cultivo mediante el control de su entorno. El uso de invernaderos forma parte de este conjunto y va desde el uso de cubiertas translúcidas colocadas sobre el cultivo a campo abierto, hasta complejas estructuras de materiales especializados que contienen al cultivo y al sustrato y que mantienen un microclima rigurosamente controlado.

1.3 Invernaderos

Las dos propiedades principales que deben tener los invernaderos son la eficiencia y la funcionalidad. Por eficiencia se entiende la idoneidad para acondicionar algunos de los principales componentes del clima, no de una manera estática o incontrolable, sino entre límites bien determinados de acuerdo con las exigencias fisiológicas del cultivo. La funcionalidad es el conjunto de requisitos que permiten la mejor utilización del

invernadero, tanto desde el punto de vista técnico como económico. Estas dos características requeridas para los invernaderos deberán estar convenientemente armonizadas para definir al invernadero como el sistema productivo capaz de obtener cosechas independientemente de las condiciones ambientales y la época del año [11].

Un sistema de invernadero ejerce control sobre de múltiples interacciones ambientales respecto a un cultivo, pero sin duda son las interacciones térmicas las de mayor importancia. Dentro de estas interacciones se encuentran principalmente el efecto de la radiación solar a través de la cubierta en combinación con las interacciones térmicas que se establecen entre el aire interior y el exterior de la misma. Estas interacciones definen las propiedades térmicas del aire interior, así como la cantidad y características de radiación que inciden sobre el cultivo, que son fundamentales en el desarrollo del mismo. Cuando el sistema no es capaz de proporcionar las características térmicas adecuadas para un correcto desarrollo del cultivo, es necesario un aporte o extracción adicional de energía que necesariamente influyen en el rendimiento y economía del sistema.

1.3.1 Tipos de Invernaderos

Los invernaderos pueden ser clasificados según distintas características (por ejemplo, material de construcción, material de la cubierta, características de la techumbre, etc.), no obstante, se prefiere enumerar los más importantes obviando algunas características para su clasificación. Dentro de los tipos de invernaderos más comunes en el mundo se encuentran los siguientes:

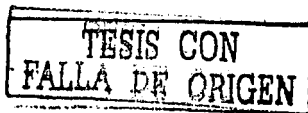
- Invernadero de Túnel (Figura 1)
- Invernadero de Capilla (a dos aguas) (Figura 2)
- Invernaderos Diente de Sierra (Figura 3)
- Invernadero de Capilla Modificado (Figura 4)
- Invernadero con Techumbre Curva (Figura 5)
- Invernadero tipo Parral o Almeriense (Figura 6)
- Invernadero Holandés (Figura 7)
- Invernadero Tipo Trinchera (Figura 8)

1.3.2 Invernaderos de Techumbre Curva

Este tipo de invernaderos tienen su origen en los invernaderos-túnel y existen diferentes variantes según la forma que adopta el techo (circulares, semielípticos, medio punto, ojivales, Etc.). Por lo común son totalmente metálicos o de techumbres metálicas y postes de madera. Existe una versión de muy bajo costo (más próxima al tipo semielíptico) construida con postes de madera y techumbre de madera arqueada o caña. Se trata de estructuras endebles y de baja altura, que son muy poco resistentes a inclemencias climáticas extremas.

Ventajas:

- Junto con los invernaderos tipo túnel, es el de más alta transmitancia a la luz solar.
- Gran volumen interior de aire (alta inercia térmica).
- Buena resistencia frente a los vientos.



- Espacio interior totalmente libre (facilidad de desplazamiento, laboreo mecanizado).
- Construcción de mediana a baja complejidad.

Desventajas:

- Si su altura está por debajo de los 25 a 30 m y no poseen algún sistema de ventilación forzada, presentan problemas de ventilación[11].

1.4 Reactores Termofílicos

Existen diversos estudios sobre el manejo de desechos orgánicos y su transformación en materia reutilizable. Uno de los procedimientos más comunes, es el empleo de la digestión termofílica anaeróbica de desechos orgánicos, tanto la de origen animal como vegetal para su transformación en materia útil en la agricultura y la obtención de metano simultáneamente [12]. Además de la obtención de composta y de combustible, la digestión anaeróbica genera grandes beneficios adicionales como la reducción de volúmenes de desechos, la conservación de nutrientes, la eliminación de agentes patógenos y olores. Una de las principales dificultades que enfrentan estas tecnologías, es la rentabilidad a corto plazo que depende en gran medida en los niveles de metano obtenidos. El problema radica en que el metano emitido por las reacciones de fermentación, dependiendo de las características del sistema, es apenas suficiente para mantener la temperatura mesofílica requerida por las bacterias digestoras. Existen diversos tipos de bacterias termofílicas y cada uno de ellos tienen rangos de temperatura bien definidos necesarios para su desarrollo, lo cual establece una limitante adicional a la estabilidad del digestor. Si la temperatura se sale de dicho rango de operación, el cultivo bacteriano muere y se interrumpe el proceso de digestión y en ocasiones se producen sustancias que hacen más difícil la reutilización de los desechos.

Existen otros tipos de digestión termofílica capaces de auto-generar la energía suficiente para mantener el proceso utilizando bacterias capaces de soportar temperaturas de entre 45° y 75° mediante una digestión aeróbica sin producción de metano. Cummings y Jewell [13] reportan un estudio en el que destacan las siguientes ventajas de este tipo de proceso:

- Alta eficiencia de oxidación
- Destrucción de parásitos y agentes patógenos
- Mayor retención de nitrógeno del producto final
- Gran efectividad en la eliminación de olores
- Reactores de menor volumen

Desde el punto de vista energético, la característica más importante de este proceso, es su capacidad de auto-generación de energía térmica cuya temperatura depende los parámetros de operación del reactor en estado permanente y de la cinética química de las reacciones. Las principales pérdidas de energía se dan a través de las paredes del reactor y en la salida de materia preparada. La única aportación externa al proceso es la inyección de aire al reactor y la agitación de la materia en digestión. Se demuestra que, si se minimizan

las pérdidas, es posible llevar al reactor a un punto de operación estable capaz de producir una cantidad continua de energía aprovechable a temperatura termofílica [13].

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

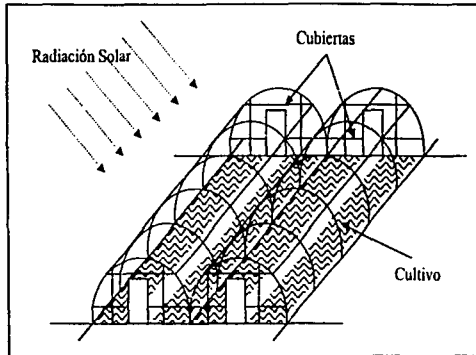


Figura 1. Invernadero tipo Túnel

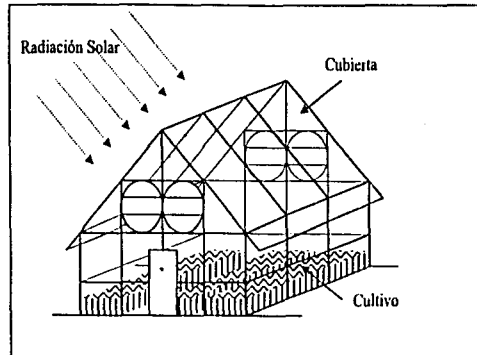


Figura 2. Invernadero de Capilla (a dos aguas)

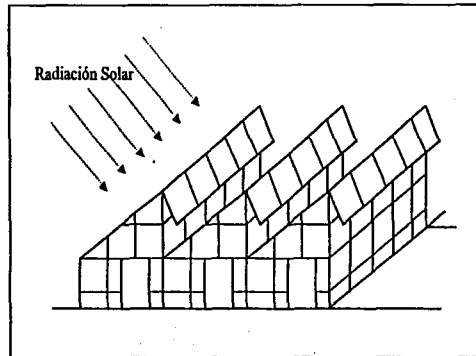


Figura 3. Invernadero Diente de Sierra

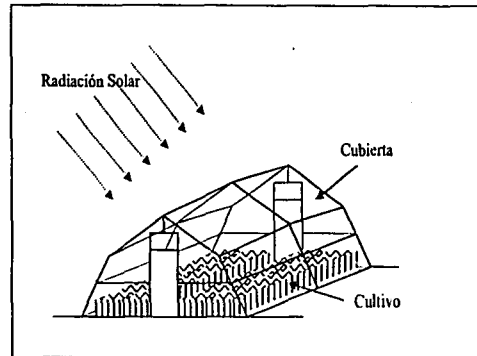


Figura 4. Invernadero de Capilla Modificado

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

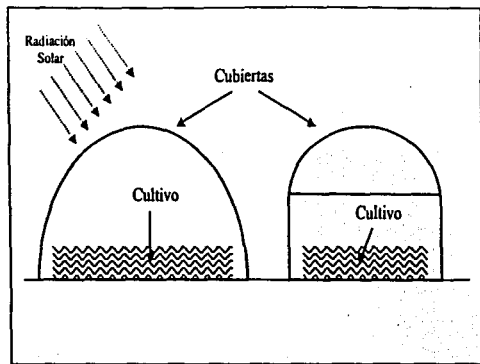


Figura 5. Invernadero de Techumbre Curva

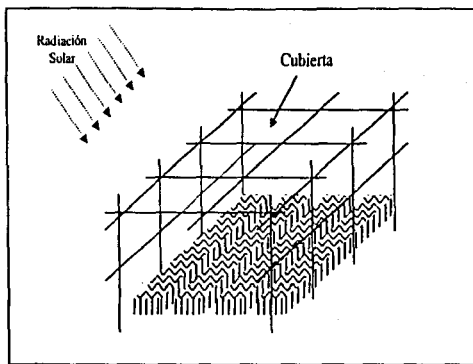


Figura 6. Invernadero tipo Parral o Almeriense

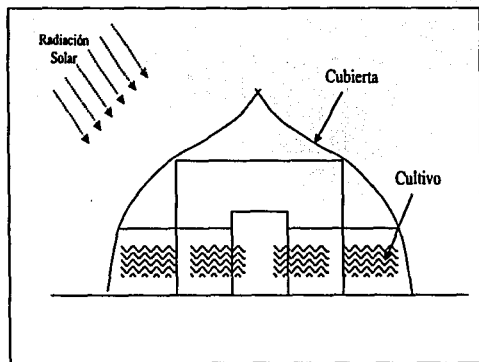


Figura 7. Invernadero Holandés

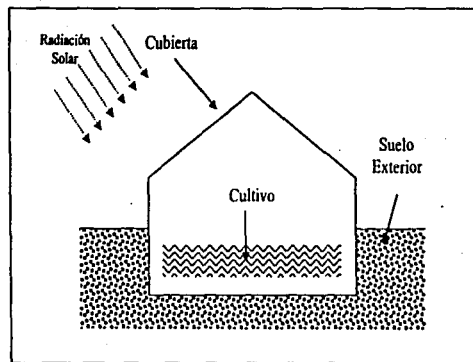


Figura 8. Invernadero tipo Trinchera

Capítulo 2

Modelado

2.1 Justificación del uso del Método de Parámetros Concentrados

Como criterio básico para el empleo de este método en el análisis de sistemas en régimen transitorio según Incropera y DeWitt [14] deberá cumplirse que en cada elemento del sistema sujeto a la transferencia de calor por convección; el número de Biot está restringido a:

$$Bi = \frac{hL_c}{k} < 0.1 \quad (1)$$

El cumplimiento de tal criterio implica que la resistencia a la transferencia por conducción al interior del sólido considerado es sensiblemente menor que su resistencia a la transferencia por convección con el medio externo.

Para el caso de la cubierta, si se estima el valor del número de Biot para las condiciones más desfavorables con $h_s = 25 \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$ [14], $L_c = 0.0005 (m)$ y $k_s = 0.33 \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ [15], se obtiene para la cubierta:

$$Bi_s = 0.038 \quad (2)$$

con lo que se cumple con el criterio anterior.

De igual manera, para el cultivo con $h_c = 25 \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$ [14], $L_c = 2.94 \times 10^{-4} (m)$ [1] y $k_s = 0.59 \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$ [18], se obtiene:

$$Bi_s = 0.0125 \quad (3)$$

que también cumple con el criterio mencionado.

Por último, para el caso del aire interior deberá emplearse otro criterio para determinar si es razonable considerar a los gradientes de temperatura lo suficientemente pequeños para ser despreciables frente a las variaciones temporales. Esto se debe a que el empleo del criterio anterior (1) está enfocado a sustancias sólidas en las que la única forma considerable de transferencia de calor en su interior es la conducción [14]. Por esto, se

propone como criterio válido la comparación de los tiempos característicos asociados a la convección externa respecto a la interna. Esto refleja la diferencia existente entre el tiempo requerido para alcanzar el equilibrio con el exterior respecto al requerido para alcanzarlo en el interior mediante transferencia por convección en ambos casos. De esta manera, si se consideran los volúmenes y las propiedades del aire iguales para ambos lados, deberá cumplirse que:

$$\frac{R_i}{R_e} = \frac{\frac{1}{h_2 A}}{\frac{1}{h_1 A}} \ll 1 \quad (4)$$

Para el sistema en consideración, se supondrá un coeficiente de transferencia por convección interno (h_2) superior al coeficiente exterior (h_1) lo cual es razonable para un amplio margen de condiciones atmosféricas.

2.2 Descripción del Sistema

Como se mencionó en el capítulo anterior, un sistema de invernadero puede tener distintos grados de complejidad por lo que se requiere comenzar por especificar sus componentes y características. El sistema de invernadero en consideración está compuesto por una cubierta que encierra en su interior a un volumen de aire y un cultivo. La cubierta no tiene entradas ni salidas y el suelo no es considerado parte del sistema. El mismo es cerrado y sus fronteras las constituyen por un lado el suelo y por el otro la superficie

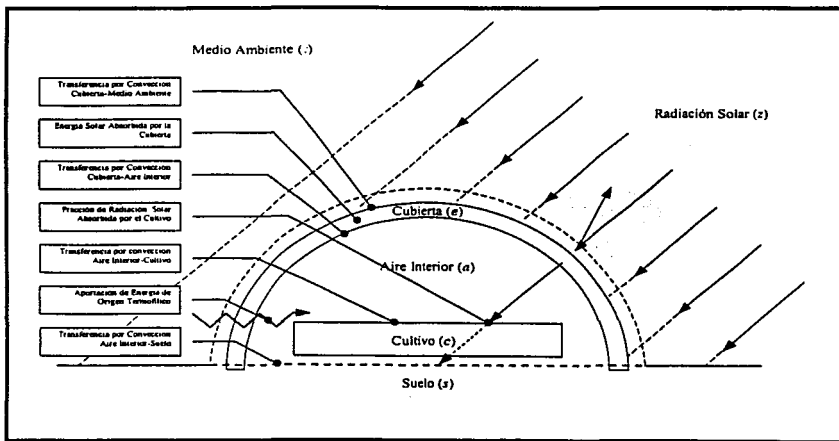


Figura 9. Esquema General del Sistema de Invernadero

externa de la cubierta. El sistema únicamente puede interactuar térmicamente mediante convección a través del suelo, mediante radiación y convección a través de la cubierta además de recibir un suministro adicional de energía proveniente de una fuente externa representada por un digestor termofílico de desechos orgánicos (figura 9).

