

1-1-2007

Simulación y control de la temperatura dentro de un invernadero

Hernando Pérez Rojas

Martín de Paúl Cortés

Follow this and additional works at: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_automatizacion

Citación recomendada

Pérez Rojas, H., & Cortés, M. d. (2007). Simulación y control de la temperatura dentro de un invernadero. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_automatizacion/129

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería en Automatización by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact ciencia@lasalle.edu.co.

SIMULACION Y CONTROL DE LA TEMPERATURA DENTRO DE UN
INVERNADERO.

Hernando Perez Rojas 44011003

Martin de Paul Cortes 44011027

Trabajo de grado para optar al titulo de
Ingeniero de Diseño y Automatización Electrónica

UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERIA DE DISEÑO Y AUTOMATIZACION ELECTRONICA
BOGOTA D. C.

2007

DEDICATORIA

Mas que una dedicatoria es un reconocimiento muy especial y con agrado afecto a todos aquellos que hicieron posible este sueño, porque con su apoyo y confianza nos dieron el valor para que día a día nuestros objetivos se hicieran realidad, gracias a nuestros padres, hermanos y a Dios especialmente...

AGRADECIMIENTOS

- **A Dios porque con su luz divina nos irradia de sabiduría para desarrollar y aportar un bien a la humanidad.**
- **A nuestros padres porque simplemente sin ellos no sería posible la presente y porque son la razón de la existencia.**
- **A nuestro asesor el Ingeniero José Antonio Tumialan, con su tiempo, dedicación y conocimientos contribuyó al éxito de dicho proyecto.**
- **A la Universidad y la facultad que nos suministraron los recursos necesarios pero el buen desarrollo y elaboración de nuestra formación profesional y personal**

Contenido

Capitulo I:

Glosario	Pág 9
<i>Introducción</i>	13
1. Resumen.	14
1.2 Identificación del problema.	15
1.3 Justificación.	16
1.4 Problemática del control de un invernadero.	17
1.5 Líneas de investigación en control de invernaderos.	19
1.6 Objetivo general.	22
1.6.1 Objetivos específicos.	22

Capitulo II:

<i>Descripción del invernadero.</i>	23
2. Marco teórico.	23
2.1 Invernaderos.	23
2.2 Variables climáticas.	23
2.2.1 Temperatura.	24
2.2.2 Humedad relativa.	24
2.2.3 Radiación luminosa.	24
2.2.4 Concentración de CO ₂ .	25
2.3 Clases de invernadero según su construcción.	25
2.3.1 Invernadero de capilla.	26
2.3.2 Invernadero de doble capilla.	27
2.4 Materiales empleados en las estructuras.	27
2.5 Ventajas y desventajas de la implementación de un invernadero.	29
2.6 Parámetros a considerar en el control climático.	29
2.6.1 Temperatura.	30
2.6.2 Humedad relativa.	31
2.6.3 Iluminación.	32
2.6.4 Dióxido de carbono (CO ₂).	32
2.7 Control ambiental.	33

2.7.1 Climatización de invernaderos durante periodos fríos.	33
2.7.2 Sistemas de calefacción.	34
2.7.2.1 Calefacción por agua caliente.	34
2.7.2.2 Calefacción por aire caliente.	35
2.7.3 Empleo de pantallas térmicas.	36
2.8 Control de procesos.	37
2.9 Productos de control y monitorización de invernaderos.	38
2.9.1 Priva nutri control ibérica (España).	39
2.9.2 Box telematics (Gran Bretaña).	39
2.9.3 WTC (EEUU).	39
2.9.4 Amplia Wíreless Communications Software (España).	39
2.9.5 Eldar Shany Agricultural Control (Israel).	39
2.9.6 ACM (España).	40
2.9.7 Hortimax (Países bajos).	40
2.9.8 Brinkman (Países Bajos).	40
2.9.9. Voltimac (Dinamarca).	40
2.10 Aire atmosférico.	40
2.11 Propiedades termodinámicas del aire húmedo.	41
2.12 Estudio del modelo.	42
2.12.1 Volúmenes de control.	42
2.12.2 El proceso de flujo permanente.	42
2.12.3 Conservación de la masa.	43
2.12.4 Conservación de energía.	44
2.12.5 Descripción detallada del invernadero a simular.	47

Capitulo III:

<i>Modelamiento y simulación de la planta</i>	49
3.1 Reporte agrometereológico de la sabana de Bogota.	49
3.2 Modelo dinámico del clima en invernaderos (con densidad de aire constante).	53
3.3 Modelo de la temperatura del invernadero ecuación	56
3.4 Simulación.	61
3.4.1 Simulación de la temperatura del suelo del invernadero.	61
3.4.2 Simulación de la temperatura en el invernadero.	62
3.4.3 Aproximación de la simulación al modelo.	63

Capitulo IV:

<i>Control y emulación.</i>	65
4.1 Control.	65
4.1.1 Criterio de Routh-Hurtwiz.	65
4.1.2 Diseño del controlador por el método de Ziegler-Nichols.	67
4.1.2.1 Control Proporcional (P).	68
4.1.2.2 Control Proporcional Integrativo (PI).	69
4.1.2.3 Control Proporcional Integral Derivativo (PID).	70
4.2 Emulación.	72

Capitulo V:

Recomendaciones	74
------------------------	-----------

Capitulo VI:

<i>Conclusiones</i>	75
----------------------------	-----------

Capitulo VII:

<i>Presupuesto</i>	76
---------------------------	-----------

Capitulo VIII:

<i>Bibliografía.</i>	77
-----------------------------	-----------

Capitulo IX:

<i>Anexos.</i>	78
-----------------------	-----------

Lista de figuras

Figura 