Debido a la complejidad del sistema de invernadero completo, es necesario dividirlo en subsistemas que permitan su análisis, involucrando a las propiedades de cada uno de los elementos que lo conforman. Para hacer la división se requiere establecer los elementos de mayor interés y las variables que se desean estudiar. En un invernadero los elementos más importantes son el mismo cultivo que requiere de condiciones internas bien definidas para su desarrollo; el aire interior que constituye el principal elemento con el que el cultivo interactúa térmicamente y la cubierta que define las interacciones energéticas que el aire y el cultivo establecerán con el exterior. Por esto los tres subsistemas que integran el invernadero son la Cubierta, el Aire Interior y el Cultivo.

Por otro lado, uno de los principales fines del sistema es mantener condiciones de temperatura en el cultivo dentro de cierto intervalo preestablecido que varía con el tiempo y que define su interacción térmica con los demás elementos. Al mismo tiempo, esta interacción dependerá de diversos factores entre los cuales destacan las temperaturas del aire y la cubierta que varían con el tiempo debido al comportamiento dinámico de las condiciones ambientales externas. Debido a lo anterior, las variables fundamentales de interés son las respectivas temperaturas de la cubierta, el aire interior y el cultivo.

Para poder establecer la interacción existente entre cada subsistema y su exterior, se requiere además de una serie de simplificaciones que permitan incluir únicamente aquellos fenómenos más significativos en su comportamiento térmico. Dentro de estas simplificaciones, según el método de parámetros concentrados, se considera que la temperatura no tiene variaciones espaciales.

A continuación se presenta una definición de cada uno de los subsistemas y sus características seguidas de las consideraciones empleadas para su análisis:

Cubierta (e)

Está constituida por una película delgada semitransparente sin entradas ni salidas que encierra contra el suelo al volumen de aire interior y al cultivo. Su geometría es semicilíndrica y no contiene elementos estructurales.

Consideraciones:

- Las propiedades de la cubierta son homogéneas y no tienen variaciones espaciales.
- La conducción térmica entre la cubierta y el suelo es despreciable.
- No hay fenómenos de condensación en las superficies interna y externa de la cubierta.
- La reflectividad del material se supone despreciable.



Aire interior (a)

Comprende al volumen de aire encerrado en el interior de la cubierta y limitado por la superficie del suelo. No tiene salidas ni entradas y se encuentra en estrecho contacto con la superficie del cultivo, la superficie interna de la cubierta y el suelo.

Consideraciones:

- Las propiedades y composición química del aire interior son homogéneas y no tienen variaciones espaciales.
- El aire es considerado seco y de composición química constante.
- El intercambio de masa entre el aire y el cultivo es despreciable.
- El aire se considera totalmente transparente a la radiación.

Cultivo (c)

Está representado por una pantalla delgada de material que se interpone entre la cubierta y el suelo y cuya composición es semejante a la de una hoja viva. Parte de la radiación que incide sobre su superficie es absorbida permitiendo el paso del resto hacia el suelo interior.

Consideraciones:

- Las propiedades de la pantalla de cultivo son homogéneas y no tienen variaciones espaciales.
- No existe intercambio de masa entre el cultivo y el aire interior.
- No hay conducción térmica entre el cultivo y el suelo.

Alrededores

Los alrededores del sistema lo constituyen tanto el aire exterior como el suelo interior del invernadero.

Consideraciones:

- La temperatura ambiente se considera como una oscilación armónica, alrededor de un valor promedio y en fase con la radiación solar.
- La temperatura de la superficie del suelo abarcado por la cubierta se considera constante.

2.3 Balances de Energía

Para realizar el balance de energía es necesario considerar a cada uno de los subsistemas como independientes del resto de los elementos, registrando todas las interacciones importantes que se establecen a través de sus fronteras. Como fue señalado

en la descripción del sistema, cada subsistema es cerrado y las únicas interacciones posibles son de tipo energético. Para hacer más claros los balances de energía, estos se harán por separado para cada subsistema, describiéndose a continuación cada uno de los términos involucrados y cuya nomenclatura puede ser consultada en la tabla correspondiente. Además puede consultarse la figura 10, en donde se esquematizan cada uno de los flujos de

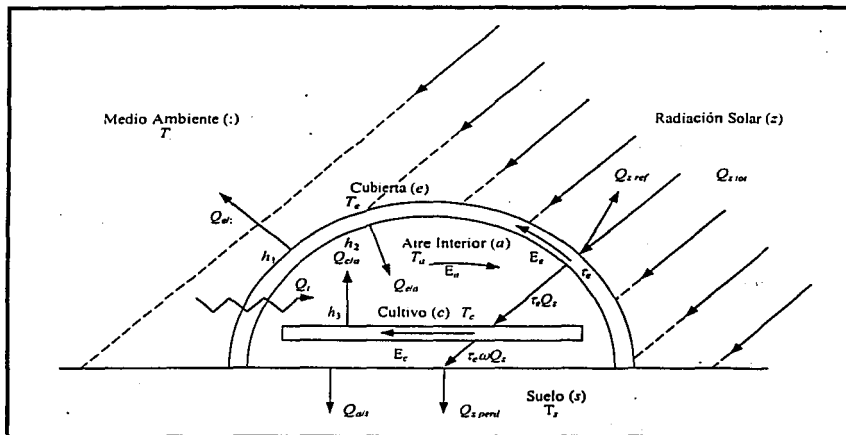


Figura 10. Flujo de Energía en el Sistema de Invernadero

energía para el sistema de invernadero completo.

2.3.1 Balance de Energía de la Cubierta

La energía que cruza las fronteras de la cubierta está formada por tres términos esquematizados en la figura 11. El primero representado por el flujo neto de radiación solar a través de la cubierta, considerando que una parte de ella atraviesa la cubierta debido a su transmisividad. El segundo por el flujo de energía por convección entre la superficie externa de la cubierta y el aire exterior y por último el flujo de energía por convección entre la superficie interna de la cubierta y el aire interior.

El resultado neto de estos flujos de energía es un término de acumulación que refleja la variación de energía de la cubierta en función de la variación de su temperatura y que de acuerdo con la 1ª Ley de la Termodinámica, se puede escribir como:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

$$(\rho V c_p) \frac{d}{dt} T_e = Q_s (1 - \tau_e) - A_e h_1 (T_e - T_a) - A_e h_2 (T_e - T_a) \quad (5)$$

En general, el término asociado a la radiación solar es función de una serie de parámetros que involucran la ubicación sobre la superficie terrestre, parámetros relacionados con el movimiento de la tierra respecto al sol, condiciones atmosféricas, características del entorno, orientación y geometría del invernadero. Existen diversas correlaciones que pretenden aproximar el valor de radiación total [16], que debido a la gran cantidad de parámetros involucrados, su empleo es poco práctico. Independientemente de la complejidad de tales correlaciones, la radiación solar tiene un comportamiento periódico cuyo valor promedio y amplitud de variación pueden ser consultados en registros climatológicos para distintas regiones y épocas del año. Empleando estos datos, es posible obtener una aproximación mediante una función armónica como la que proponen Glushchenko y Fan [1] que después de corregir su fase para que el máximo de radiación coincida con el cenit, puede expresarse como:

$$Q_s : G = \overline{Q_s} [1 - \cos(\pi + 2\omega t)] \quad (6)$$

No obstante la utilidad de la expresión anterior, la radiación solar es una función discontinua cuyo valor es nulo durante la noche y distinto de cero durante el día, por lo que

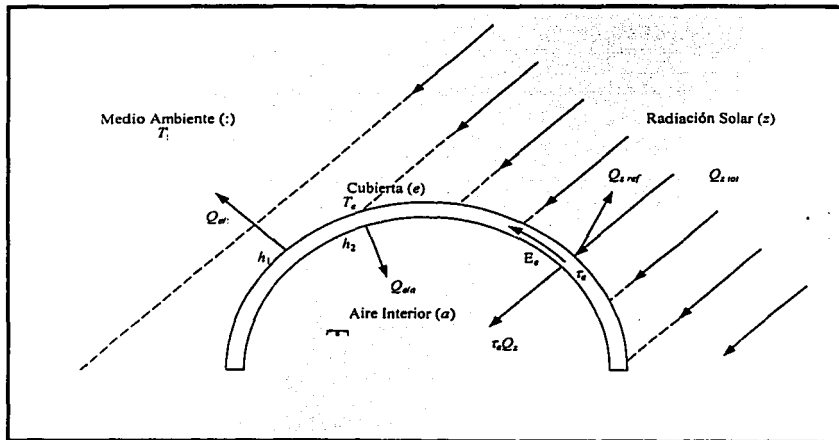


Figura 11. Flujo de Energía de la Cubierta

se requiere una función que considere ambos casos alternados y no sólo una serie de períodos diurnos consecutivos como en la ecuación anterior. Para resolver este problema se propone hacer una combinación de la expresión (6) con una función discontinua de pulso rectangular de la forma:

$$Rect_t = \begin{cases} 1 & |t - s_2| < \frac{l_2}{2} \\ 0 & |t - s_2| \geq \frac{l_2}{2} \end{cases} \quad (7)$$

La expresión anterior, corresponde a un pulso rectangular con inicio en $s_2 - \frac{l_2}{2}$ y duración l_2 que en combinación con (6) ayuda a representar a la radiación solar a lo largo de un día completo con ambos períodos de radiación diurno y nocturno. Es importante señalar que la expresión (6) únicamente considera a la radiación solar que incide sobre una superficie plana por lo que se requiere además incluir un factor de forma determinado por la geometría de la cubierta. Si se considera a la cubierta con orientación norte-sur con una geometría semicilíndrica, el factor de forma asociado puede ser obtenido considerando la fracción del total de radiación que logra incidir sobre la superficie semicilíndrica a lo largo del día. La fracción de área alcanzada por la radiación es una función periódica cuyo valor es un medio cuando el sol nace, uno en el cenit y nuevamente un medio en el ocaso de acuerdo a la siguiente expresión:

$$F_r = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \omega t \quad (8)$$

Si se emplea nuevamente el pulso rectangular para tomar en cuenta su carácter discontinuo por el período nocturno y se considera que la ecuación (7) al ser multiplicada por sí misma no cambia su valor, entonces se obtiene una expresión discontinua aproximada de la radiación solar que incide sobre la superficie de la cubierta para un día completo considerando ambos períodos diurno y nocturno.

$$Q_t^* = Rect_t \overline{Q}_t^* (1 - \tau_s) [1 - \cos(\pi + 2\omega t)] \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos \omega t \right) \quad (9)$$

Por último para el caso en que la longitud del día es de 12 horas aproximadamente, esta expresión puede ser manipulada algebraicamente hasta llegar a una forma más compacta:

$$Q_t^* = Rect_t \overline{Q}_t^* (1 - \tau_s) (\cos^2 \omega t - \cos^3 \omega t) \quad (10)$$

Por otro lado, la temperatura ambiente, al igual que la radiación solar, depende de múltiples parámetros climatológicos, los cuales incluyen a la radiación misma. No obstante

la cantidad de parámetros involucrados y la complejidad con la que interactúan, la temperatura ambiente también tiene un comportamiento armónico, que como propone Vardiyashvili [17], puede ser aproximada mediante una función de parámetros promedio disponibles en registros climatológicos, mediante la siguiente ecuación:

$$T_a = \overline{T_a} - T_{a0} \cos \omega t \quad (11)$$

Finalmente al incluir la expresión de radiación y de temperatura ambiente en la ecuación de balance para la cubierta obtenemos la primera ecuación del balance de energía para la cubierta:

$$\begin{aligned} (\rho V c_p)_c \frac{d}{dt} T_c = \text{Rect}_c A_c \overline{Q}_c (1 - \tau_c) (\cos^2 \omega t - \cos^3 \omega t) - A_c h_1 (T_c - \overline{T_a}) - \\ - A_c h_4 T_{a0} \cos \omega t - A_c h_2 (T_c - T_a) \end{aligned} \quad (12)$$

2.3.2 Balance de Energía del Aire Interior

Como se esquematiza en la figura 12, el aire contenido en el interior del invernadero interactúa mediante convección con la superficie interna de la cubierta, con el cultivo y con el suelo, dando origen a los tres términos de transferencia por convección correspondientes. Además, recibe un suministro de calor proveniente de la digestión termofílica representado por un cuarto término. El resultado neto de estos flujos de calor entre el aire y sus alrededores es un término de acumulación en función de la variación de su temperatura, que puede escribirse como:

$$(\rho V c_p)_a \frac{d}{dt} T_a = A_c h_2 (T_c - T_a) - A_c h_3 (T_a - T_c) - A_c h_4 (T_a - T_i) + Q_d \quad (13)$$

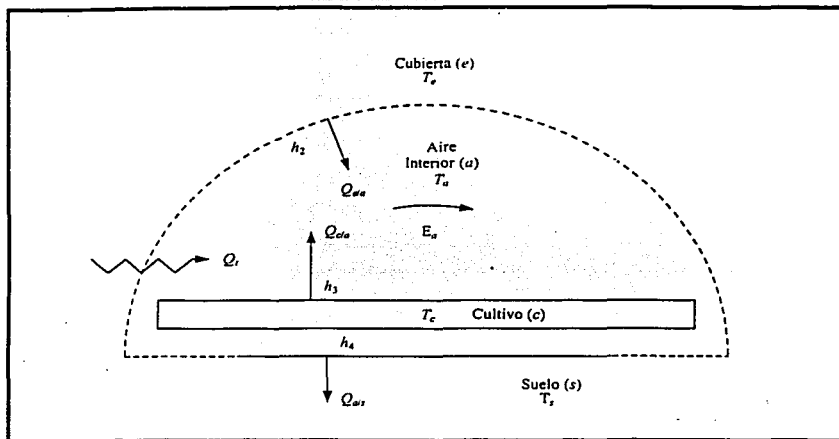


Figura 12. Balance de Energía del Aire Interior

El flujo de calor proveniente del digestor termofílico se supone susceptible de ser manipulado de acuerdo al rendimiento energético reportado por Cummings y Jewell [13]. En este caso se supone que el digestor termofílico se estabiliza en un régimen particular de operación con lo que se obtiene una potencia constante disponible para el calentamiento del invernadero. La manipulación consiste en permitir el flujo de energía a partir de un instante determinado, manteniendo el suministro constante durante un intervalo de tiempo que coincida con el periodo en el que la radiación solar disminuye hasta ser nula en la noche para volver a incrementarse en la mañana. De esta manera se requiere de un pulso rectangular semejante a la ecuación 7, que en general tendrá parámetros de inicio y duración diferentes a los de la radiación solar de la siguiente forma:

$$Rect_x = \begin{cases} 1 & |t - s| < \frac{L}{2} \\ 0 & |t - s| \geq \frac{L}{2} \end{cases} \quad (14)$$

De esta forma, la ecuación de balance del aire interior y segunda ecuación del sistema queda de la siguiente forma:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

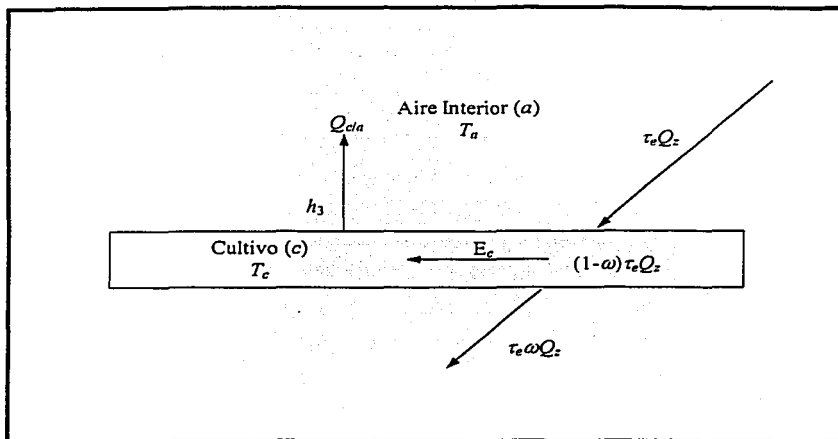


Figura 13. Balance de Energía de la Pantalla de Cultivo

$$(\rho V c_p)_a \frac{d}{dt} T_a = A_e h_2 (T_s - T_a) - A_c h_3 (T_a - T_c) - A_s h_1 (T_a - T_s) + Rect_s Q_z \quad (15)$$

2.3.3 Balance de Energía del Cultivo

Para este caso, existen dos términos de transferencia entre el cultivo y sus alrededores, los cuales se esquematizan en la figura 13. El primer término representa a la transferencia por convección entre el cultivo y el aire interior. El segundo es la fracción de energía solar que debido a la transmisividad de la cubierta y la transparencia del aire logra penetrar hasta incidir sobre el cultivo permitiendo además que una fracción de esta energía siga su curso hasta alcanzar el suelo. De igual manera, el resultado de estos intercambios energéticos es un término de acumulación expresado en función de la variación de temperatura del cultivo:

$$(\rho V c_p)_c \frac{d}{dt} T_c = A_c h_3 (T_a - T_c) + Rect_s A_c \overline{Q_z} \tau_e \varphi (\cos^2 \omega t - \cos^3 \omega t) \quad (16)$$

Finalmente las ecuaciones (12), (15) y (16) constituyen el sistema de ecuaciones asociado al sistema de invernadero en estudio. Este sistema está constituido por tres ecuaciones diferenciales ordinarias lineales de primer orden no homogéneas, que antes de ser resueltas es conveniente proceder a su adimensionalización.

2.4 Adimensionalización

Con la finalidad de simplificar el proceso de solución del sistema de ecuaciones, así como la interpretación de los resultados, es conveniente transformar el sistema de ecuaciones diferenciales en un sistema adimensional equivalente. Para esto se definen las variables y parámetros adimensionales cuya nomenclatura puede ser consultada en la sección correspondiente.

2.4.1 Variables Dependientes Adimensionales

- Temperaturas Adimensionales del Sistema:

$$X = \frac{T_a - T_i}{T_\infty - T_i} \quad (17)$$

$$Y = \frac{T_s - T_i}{T_\infty - T_i} \quad (18)$$

$$Z = \frac{T_e - T_i}{T_\infty - T_i} \quad (19)$$

Estas representan las temperaturas adimensionales de la cubierta, del aire interior y del cultivo respectivamente, cada una de las cuales, están constituidas por el cociente de dos diferencias de temperatura. Como se estableció en la descripción de los alrededores (Secc. 2.2), la temperatura del suelo T_i se considera constante, por lo que el numerador de cada ecuación representa la diferencia de temperatura entre cada elemento del sistema y la temperatura del suelo. Considerando que uno de los principales objetivos de un sistema de invernadero es mantener las temperaturas en el interior del mismo por encima de la temperatura exterior, y si además se toma en cuenta que la temperatura ambiente promedio es superior a la temperatura del suelo gracias a la gran capacitancia térmica del suelo, entonces puede esperarse que las temperaturas adimensionales oscilen alrededor de la unidad, incrementando su valor en el día y decreciendo en la noche, pero siempre dentro del mismo orden de magnitud.

- Tiempo Adimensional:

$$\tau = \frac{t}{t_c} \quad (20)$$

El tiempo adimensional esta constituido por el cociente del tiempo real t y el tiempo característico del sistema t_c y representa la variable independiente del sistema ligada al tiempo. El tiempo característico t_c proviene de la solución del sistema de ecuaciones homogéneas asociado al sistema no homogéneo (ecuaciones 12, 15 y 16):

$$(\rho V c_p)_e \frac{d}{dt} T_e + A_e (h_1 + h_2) T_e = 0 \quad (21)$$

$$(\rho V c_p)_a \frac{d}{dt} T_a + (A_e h_2 + A_c h_3 + A_s h_4) T_a = 0 \quad (22)$$

$$(\rho V c_p)_c \frac{d}{dt} T_c + A_c h_3 T_c = 0 \quad (23)$$

Las soluciones de este sistema de ecuaciones son:

$$T_e = T_{e_0} \exp\left(-\frac{A_e (h_1 + h_2)}{(\rho V c_p)_e} t\right) \quad (24)$$

$$T_a = T_{a_0} \exp\left(-\frac{A_e h_2 + A_c h_3 + A_s h_4}{(\rho V c_p)_a} t\right) \quad (25)$$

$$T_c = T_{c_0} \exp\left(-\frac{A_c h_3}{(\rho V c_p)_c} t\right) \quad (26)$$

Por lo tanto, los respectivos tiempos característicos de la cubierta, el aire interior y el cultivo serán:

$$t_{e_c} = \frac{(\rho V c_p)_e}{A_e (h_1 + h_2)} \quad (27)$$

$$t_{c_a} = \frac{(\rho V c_p)_a}{A_e h_2 + A_c h_3 + A_s h_4} \quad (28)$$

$$t_{c_c} = \frac{(\rho V c_p)_c}{A_c h_3} \quad (29)$$

Tomando como referencia al aire interior y considerando que tanto los coeficientes de película h_2 , h_3 y h_4 como las áreas A_e , A_c y A_s respectivamente, son del mismo orden de magnitud, es posible establecer:

$$t_{e_c} = \frac{(\rho V c_p)_e}{A_e h_2} \approx t_{c_a} \quad (30)$$

Por otro lado, este tiempo característico es equivalente a la multiplicación de la resistencia térmica por convección por la capacitancia térmica del sistema, por lo que puede ser interpretada como un índice de la velocidad de respuesta del sistema a una variación térmica de su entorno debido a la transferencia de calor por convección. Así, mientras su valor sea mayor, el tiempo necesario para que el sistema alcance el equilibrio con su entorno también lo será [14]. Si se considera que para un invernadero semicilíndrico de

1000 (m²) de suelo cubierto, el tiempo característico es del orden de la unidad, y si además, se compara este orden de magnitud con el tiempo correspondiente a un ciclo de 24 horas, es de esperar que el estado permanente se alcance mucho antes de finalizar el primer ciclo de solución numérica. Finalmente, si se combinan las expresiones (20) y (30), se obtiene el tiempo adimensional en la forma:

$$\tau = \frac{A_s h_2}{(\rho V c_p)_a} t \quad (31)$$

2.4.2 Parámetros Adimensionales

De acuerdo a la adimensionalización de las variables es posible obtener los correspondientes parámetros adimensionales del sistema cuyas definiciones se presentan a continuación.

- Temperatura Ambiente Adimensional:

$$\theta = \frac{T_{a_0}}{T_{\infty} - T_s} \quad (32)$$

Este es un parámetro que relaciona la amplitud de variación de la temperatura ambiente T_{a_0} respecto a la diferencia de temperaturas entre el medio ambiente promedio \bar{T}_a y el suelo T_s . Por lo tanto, es una magnitud relativa que indica qué tanto se desvía la temperatura ambiente de su valor promedio debido a su oscilación. El valor de este parámetro en general depende de la ubicación sobre la superficie terrestre y de los diversos factores climatológicos propios de cada región. Así, para lugares en los que existe una gran diferencia entre las temperaturas del día y de la noche respecto a la diferencia de temperaturas del ambiente promedio y el suelo, este parámetro tenderá a ser mayor que en lugares en donde las temperaturas diurna y nocturna son más regulares.

- Capacitancias Adimensionales:

$$\alpha_a = \frac{(\rho V c_p)_a}{(\rho V c_p)_e} \quad (33)$$

$$\alpha_c = \frac{(\rho V c_p)_a}{(\rho V c_p)_c} \quad (34)$$

Estos parámetros se encuentran asociados respectivamente a la cubierta y al cultivo y representan la relación entre la capacitancia térmica del aire comparada con sus respectivas

capacitancias. Debido a esto, entre más pequeño sea su valor significará que el elemento al que está asociado tiene una mayor capacidad de almacenamiento de energía.

A pesar de que el volumen del aire interior es mucho mayor que el de la cubierta y el cultivo, debido a su baja densidad, la masa del aire interior también será menor respecto a ambos. Esto último en combinación con una capacitancia térmica del aire muy baja permite prever que estos parámetros deberán ser mucho menores que la unidad y cercanos a cero.

- Resistencias Térmicas por Convección Adimensionales:

$$\varepsilon_e = \frac{h_1}{h_2} \quad (35)$$

$$\varepsilon_c = \frac{A_e h_3}{A_c h_2} \quad (36)$$

$$\varepsilon_s = \frac{A_s h_3}{A_s h_2} \quad (37)$$

Los parámetros anteriores están asociados respectivamente a la cubierta, al cultivo y al suelo que son los tres medios sujetos a transferencia de calor por convección. Estos parámetros representan la relación existente entre la transferencia por convección del aire interior con la cubierta y las distintas resistencias al mismo tipo de transferencia presentes en el sistema.

Debido a lo señalado previamente en el criterio (1), el valor del coeficiente de película interno h_2 deberá ser muy superior al valor del coeficiente externo h_1 por lo que el parámetro adimensional ε_e será cercano a cero. Tomando en cuenta que los ordenes de magnitud tanto de los coeficientes de película h_2 , h_3 y h_4 como de las áreas A_e , A_c y A_s respectivamente son los mismos, es de esperar que los parámetros ε_c y ε_s sean cercanos a la unidad.

- Frecuencia Adimensional:

$$\gamma = \omega t_c$$

$$\gamma = \omega \frac{(\rho V C_p)_a}{A_e h_2} \quad (38)$$

La frecuencia adimensional está constituida por la frecuencia de oscilación de la radiación solar para un ciclo que se completa cada 24 horas, multiplicada por el tiempo característico del sistema. De esta manera, la frecuencia del sistema representa la variación del ángulo de la función armónica a la que corresponde en un tiempo igual al tiempo característico t_c .

- Flujos de Calor Adimensionales:

$$\beta_2 = \frac{\overline{Q}_r}{h_2(\overline{T}_a - T_i)} \quad (39)$$

$$\beta_1 = \frac{Q_i}{A_s h_2 (\overline{T}_a - T_i)} \quad (40)$$

Los parámetros adimensionales de flujo de calor, se encuentran asociados a la radiación solar y suministro de energía termofílica respectivamente, los cuales, matemáticamente representan las excitaciones en el sistema de ecuaciones diferenciales correspondientes. Sus valores comparan el valor promedio de flujo de calor para cada caso respecto al flujo de calor por convección que se establecería por la parte interna de la cubierta, si la diferencia de temperaturas fuera la misma que la que existe entre el promedio ambiental y el suelo. El valor asociado a la radiación solar dependerá de la intensidad promedio correspondiente a la región en estudio; mientras que el valor asociado al suministro termofílico dependerá únicamente de la energía disponible en el reactor termofílico y del régimen de operación del mismo.

Para un flujo de calor adimensional por radiación $\beta_2 < 1$ sin un suministro adicional de energía, sería posible esperar que la temperatura del interior del sistema descienda aún por debajo del promedio de temperatura ambiente en los periodos de noche. Si el principal objetivo del sistema es, por el contrario, mantener una temperatura por encima de la temperatura ambiente, especialmente en la noche, este parámetro deberá ser $\beta_2 > 1$ o compensar la necesidad de energía mediante el empleo de una fuente adicional, tal como el suministro de origen termofílico β_1 .

En el caso del parámetro asociado al suministro termofílico β_1 , este asume valores arbitrarios que dependen exclusivamente del régimen de operación seleccionado y de la capacidad del reactor termofílico.

2.4.3 Sistema Adimensionalizado

Con la ayuda de las variables y parámetros adimensionales, es posible transformar el sistema de ecuaciones diferenciales (12), (15) y (16) en un sistema adimensionalizado equivalente como el que se muestra a continuación:

$$\frac{dX}{d\tau} = -(\alpha_c \varepsilon_c + \alpha_c) X + \alpha_c Y - \alpha_c \beta_2 (1 - \varphi) Rect_c \cos^3 \gamma \tau + \alpha_c \beta_1 (1 - \varphi) Rect_c \cos^2 \gamma \tau - \alpha_c \varepsilon_c \theta \cos \gamma \tau - \alpha_c \varepsilon_c \quad (41)$$

$$\frac{dY}{d\tau} = X - (1 + \varepsilon_c + \varepsilon_s) Y + \varepsilon_c Z + \beta_1 Rect_c \quad (42)$$

$$\frac{dZ}{d\tau} = \alpha_c \varepsilon_c Y - \alpha_c \varepsilon_c Z - \alpha_c \beta_2 \tau_c \varphi Rect_c \cos^3 \gamma \tau + \alpha_c \beta_1 \tau_c \varphi Rect_c \cos^2 \gamma \tau \quad (43)$$

Por lo tanto la evolución temporal de cada una de las temperaturas adimensionales resulta ser un problema multivariable debido a la dependencia paramétrica de X , Y y Z de la forma:

$$X = X(\tau, Y, Z, X', Y', Z', \theta, \alpha_e, \alpha_c, \epsilon_e, \epsilon_c, \epsilon_s, \gamma, \beta_e, \beta_c) \quad (44)$$

$$Y = Y(\tau, X, Z, X', Y', Z', \theta, \alpha_e, \alpha_c, \epsilon_e, \epsilon_c, \epsilon_s, \gamma, \beta_e, \beta_c) \quad (45)$$

$$Z = Z(\tau, X, Y, X', Y', Z', \theta, \alpha_e, \alpha_c, \epsilon_e, \epsilon_c, \epsilon_s, \gamma, \beta_e, \beta_c) \quad (46)$$

Capítulo 3

Definición de Parámetros

Como resultado del modelado del Sistema de Invernadero y su adimensionalización se obtiene un sistema de ecuaciones diferenciales de 1^{er} orden no-homogéneo constituido por las siguientes ecuaciones:

$$X' + (\alpha_r \varepsilon_r + \alpha_r) X - \alpha_r Y = -\alpha_r \beta_2 (1 - \varphi) Rect_r \cos^3 \gamma \tau + \alpha_r \beta_2 (1 - \varphi) Rect_r \cos^2 \gamma \tau - \alpha_r \varepsilon_r \theta \cos \gamma \tau - \alpha_r \varepsilon_r \quad (1)$$

$$Y' - X + (1 + \varepsilon_r + \varepsilon_r) Y - \varepsilon_r Z = \beta_2 Rect_r \quad (2)$$

$$Z' + \alpha_r \varepsilon_r Z - \alpha_r \varepsilon_r Y = -\alpha_r \beta_2 \tau \varphi Rect_r \cos^3 \gamma \tau + \alpha_r \beta_2 \tau \varphi Rect_r \cos^2 \gamma \tau \quad (3)$$

En este sistema, las variables dependientes son X , Y y Z y constituyen las variables de interés por su relación directa con el comportamiento de la Cubierta, el Aire Interior y el Cultivo respectivamente. La variable independiente esta representada por τ que es una variable adimensional asociada al tiempo. El valor de la excitación del sistema, depende del parámetro β_2 asociado al suministro termofílico de energía, así como la función $Rect_r$ cuyos parámetros definen la duración de dicha excitación.

3.1 Propiedades y Constantes

Para resolver el sistema de ecuaciones anterior, en primer lugar es necesario obtener los valores de los parámetros adimensionales que conforman sus coeficientes. A su vez, estos parámetros adimensionales están constituidos por los valores de diversas propiedades y constantes físicas que caracterizan al sistema de invernadero y que, como fue expuesto con anterioridad, son considerados invariantes con el tiempo. Dichas propiedades y constantes deben ser valores aproximados de condiciones reales de operación para obtener resultados aproximados al comportamiento real de un sistema de invernadero. Para el caso en estudio se expone a continuación los valores propuestos y los valores obtenidos de otros estudios semejantes.

- Áreas y Volúmenes

Los volúmenes y áreas de cada uno de los elementos que integran el sistema de invernadero analizados quedan definidas al especificar el área del suelo cubierto y el espesor tanto del material de la cubierta de la pantalla de cultivo. Estos valores fueron seleccionados empleando valores típicos considerando que una vez establecida la configuración semicilíndrica del sistema, el efecto de las dimensiones sobre la respuesta térmica del sistema no es de interés en el estudio.

Se propone un Invernadero de geometría semicilíndrica con 50 (m) de largo por 20 (m) de ancho de superficie de suelo cubierto con una radio de 10 (m) como se muestra en la figura 14.

Para la cubierta se propone una película de polietileno de baja densidad (LDPE) con un espesor de 1 (mm). Para el área de Cubierta Expuesta A_{ex} se considera únicamente la parte semicilíndrica de la misma y para los valores restantes de la Cubierta (A_c , V_c); se considera tanto el material de la cubierta semicilíndrica como las paredes semicirculares de los extremos. Para el cultivo, el espesor propuesto es de 2.94 (mm) que corresponde al utilizado por Glushchenko y Fan [1] para un cultivo de algodón Yulduz. Empleando estos datos se obtienen los resultados de la tabla siguiente:

Tabla 3.1

Áreas y Volúmenes				
Elemento	Áreas	(m ²)	Volúmenes	(m ³)
Aire Interior	V_a	1	V_a	7 854
Cubierta Total	A_a	1 885	V_c	1.88
Cubierta Expuesta	A_{ex}	1 571		
Cultivo	A_c	1 000	V_c	2.94
Suelo	A_s	1 000		

- Densidades

Para el caso de la cubierta, el valor de densidad, es un valor típico del polietileno de baja densidad (LDPE) [15]. El valor de densidad del aire interior es el correspondiente al aire seco (@ Patm / 293.15 (K)). [18]. En cuanto a la densidad del cultivo, su valor es el correspondiente a algodón tipo Yulduz reportado por Glushchenko y Fan [1].

Tabla 3.2

Densidades		
Elemento	Nomenclatura	(Kg/m ³)
Cubierta	ρ_c	924.5
Aire Interior	ρ_a	1.293
Cultivo	ρ_c	999.31

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- Calores Específicos

El valor de calor específico para la cubierta es un valor típico para polietileno de baja densidad [15]. Para el aire interior, el valor correspondiente al aire seco (@ Patm / 293.15 (K)). [18]. Para el cultivo, el valor corresponde al algodón tipo Yulduz reportado por Glushchenko y Fan [1].

Tabla 3.3

Calores Específicos		
Elemento	Nomenclatura	(J/kg·K)
Cubierta	c_{p_c}	2 300
Aire Interior	c_{p_a}	1.007
Cultivo	c_{p_v}	2 988

- Coeficientes de Película

Los valores de coeficientes de película son valores típicos para condiciones semejantes de transferencia de calor por convección que cumplen con el criterio descrito en la sección 2.1 como justificación del Método de Parámetros Concentrados [16].

Tabla 3.4

Coeficientes de Película		
Elemento	Nomenclatura	(W/m ² ·K)
Cubierta-Aire Exterior	h_1	2.0
Cubierta-Aire Interior	h_2	10.0
Cultivo-Aire Interior	h_3	4.0
Suelo-Aire Interior	h_4	3.5

- Temperaturas

La temperatura del suelo, en términos generales es una función periódica cuyas variaciones son relativamente pequeñas, por lo que, tal como se estableció en la sección 2.2, es considerada constante e igual al promedio diario. Para la temperatura del aire exterior, si se considera como una función periódica debido a que la variación entre el máximo y el mínimo son considerables. Esta función periódica consta de un termino de

temperatura promedio y una variación total a lo largo del ciclo diario. Los tres valores de temperatura son tomados de datos experimentales correspondientes al mes de mayo reportados por Vardiyashvili [17].

Tabla 3.5

Temperaturas		
Elemento	Nomenclatura	(K)
Temperatura del Suelo	T_s	292.6
Temperatura Ambiente Promedio	T_a	295.0
Amplitud de Variación de Temperatura Ambiente	T_{Δ}	10.9

- Flujo de Calor

En el estudio se emplean dos valores de flujos de calor, uno que representa al flujo de calor debido a la radiación solar y que fue tomado de valores experimentales reportados por Glushchenko y Fan [1]. El segundo valor de flujo de calor corresponde al suministro termofílico de energía y su valor depende únicamente del régimen de operación del reactor termofílico y para este estudio será considerado un parámetro de excitación del sistema cuyos valores de simulación se muestran en la sección 3.4.

Tabla 3.6

Calor Solar		
Elemento	Nomenclatura	(W/m ²)
Flujo de Radiación Solar Promedio	Q_s'	407.4

- Otras Propiedades

A continuación se presentan los valores de transmitancia de la cubierta y la fracción de radiación que logra cruzar la pantalla de cultivo hasta llegar al suelo. Ambos datos son valores reportados por Markov [19] para condiciones similares. Además se presenta la frecuencia atmosférica que corresponde a la duración de un ciclo completo de radiación de 24 horas.

Tabla 3.7

Otras Propiedades			
Elemento	Nomenclatura	Valor	Unidad
Transmitancia de la Cubierta	τ_e	0.88	t
Fración de Radiación Cultivo-Suelo	ϕ	0.65	t
Frecuencia Atmosférica	ω	$2\pi/86400$	rad/s

- Parámetros de Funciones Discontinuas

Se requieren dos parámetros para cada una de las funciones discontinuas que determinan la duración del estímulo discontinuo l_2 y el valor de tiempo al que se presenta el centro del mismo s_2 . En consecuencia, los valores del tiempo inicial y el tiempo final del estímulo discontinuo se presentan en $s_2 - \frac{l_2}{2}$ y $s_2 + \frac{l_2}{2}$ respectivamente. A continuación se presentan los parámetros correspondientes a la función asociada a la radiación solar, en donde la duración del estímulo de radiación solar es de 12 horas, con centro en las 12 horas del día.

Los distintos valores de los parámetros de la función asociada al suministro termofílico de energía, se presentarán en la sección 3.4 debido a que serán empleados como parte de los parámetros de excitación.

Tabla 3.8

Parámetros de la Función Discontinua Solar		
Elemento	Nomenclatura	(s)
Duración de la Función Escalón Solar	l_2	43 200
Valor central de la función Escalón Solar		43 200

3.2 Cálculo de Parámetros Adimensionales

Mediante la sustitución de los valores de propiedades y constantes expuestos con anterioridad, se obtienen los valores de los parámetros adimensionales siguientes:



Tabla 3.9

Parámetros Adimensionales		
Parámetro Adimensional	Nomenclatura	Valor
Capacitancia Térmica Adimensional de la Cubierta	α_c	2.558310 ⁻³
Capacitancia Térmica Adimensional del Cultivo	α_c	1.165310 ⁻³
Resistencia Térmica por Convección Adimensional de la Cubierta	ϵ_c	0.200
Resistencia Térmica por Convección Adimensional del Cultivo	ϵ_c	0.212
Resistencia Térmica por Convección Adimensional del Suelo	ϵ_s	0.186
Temperatura Ambiente Adimensional	θ	4.542
Frecuencia Adimensional de la Radiación Solar	γ	3.945310 ⁻³
Flujo de Calor Solar Adimensional	\bar{E}	14.147

3.3 Condiciones Iniciales

Para hacer la simulación, es necesario establecer los valores iniciales para cada una de las variables τ , X , Y y Z correspondientes al tiempo adimensional y las temperaturas adimensionales de la Cubierta, Aire Interior y Cultivo respectivamente.

El valor inicial del tiempo adimensional τ es de cero, correspondiente al tiempo real t igual a cero al inicio del día (0:00 hrs). Para cada una de las temperaturas adimensionales, sus valores iniciales resultan de calcular sus valores de acuerdo con las ecuaciones (17), (18) y (19) con temperaturas reales T_e , T_a y T_c iguales al valor promedio de la temperatura ambiente \bar{T}_e en t igual a cero.

Tabla 3.10

Condiciones Iniciales Adimensionales		
Elemento	Nomenclatura	Valor Inicial
Tiempo Adimensional	τ	0
Temperatura de la Cubierta Adimensional	X	1.0
Temperatura del Aire Interior Adimensional	Y	1.0
Temperatura del Cultivo Adimensional	Z	1.0

3.4 Excitaciones del Sistema

El valor de la excitación del sistema, está determinado por el valor de suministro de energía termofílica representada por el parámetro adimensional β_i que regula su intensidad y por los valores de los parámetros s_i y l_i de la función discontinua que regulan el inicio y final de su aplicación mediante las ecuaciones $t_n = s_i - \frac{l_i}{2}$ y $t_n = s_i + \frac{l_i}{2}$ respectivamente.

En este caso, al igual que en la función discontinua solar, el parámetro s_i del valor central de aplicación permanece constante e igual a las 12 horas del día.

A continuación se presentan los parámetros empleados en cada una de las simulaciones realizadas.

Tabla de Simulaciones						
Gráfica	Abscisas	Ordenadas	Suministro Termofílico de Calor (β_i)	Tiempo Inicial de Aplicación (t_n)	Tiempo Final de Aplicación (t_n)	Duración del Suministro Termofílico (l_i)
Figura 4.1	τ	X, Y, Z	0	18 hr	24 hr + 6 hr	12 hr
Figura 4.2	τ	X	0.5	21 hr	24 hr + 3 hr	6 hr

Gráfica	Abscisas	Ordenadas	Suministro Termofílico de Calor (β)	Tiempo Inicial de Aplicación (t_i)	Tiempo Final de Aplicación (t_f)	Duración del Suministro Termofílico (t)
Figura 4.3	r	Y	0	21 hr	24 hr + 3 hr	6 hr
			1			
			2			
			3			
			4			
			5			
			6			
Figura 4.4	r	Z	0	21 hr	24 hr + 3 hr	6 hr
			1			
			2			
			3			
			4			
			5			
			6			
Figura 4.5	r	X	0	18 hr	24 hr + 6 hr	12 hr
			1			
			2			
			3			
			4			
			5			
			6			
Figura 4.6	r	Y	0	18 hr	24 hr + 6 hr	12 hr
			1			
			2			
			3			
			4			
			5			
			6			
Figura 4.7	r	Z	0	18 hr	24 hr + 6 hr	12 hr
			1			
			2			
			3			
			4			
			5			
			6			
Figura 4.8	r	X	0	15 hr	24 hr + 9 hr	18 hr
			1			
			2			
			3			
			4			
			5			
			6			

Gráfica	Abcisas	Ordenadas	Suministro Termofílico de Calor (β)	Tiempo Inicial de Aplicación (t_i)	Tiempo Final de Aplicación (t_f)	Duración del Suministro Termofílico (t)
Figura 4.9	r	Y	0	15 hr	24 hr + 9 hr	18 hr
			1			
			2			
			3			
			4			
			5			
			6			
Figura 4.10	r	Z	0	15 hr	24 hr + 9 hr	18 hr
			1			
			2			
			3			
			4			
			5			
			6			
Figura 4.11	r	X	0	t	t	t
			3	9 hr	15 hr	6 hr
				6 hr	18 hr	12 hr
				3 hr	21 hr	18 hr
Figura 4.12	r	Y	0	t	t	t
			3	9 hr	15 hr	6 hr
				6 hr	18 hr	12 hr
				3 hr	21 hr	18 hr
Figura 4.13	r	Z	0	t	t	t
			3	9 hr	15 hr	6 hr
				6 hr	18 hr	12 hr
				3 hr	21 hr	18 hr

Gráfica	Abscisas	Ordenadas	Tiempo Inicial de Aplicación (t_i)	Tiempo Final de Aplicación (t_f)	Duración del Suministro Termofluido (t_s)
Figura 4.14	β_i	X_{min}	12 hr	12 hr	0 hr
			10.5 hr	13.5 hr	3 hr
			9 hr	15 hr	6 hr
			7.5 hr	16.5 hr	9 hr
			6 hr	18 hr	12 hr
			4.5 hr	19.5 hr	15 hr
			3 hr	21 hr	18 hr
Figura 4.15	β_f	Y_{min}	12 hr	12 hr	0 hr
			10.5 hr	13.5 hr	3 hr
			9 hr	15 hr	6 hr
			7.5 hr	16.5 hr	9 hr
			6 hr	18 hr	12 hr
			4.5 hr	19.5 hr	15 hr
			3 hr	21 hr	18 hr
Figura 4.16	β_i	Z_{min}	12 hr	12 hr	0 hr
			10.5 hr	13.5 hr	3 hr
			9 hr	15 hr	6 hr
			7.5 hr	16.5 hr	9 hr
			6 hr	18 hr	12 hr
			4.5 hr	19.5 hr	15 hr
			3 hr	21 hr	18 hr

Capítulo 4

Resultados y Conclusiones

4.1 Resultados de las Simulaciones

Con el fin de mostrar la influencia del suministro termofílico de energía sobre la evolución temporal de las temperaturas de cada uno de los elementos del sistema, se obtuvieron soluciones del sistema para distintos valores del parámetro β_1 correspondientes a distintos regímenes de operación.

Después de resolver numéricamente el sistema de ecuaciones diferenciales adimensionales para las temperaturas adimensionales X , Y y Z en función del tiempo adimensional τ se obtienen los resultados siguientes.

Simulación No. 1

Tabla No. 1

Gráfica	Abscisas	Ordenadas	Suministro Termofílico de Calor (β_1)	Tiempo Inicial de Aplicación (t_i)	Tiempo Final de Aplicación (t_f)	Duración del Suministro Termofílico (t)
Figura 4.1	τ	X, Y, Z	0	18 hr	24 hr - 6 hr	12 hr

Para el caso en el que el suministro de energía termofílica β_1 es nulo, en la figura 4.1 se muestra la relación entre las temperaturas adimensionales X , Y y Z a través del tiempo cuyos comportamientos después de un periodo transitorio son cíclicos. En cada ciclo pueden apreciarse dos zonas de comportamiento distintas asociadas al periodo de día y de noche respectivamente. Dentro del periodo de día, en donde las temperaturas son mayores, puede notarse que la temperatura Z asociada con el cultivo es mayor que la temperatura Y asociada al aire interior y aún superior a la temperatura X asociada a la cubierta. De igual manera, durante el periodo de noche, las temperaturas adimensionales Y y Z son superiores a la temperatura X , destacando el hecho de que en la noche la temperatura Z coincide con la temperatura Y . De lo anterior se concluye que el sistema de invernadero, aún sin un suministro adicional de energía, cumple con su objetivo principal de mantener al cultivo a una temperatura superior que la del entorno que le rodea. Adicionalmente se puede observar que la temperatura Y representa el límite inferior de temperatura a la que Z puede descender, lo cual es razonable si se considera que el aire interior es el principal medio con el que el cultivo tiene transferencia de calor.

Simulación No. 2

Tabla No. 2

Gráfica	Abscisas	Ordenadas	Suministro Termofílico de Calor (β)	Tiempo Inicial de Aplicación (t_i)	Tiempo Final de Aplicación (t_f)	Duración del Suministro Termofílico (t)
Figura 4.2	r	X	0	21 hr	24 hr + 3 hr	6 hr
			1			
			2			
			3			
			4			
			5			
			6			
Figura 4.3	r	Y	0	21 hr	24 hr + 3 hr	6 hr
			1			
			2			
			3			
			4			
			5			
			6			
Figura 4.4	r	Z	0	21 hr	24 hr + 3 hr	6 hr
			1			
			2			
			3			
			4			
			5			
			6			

Por otro lado en las figuras 4.2, 4.3 y 4.4 se presentan gráficamente los resultados numéricos de las temperaturas X , Y y Z respectivamente, para un periodo de aplicación de energía termofílica de 6 horas para distintos valores de β_i . En cada una de las figuras puede apreciarse el efecto que el parámetro de suministro termofílico β_i tiene sobre cada una de las temperaturas adimensionales para una misma duración del suministro de energía. Es posible apreciar que las respectivas temperaturas X , Y y Z tienen un comportamiento igual al caso de β_i nulo con excepción del período en el que se suministra la energía en cuyo comienzo las temperaturas se elevan rápidamente hasta valores proporcionales al valor de suministro termofílico β_i . Enseguida, las temperaturas se estabilizan, evolucionando de la misma manera que en el caso de β_i nulo pero a temperaturas mayores. Justo en el momento en que el suministro de energía es retirado, las temperaturas descienden rápidamente hasta alcanzar la estabilidad, momento en el cual las temperaturas coinciden nuevamente con las correspondientes del caso de β_i nulo para repetir dicho comportamiento un ciclo más tarde.

Por otro lado de la figura 4.1 con β_i nulo, los valores de temperaturas mínimas a lo largo de cada ciclo para las tres temperaturas adimensionales X , Y y Z se presentan en la parte central del periodo de noche. Si por el contrario, se hace variar el valor de β_i para un

período de aplicación de 6 horas cuyo centro coincide con el centro del período de noche, como se muestra en las figuras 4.2, 4.3 y 4.4, las temperaturas mínimas correspondientes permanecerán en el centro del período de noche hasta un valor crítico de β , en el cual las temperaturas de los extremos del período de aplicación igualarán al valor central. Si se sigue incrementando el valor de β , por encima de este valor crítico es posible apreciar que el valor mínimo de temperatura ya no se encuentra en el punto central del período de noche, sino en los extremos de inicio y final del suministro.

Simulación No. 3

Tabla No. 3						
Gráfica	Abscisas	Ordenadas	Suministro Termofílico de Calor (β)	Tiempo Inicial de Aplicación (t_0)	Tiempo Final de Aplicación (t_f)	Duración del Suministro Termofílico (t_d)
Figura 4.5	r	X	0	18 hr	24 hr + 6 hr	12 hr
			1			
			2			
			3			
			4			
			5			
			6			
Figura 4.6			0	18 hr	24 hr + 6 hr	12 hr
			1			
			2			
			3			
			4			
			5			
			6			
Figura 4.7	r	Z	0	18 hr	24 hr + 6 hr	12 hr
			1			
			2			
			3			
			4			
			5			
			6			

De igual manera, en las figuras 4.5, 4.6 y 4.7 se presentan los resultados para X, Y y Z respectivamente a distintos valores de suministro termofílico β , con un tiempo de aplicación de 12 horas de duración y en las figuras 4.8, 4.9 y 4.10 para un suministro de energía de 18 horas. En ambos casos, 12 y 18 horas, el comportamiento general es el mismo que para 6 horas de suministro con la diferencia de que los momentos en que las temperaturas comienzan su ascenso y descenso respectivamente en cada período son distintas, coincidiendo con los momentos correspondientes al inicio y final del suministro.

Si se incrementa el periodo de aplicación del suministro a 12 horas como lo muestran las figuras 4.5, 4.6 y 4.7 para las temperaturas X , Y y Z respectivamente, también existe un valor crítico de β_1 para el cual los valores en el centro del periodo de noche coinciden con los valores extremos del periodo de aplicación y con el valor mínimo del ciclo. La única diferencia es que para el caso de 12 horas estos valores críticos son superiores debido a que los extremos también lo son.

De los tres grupos de figuras, puede concluirse que un suministro adicional de energía como el asociado a β_1 , únicamente tiene un efecto apreciable sobre las temperaturas durante el periodo de su aplicación; regresando rápidamente a la estabilidad cuando el suministro ha concluido. Además, si el suministro de energía tiene un valor constante durante el periodo de aplicación, el efecto sobre el comportamiento de las temperaturas será de un escalamiento proporcional al valor de suministro termofílico β_1 acompañado de sus correspondientes periodos transitorios de inicio y final del suministro.

Simulación No. 4

Tabla No. 4						
Gráfica	Abscisas	Ordenadas	Suministro Termofílico de Calor (β_1)	Tiempo Inicial de Aplicación (t_i)	Tiempo Final de Aplicación (t_f)	Duración del Suministro Termofílico (t)
Figura 4.8	r	X	0	15 hr	24 hr + 9 hr	18 hr
			1			
			2			
			3			
			4			
			5			
			6			
Figura 4.9	r	Y	0	15 hr	24 hr + 9 hr	18 hr
			1			
			2			
			3			
			4			
			5			
			6			
Figura 4.10	r	Z	0	15 hr	24 hr + 9 hr	18 hr
			1			
			2			
			3			
			4			
			5			
			6			

Por último para el caso de 18 horas de aplicación presentados en las figuras 4.8, 4.9 y 4.10, es posible apreciar que los valores de temperaturas de los extremos del periodo de

aplicación son tan elevados que los valores críticos de β_i respectivos a las temperaturas X , Y y Z en ningún caso son alcanzados para los valores de β_i empleados.

Simulación No. 5

Tabla No. 5						
Gráfica	Abscisas	Ordenadas	Suministro Termofílico de Calor (β_i)	Tiempo Inicial de Aplicación (t_i)	Tiempo Final de Aplicación (t_f)	Duración del Suministro Termofílico (t)
Figura 4.11	r	X	3	9 hr	15 hr	3 hr
				6 hr	18 hr	6 hr
				3 hr	21 hr	9 hr
Figura 4.12	r	Y	3	9 hr	15 hr	3 hr
				6 hr	18 hr	6 hr
				3 hr	21 hr	9 hr
Figura 4.13	r	Z	3	9 hr	15 hr	3 hr
				6 hr	18 hr	6 hr
				3 hr	21 hr	9 hr

El efecto de la duración del suministro adicional de energía puede apreciarse en las figuras 4.11, 4.12 y 4.13 correspondientes a las temperaturas X , Y y Z en las que para un mismo valor de suministro termofílico β_i se hace variar el tiempo que permanece el suministro de durante el periodo de noche. En estas figuras es posible apreciar como las elevaciones de temperatura se presentan al inicio y final del periodo de suministro describiendo una curva límite para cada caso, a través de la cual evoluciona la temperatura después de alcanzar la estabilidad para cada periodo de suministro.

Simulación No. 6

Tabla No. 6					
Gráfica	Abscisas	Ordenadas	Tiempo Inicial de Aplicación (t_i)	Tiempo Final de Aplicación (t_f)	Duración del Suministro Termofílico (t)
Figura 4.14	β_i	X_{min}	12 hr	12 hr	0 hr
			10.5 hr	13.5 hr	3 hr
			9 hr	15 hr	6 hr
			7.5 hr	16.5 hr	9 hr
			6 hr	18 hr	12 hr
			4.5 hr	19.5 hr	15 hr
			3 hr	21 hr	18 hr

Gráfica	Abscisas	Ordenadas	Tiempo Inicial de Aplicación (t_i)	Tiempo Final de Aplicación (t_f)	Duración del Suministro Termofluido (t_s)
Figura 4.15	β_i	Y_{min}	12 hr	12 hr	0 hr
			10.5 hr	13.5 hr	3 hr
			9 hr	15 hr	6 hr
			7.5 hr	16.5 hr	9 hr
			6 hr	18 hr	12 hr
			4.5 hr	19.5 hr	15 hr
			3 hr	21 hr	18 hr
Figura 4.16	β_i	Z_{min}	12 hr	12 hr	0 hr
			10.5 hr	13.5 hr	3 hr
			9 hr	15 hr	6 hr
			7.5 hr	16.5 hr	9 hr
			6 hr	18 hr	12 hr
			4.5 hr	19.5 hr	15 hr
			3 hr	21 hr	18 hr

Lo antes expuesto queda resumido en las figuras 4.14, 4.15 y 4.16 en donde se presentan los comportamientos de las temperaturas mínimas correspondientes a X, Y y Z conforme se elevan los valores de β_i para distintos periodos de duración del suministro. En estas figuras puede notarse como independientemente de la duración del suministro, todas las curvas parten de un mismo punto que representa el límite inferior de temperatura que alcanzará la correspondiente variable para un suministro nulo de energía. A partir de estos puntos las temperaturas mínimas para cada período de duración se elevarán al incrementarse el valor de β_i , hasta llegar a distintos valores de temperaturas mínimas y a distintos valores críticos de β_i , después de los cuales cada curva adopta un valor constante que será mayor si el período de aplicación también lo es.

Los resultados de las figuras 4.14, 4.15 y 4.16 desde el punto de vista energético, muestran que para cada valor mínimo de temperatura adimensional en un ciclo existe una duración del período de suministro y un valor crítico de β_i asociado a la intensidad del mismo que proporcionan un consumo mínimo de energía. Por otro lado, es posible alcanzar un mínimo de temperatura mediante una ampliación del período de suministro y una disminución del valor de su intensidad β_i , lo cual se traducirá en un aumento de la energía total suministrada y en un problema de control debido a que cualquier variación de β_i asociada a la intensidad del suministro provocará variaciones en la temperatura mínima.

4.2 Conclusiones Generales

De acuerdo a los resultados descritos, se puede llegar a las siguientes conclusiones generales:

El modelo matemático desarrollado es capaz de describir de manera acertada el comportamiento general de un sistema de invernadero, coincidiendo con los datos experimentales reportados en diversos estudios. Una de las principales coincidencias es el comportamiento cíclico de las curvas de temperatura de tipo senoidal, que a su vez se

encuentran en fase con los ciclos de radiación solar. Otra coincidencia importante es la relación que existe entre los valores de temperatura de los componentes del sistema. Si se consideran únicamente las temperaturas de la cubierta, el aire interior y el cultivo como en este caso, la temperatura del cultivo generalmente es mayor y la de la cubierta menor que las restantes para un ciclo completo. Esto coincide con uno de los principales objetivos de un sistema de invernadero, en el que se desea captar la energía solar dentro del sistema para favorecer su aprovechamiento por el cultivo, además de evitar que la temperatura del mismo descienda por debajo de un valor límite durante la noche. De igual manera, la cubierta tiende a ser el componente de temperatura más baja debido a que es a través de su superficie externa en donde suceden las mayores pérdidas de energía del sistema de invernadero.

Debido a lo anterior, el modelo matemático desarrollado puede ser de gran utilidad para generar simulaciones de sistemas semejantes, además de representar un punto de partida para generar modelos aún más completos que describan sistemas más complejos.

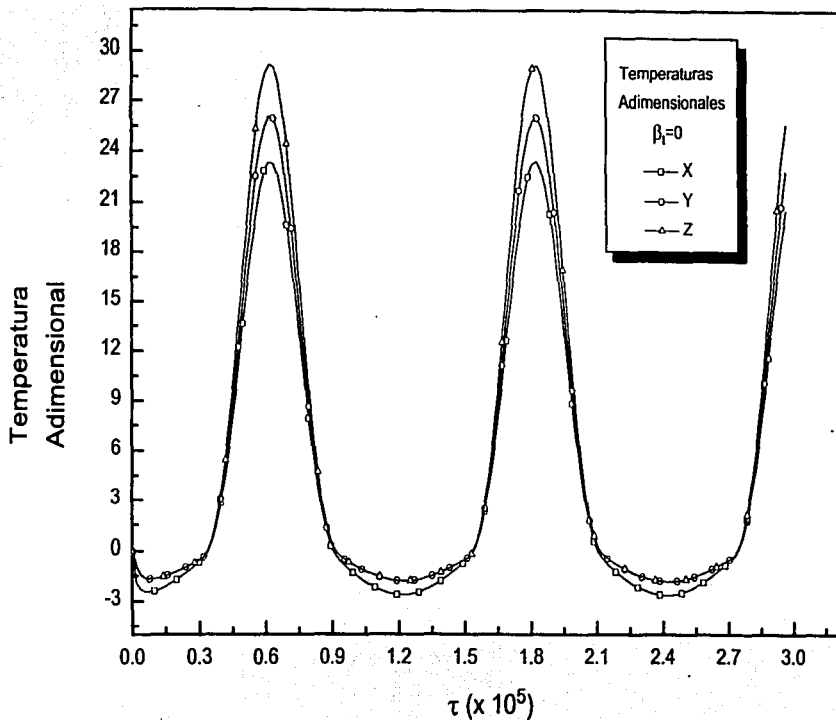
Otra conclusión que se desprende del presente estudio, es el efecto causado por los distintos regímenes de suministro de energía externa aplicados al sistema. En primer lugar es posible observar que la temperatura mínima deseada para un cultivo en particular bajo determinada configuración del entorno, puede ser modificada mediante un suministro de energía externa en donde intervienen tanto el parámetro de intensidad como su período de aplicación. Esto es de particular importancia, debido a que, la combinación adecuada de estos parámetros tiene un impacto directo sobre la eficiencia energética del sistema y por consiguiente un impacto económico para el productor.

Por otro lado, si se emplea un suministro de energía de origen termofílico como el propuesto, la intensidad de flujo de calor y su disponibilidad, tienen un límite establecido por las características del reactor termofílico y de la disponibilidad de desechos orgánicos, lo cual representa un importante aspecto a considerar tanto en el diseño como en la operación del sistema para asegurar las condiciones adecuadas del cultivo.

Otro aspecto importante relacionado con el suministro de energía termofílica al sistema de invernadero, es la conveniencia de aprovechar los desechos orgánicos que se producen en el mismo invernadero como fuente de energía y su posterior aprovechamiento como composta para el enriquecimiento del sustrato de cultivo. Adicionalmente a estos beneficios, existe una producción de metano que puede ser empleado en casos de emergencia, como complemento del sistema de calentamiento o para períodos extremadamente fríos. Si bien los estudios reportados por Cummings y Jewell [13] están fundamentados en el uso de desechos orgánicos de origen animal, que son comunes en zonas rurales adecuadas para un sistema de invernadero, existen otros estudios que emplean desechos orgánicos de origen vegetal con resultados semejantes y que podrían ser explorados para el diseño de sistemas mixtos.

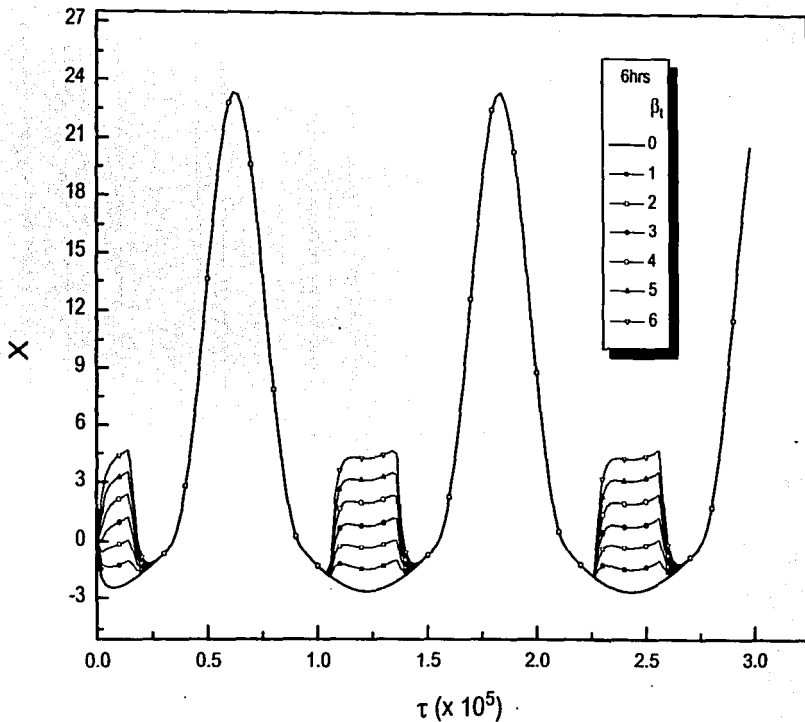
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 4.1 Temperaturas Adimensionales de la Cubierta (X), el Aire Interior (Y) y el Cultivo (Z) sin suministro adicional de energía ($\beta_i=0$).



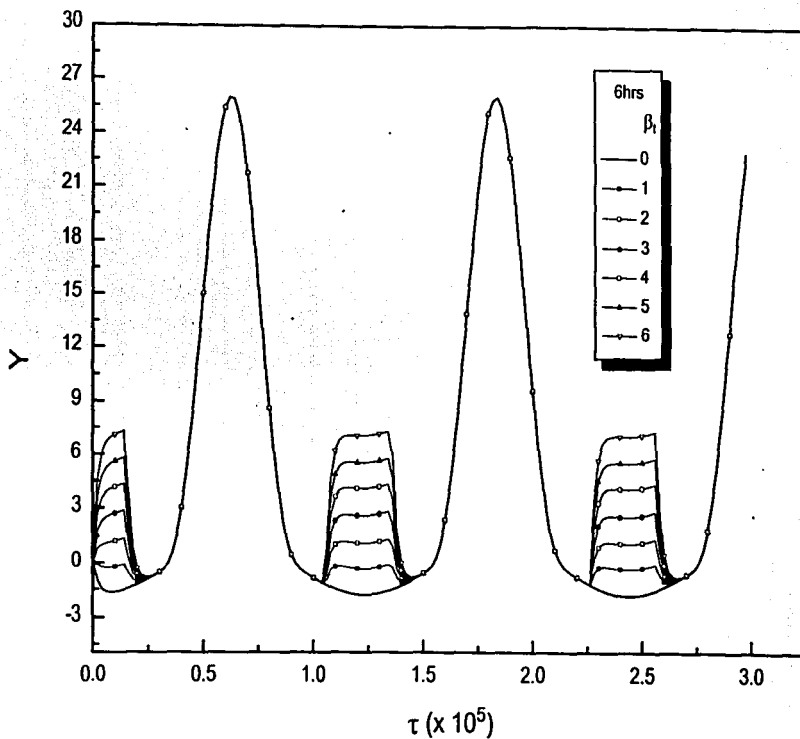
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 4.2 Temperatura Adimensional de la Cubierta (X) con periodos de 6 horas de aplicación de energía termofilica (β_1) de distintas intensidades.



TESIS CON
FALTA DE ORIGEN

Figura 4.3 Temperatura Adimensional del Aire Interior (θ) con periodos de 6 horas de aplicación de energía termofílica (β_1) de distintas intensidades.



TESIS CON
FALTA DE ORIGEN

Figura 4.4 Temperatura Adimensional del Cultivo (Z) con periodos de 6 horas de aplicación de energía termofílica (β_1) de distintas intensidades.

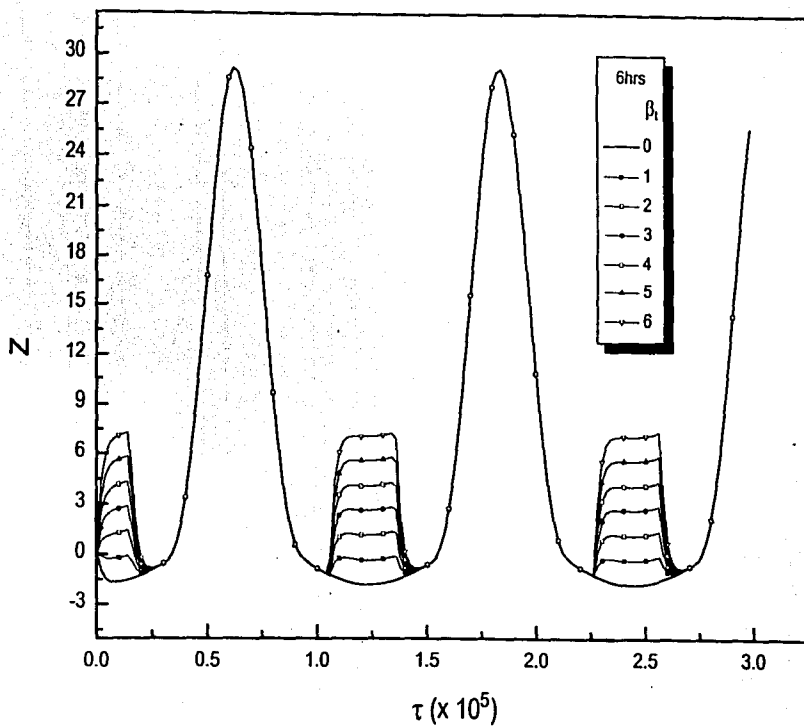


Figura 4.5 Temperatura Adimensional de la Cubierta (X) con periodos de 12 horas de aplicación de energía termoflica (β_t) de distintas intensidades.

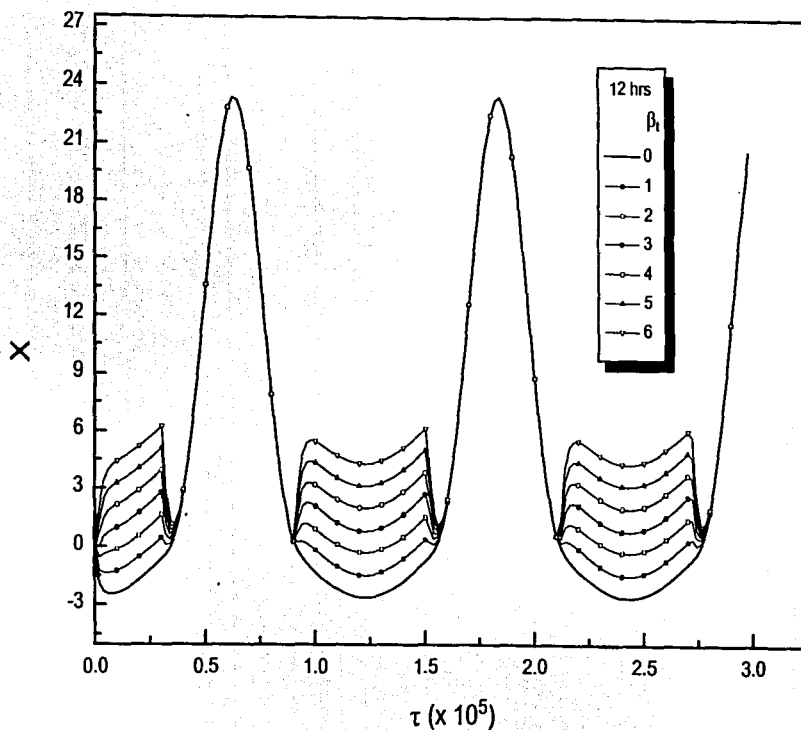


Figura 4.6 Temperatura Adimensional del Aire Interior (γ) con periodos de 12 horas de aplicación de energía termofílica (β_t) de distintas intensidades.

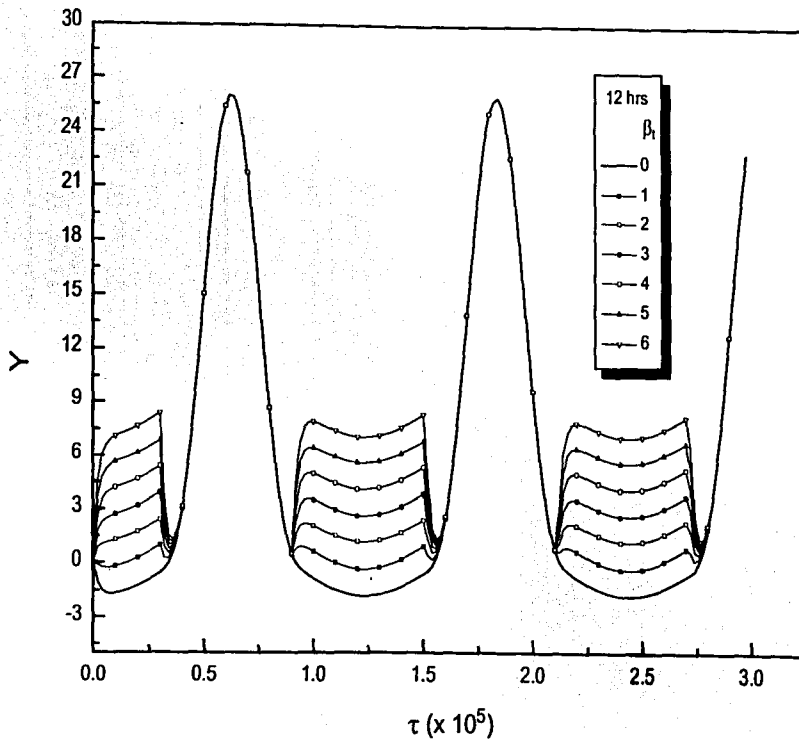
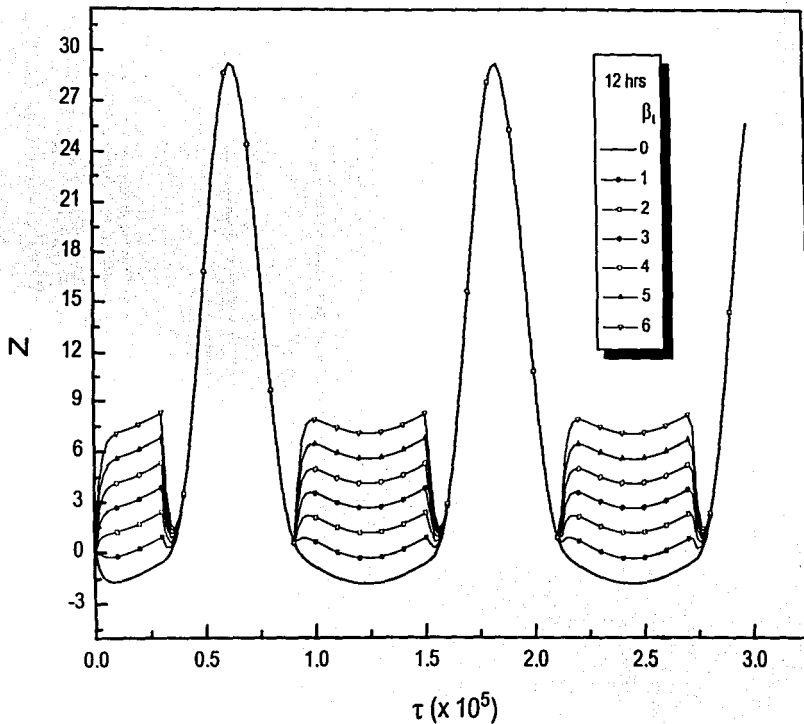
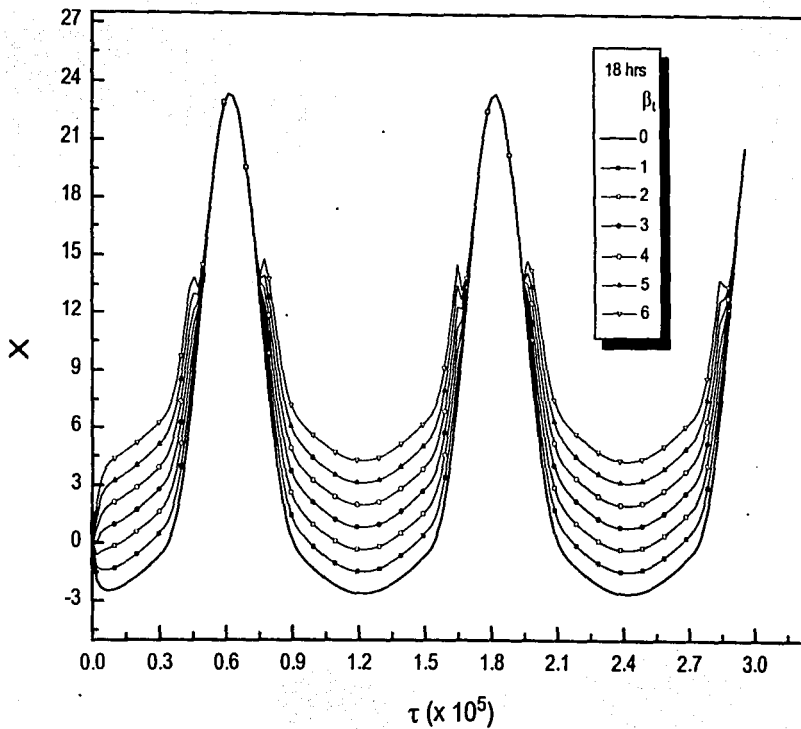


Figura 4.7 Temperatura Adimensional del Cultivo (Z) con periodos de 12 horas de aplicación de energía termofílica (β_t) de distintas intensidades.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 4.8 Temperatura Adimensional de la Cubierta (X) con períodos de 18 horas de aplicación de energía termofílica (β_1) de distintas intensidades.



55

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 4.9 Temperatura Adimensional del Aire Interior (γ) con periodos de 18 horas de aplicación de energía termofílica (β_1) de distintas intensidades.

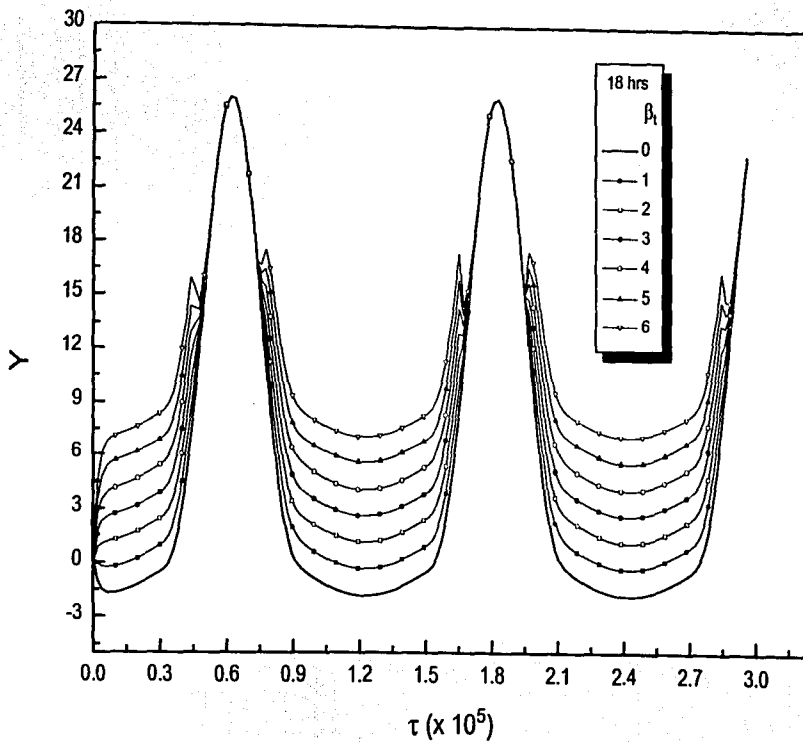


Figura 4.10 Temperatura Adimensional del Cultivo (Z) con periodos de 18 horas de aplicación de energía termofílica (β_1) de distintas intensidades.

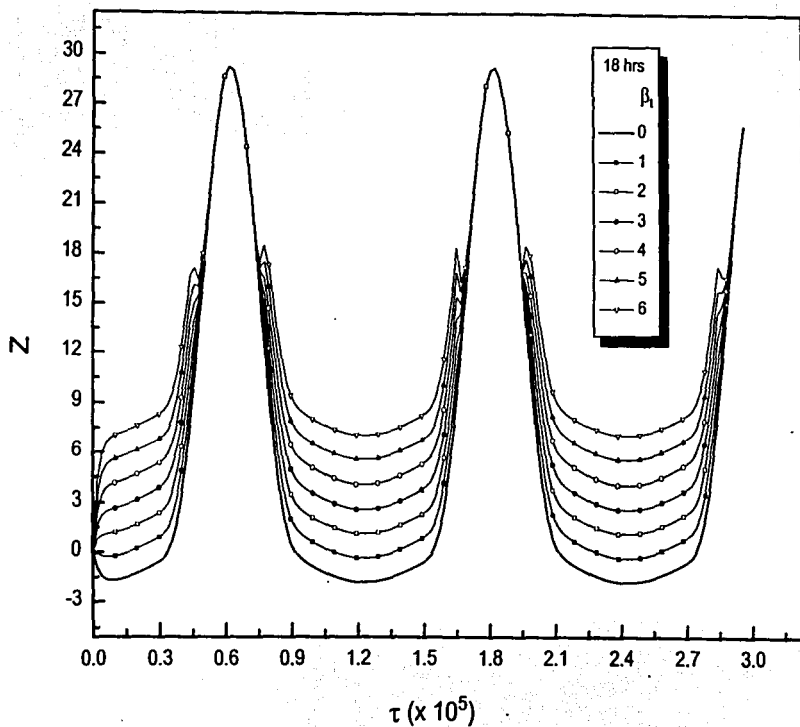
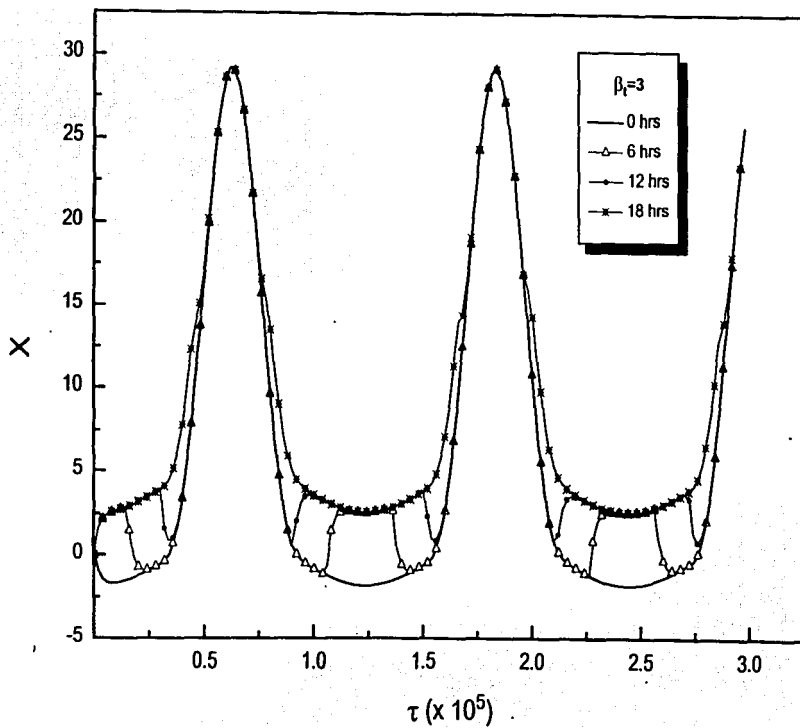
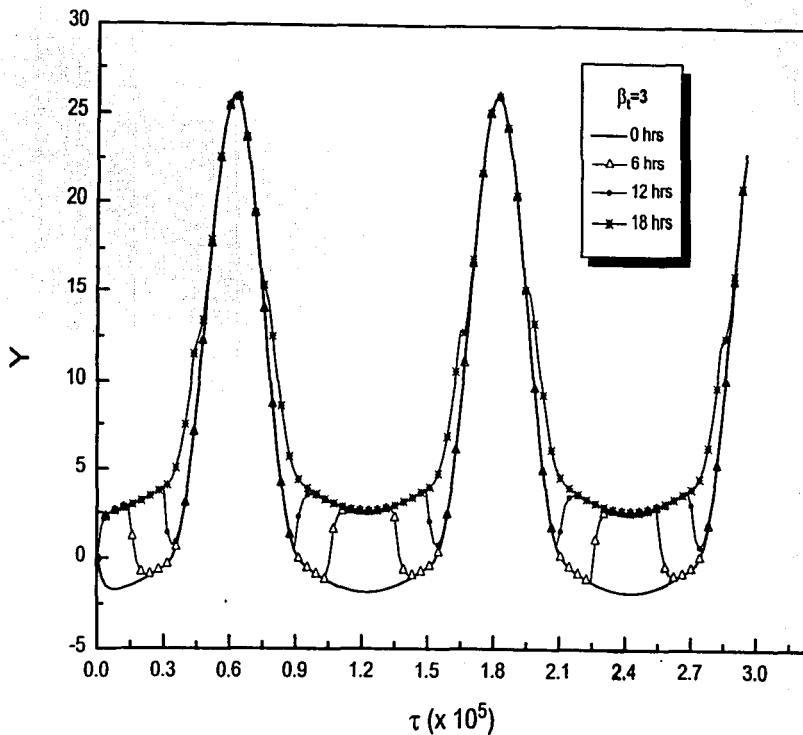


Figura 4.11 Temperatura Adimensional de la Cubierta (λ) con distintos periodos de aplicación de energía termofílica (β) de una misma intensidad.



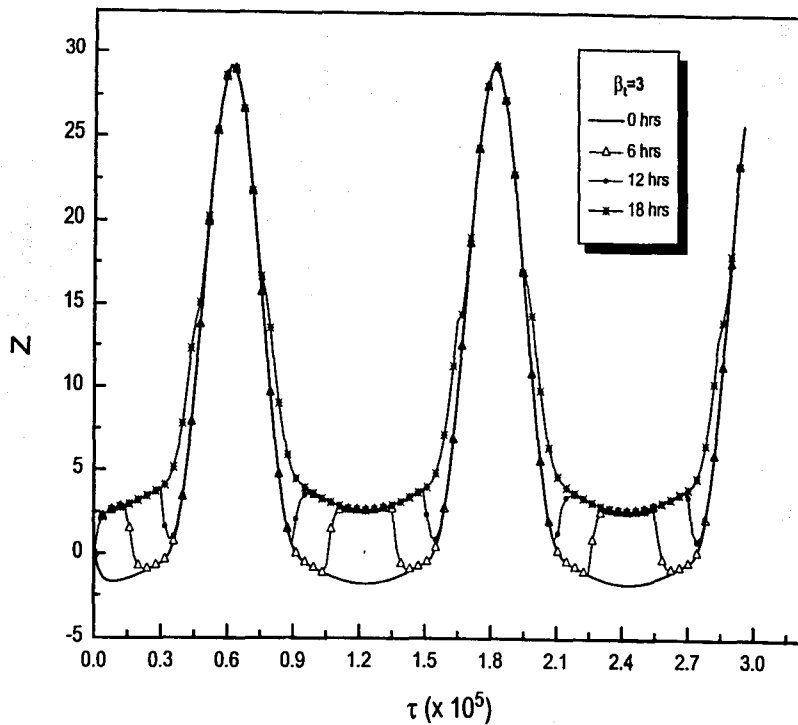
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 4.12 Temperatura Adimensional del Aire Interior (γ) con distintos periodos de aplicación de energía termofílica (β) de una misma intensidad.



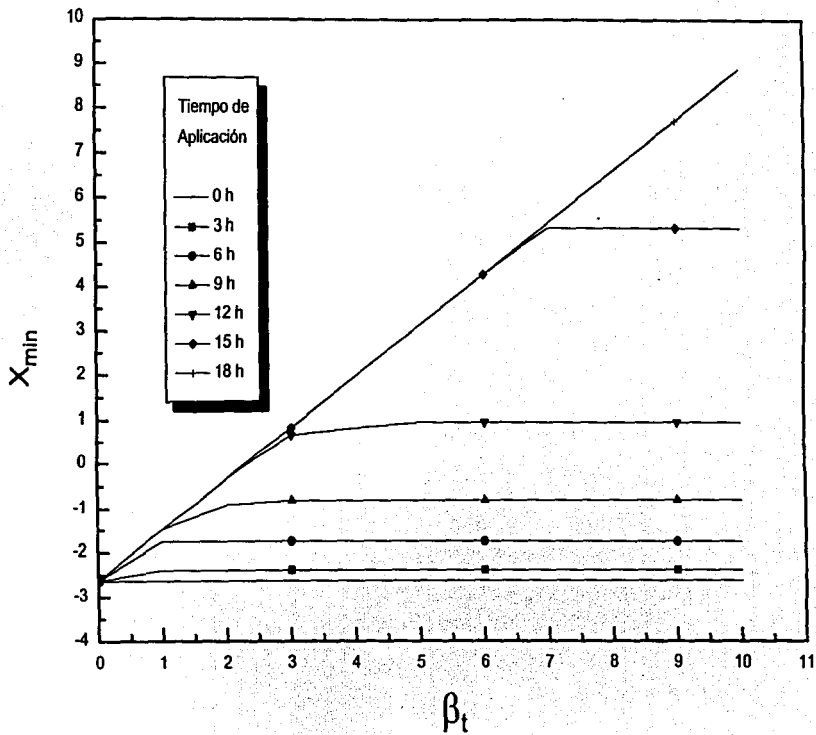
TESIS CON
FALTA DE ORIGEN

Figura 4.13 Temperatura Adimensional del Cultivo (Z) con distintos períodos de aplicación de energía termofílica (β_t) de una misma intensidades.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 4.14 Comparativo de los valores mínimos de Temperatura Adimensional de la Cubierta (X_{min}) para distintos periodos de aplicación de energía termoflica (β_t).



TESIS CON
FALTA DE ORIGEN

Figura 4.15 Comparativo de los valores mínimos de Temperatura Adimensional del Aire Interior (Y_{min}) para distintos periodos de aplicación de energía termofílica (β_t).

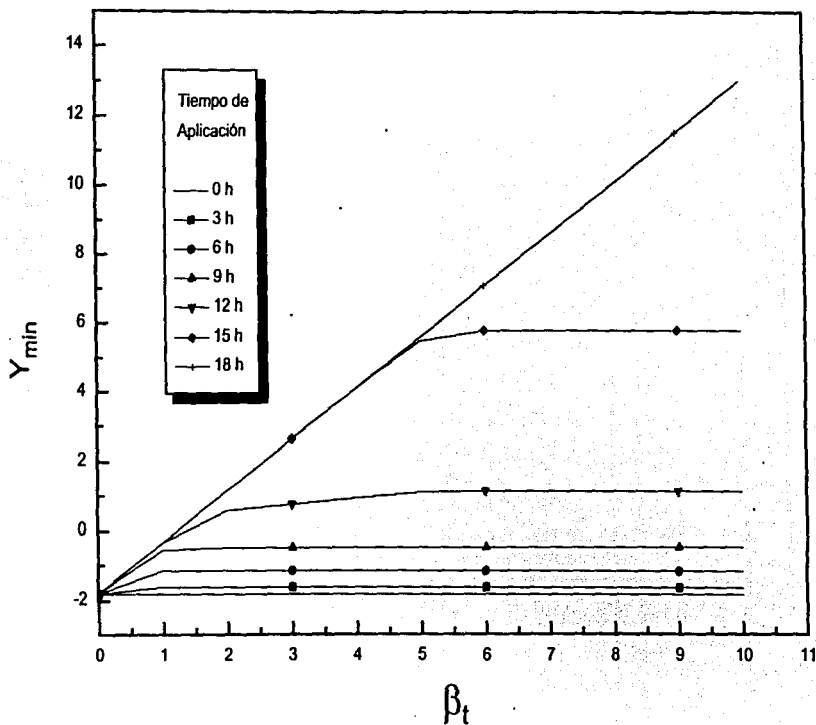
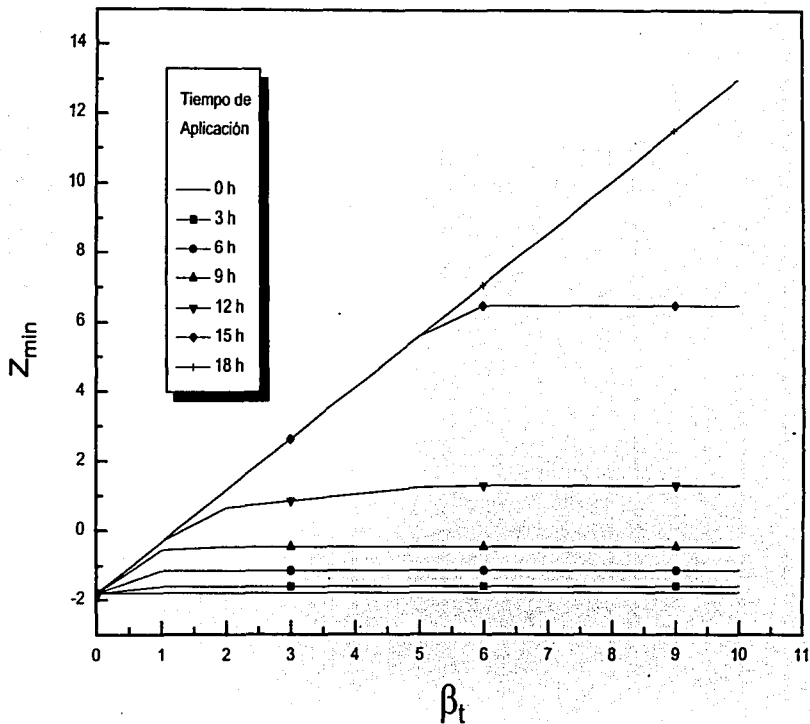


Figura 4.16 Comparativo de los valores mínimos de Temperatura Adimensional del Cultivo (Z_{min}) para distintos periodos de aplicación de energía termofílica (β_t).



Apéndice

Método de Runge-Kutta

Existen diversas variantes del Método de Runge-Kutta, todas fundamentadas en el mismo principio y empleadas para resolver ecuaciones diferenciales de primer orden, semejantes a la ecuación siguiente:

$$\begin{aligned}y' &= F(x, y) \\ y(x_0) &= y_0\end{aligned}\tag{A.1}$$

Este método de solución está basado en una aproximación obtenida mediante el truncamiento de la expansión en Series de Taylor de la variable dependiente en la forma siguiente:

$$y_{n+1} = y_n + hy'_n + \frac{h^2}{2} y''_n + \frac{h^3}{6} y'''_n + \dots\tag{A.2}$$

Realizando las derivaciones correspondientes en la ecuación (A.2); introduciendo una serie de parámetros y reordenando términos, es posible encontrar una ecuación para calcular y_{n+1} cuya forma será:

$$\begin{aligned}y_{n+1} &= y_n + h\alpha_0 F(x_n, y_n) + \alpha_1 F(x_n + \mu_1 h, y_n + b_1 h) + \alpha_2 F(x_n + \mu_2 h, y_n + b_2 h) + \dots + \\ &\quad + \alpha_p F(x_n + \mu_p h, y_n + b_p h)\end{aligned}\tag{A.3}$$

Los parámetros $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p; \mu_1, \mu_2, \dots, \mu_p; b_1, b_2, \dots, b_p$ deberán ser determinados de tal manera que si el miembro derecho de la ecuación (A.3) fuera expandido en potencias de h , los coeficientes de un determinado número de términos precedentes coincidan con los coeficientes correspondientes de la ecuación (A.2). Expresando las b 's en la ecuación (A.3) como una combinación lineal de los valores precedentes de F es posible escribir la aproximación en la forma:

$$y_{n+1} = y_n + \alpha_0 k_0 + \alpha_1 k_1 + \dots + \alpha_p k_p\tag{A.4}$$

en donde:

$$\begin{aligned}
k_0 &= hF(x_n, y_n); \\
k_1 &= hF(x_n, \mu_1 h, y_n + \lambda_{10} k_0); \\
k_2 &= hF(x_n, \mu_2 h, y_n + \lambda_{20} k_0 + \lambda_{21} k_1); \\
&\dots; \\
k_p &= hF(x_n + \mu_p h, y_n + \lambda_{p0} k_0 + \lambda_{p1} k_1 + \dots + \lambda_{p,p-1} k_{p-1})
\end{aligned}
\tag{A.5}$$

y donde los coeficientes α_i , μ_i y λ_i deberán ser determinados.

De esta manera, para obtener distintos grados de precisión y tiempo de procesamiento se selecciona el valor de p . Con esto se obtienen los correspondientes valores de k necesarios para la obtención de un valor aproximado de y_{n+i} .

Estos resultados pueden ser generalizados para un sistema de ecuaciones diferenciales. Para esto se requiere obtener un conjunto de parámetros k para cada una de las variables dependientes y involucradas en el sistema de ecuaciones diferenciales.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Bibliografía

Referencias:

- [1] A. D. Glushchenko, Fan Suan Zung. 1994. Solar Energy as a Cause of Drop wise Water Ejection from Plant Leaves in Transpiration, Applied Solar Energy, Allerton Press, Inc.
- [2] Dean, A. C. R., y Hinshelwood, C. 1986. *Growth, Function and Regulation in Bacterial Cells*. Oxford University Press, London.
- [3] Passioura, J. B. 1979. *Accountability, Philosophy and Plant Physiology*.
- [4] Simon, H. A. 1992. *The Architecture of Complexity*, Proc. American Philosophical Society.
- [5] Charles-Edwards, D. A. 1982. *Physiological Determinants of crop Growth*. Academic Press, Sydney.
- [6] Greenwood D. J. 1991. *Crop Response to Agricultural Practice. In Mathematics and Plant Physiology*, Academic Press, London.
- [7] Charles-Edwards D. A. 1986. *Modeling Plant Growth and Development*. Academic Press, Australia.
- [8] Thornley Jhon H. M.. 1990. *Plant and Crop Modeling*. Clarendon Press, Oxford.
- [9] Takakura T.. 1993. *Climate Under Cover, Digital Dynamic Simulation in Plant Bio-Engineering*, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- [10] Hanan Joe J., Holley Winfred D., Goldsberry Kenneth L.. 1978. *Greenhouse Management*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- [11] Matallana A., Montero J. I. 1988. *Invernaderos diseño, construcción y climatización*, Ediciones Mundi-Prensa, España.
- [12] Wiegant W. M., Lettinga G. 1985. *Thermophilic Anaerobic Digestion of Sugars in Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors*, Agricultural University, Department of Water Pollution Control, BC Wageningen, The Netherlands.
- [13] Cummings R. J., Jewell W. J. 1994. *Autoheated Thermophilic Aerobic Digestion with Air Aeration: Full Scale Application to Dairy Waste*, Report of the Department of Agricultural Engineering, Cornell University, Ithaca, New York.
- [14] Incropera Frank P., DeWitt David P. 1996. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, School of Mechanical Engineering, Purdue University, John Wiley & Sons. New York.



- [15] Callister William D. Jr. 2000. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. Department of Metallurgical Engineering, The University of Utah, John Wiley & Sons, Inc. New York.
- [16] Jordan, Richard Charles, Liu, Benjamin Y.h. 1977. *Applications of Solar Energy for Heating and Cooling of Buildings*, American society of heating, New York.
- [17] Vardiashvili A. B., Kim V. D., Faiziev T. A. 1993. *Thermal Condition of a Trough With Substrate and Thermal Storage Channel in a Solar Greenhouse*, Applied Solar Energy, Allerton Press, Inc.
- [18] Gieck, Kurt 1993. *Manual de Fórmulas Técnicas*, Alfaomega, México.
- [19] Markov I. E.. 1990. *Investigation of Radiation Conditions and Productivity of Cucumber and Tomato in Greenhouse with Rolled Glass*, Applied Solar Energy, Allerton Press, Inc.

Consultas:

- [20] Ahmed Hamza H. Ali, H. Saito, I. M. S. Taha, K. Kishinami, I. M. Ismail. 1998. *Effect of Aging, Thickness and Color on Both the Radiative Properties of Polyethylene Films and Performance of the Nocturnal Cooling Unit*, Energy Conversion Management, Great Britain.
- [21] Al-Riahi M., Al-Jumaily K. J., Ali H. Z.. 1998. *Modeling Clear Weather Day Solar Irradiance in Bagdad*, Iraq, Energy Conversion Management, Great Britain.
- [22] Avezov R. R., Niyazov S. K., Abdullayev A. 1993. *Effect of the Orientation of the Transparent Film Cover of a Greenhouse on the Efficiency of Solar Energy Utilization*, Applied Solar Energy, Allerton Press, Inc.
- [23] Bejan A. 1993. *Heat Transfer*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [24] Bogoslovskii, V. N. 1982. *Engineering Heat Physics*, Vysshaya Shkola, Moscow.
- [25] Ekechukwu O. V., Norton B. 1998. *Effects of Seasonal Weather Variations on the Measured Performance of a Natural-Circulation Solar-Energy Tropical Crop Dryer*, Energy Conversion Management, Great Britain.
- [26] Francis B. Hildebrand. 1992. *Methods of Applied Mathematics*, Dover, New York.
- [27] Gorshenin V. P. 1993. *Mathematical Model of a Nonstationary Heat and Moisture Regime in Greenhouse With Evaporation Cooling of the Ambient Air*, Applied Solar Energy, Allerton Press, Inc.
- [28] Ifeadi, C. N., Brown J. B. Jr. 1994. *Technologies Suitable for Recovery of Energy from Livestock Manure*, Cornell Agric. Waste Management Conf.

- [29] Kim V. D., Vardiyashvili A. B. 1993. *Investigation of Mass and Heat Transfer in Solar Greenhouses with Dropwise Condensation*, Applied Solar Energy, Allerton Press, Inc.
- [30] Kreith Frank, Bohn Mark S. 1986. *Principles of Heat Transfer*, Harper & Row, Publishers, Inc., New York.
- [31] Markov I. E., Markova S. I. 1994. *Optimization of the Radiation Regime for Plants Cultivated in Protected Soil*, Applied Solar Energy, Allerton Press, Inc.
- [32] Mezilov K. A., Chuguevets T. A., Khairiddinov B. E., Ergashev A. A. 1993. *Solar Greenhouse as a Complex System*, Numerical Analysis, Applied Solar Energy, Allerton Press, Inc.
- [33] Mezilov K. A., Khairiddinov B. E., Chuguevets T. P., Ergashev A. A. 1992. *A Solar Greenhouse as a Complex System, II. Mathematical Modeling of Transpiration and Transfer Processes in the Soil*, Applied Solar Energy, Allerton Press, Inc.
- [34] Nakamura Shoichiro. 1992. *Métodos Numéricos Aplicados con Software*, Prentice Hall Hispanoamericana, México.
- [35] Norman Morrison. 1994. *Introduction to Fourier Analysis*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [36] Rybakova L. E., Gurbanova G., Shukurov A. 1981. *A Greenhouse With a Closed Hydraulic Cycle and its Thermal Engineering Design*, Applied Solar Energy, Allerton Press, Inc.
- [37] Rybakova L. E., Penzhiev A. M. 1990. *Savings of Heat in a Trench Greenhouse*, Applied Solar Energy, Allerton Press, Inc.
- [38] Sharma P. K., Tiwari G. N. 1999. *Parametric Study of a Greenhouse by using Runge-Kutta Methods*, Energy Conversion & Energy, Elsevier Science Ltd.
- [39] Van den Berg L., Lentz C. P. 1985. *Anaerobic Digestion of Pear Waste: Laboratory Equipment Design and Preliminary Results*, Canadian Institute of Food Technology, Ontario, Canada.
- [40] Vardiashvili A. B. 1987. *Nonsteady-State Heat Transfer in a System With a Substrate and Subsurface Thermal Storage in a Greenhouse*, Applied Solar Energy, Allerton Press, Inc.
- [41] Vardiashvili A. B., Lebedev V. A., Rubtsov N. A., Sorokin A. L. 1988. *Numerical Modeling of Radiant-Convective Heat Exchange in a Greenhouse With a Diathermic Volume of the Medium*, Applied Solar Energy, Allerton Press, Inc.
- [42] Vardiashvili A. B., Rubtsov N. A. 1992. *Radiation-Thermal Conditions in Multispan Greenhouses With Solar Heating*, Applied Solar Energy, Allerton Press, Inc.

- [43] Waterman N. A., Ashby M. F., 1997. *The Materials Selector*, Vol. 3, Chapman & Hall, Great Britain.
- [44] Wiegant W. M., Lettinga G. 1985. *Thermophilic Anaerobic Digestion of Sugars in Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors*, Agricultural University, Department of Water Pollution Control, BC Wageningen, The Netherlands.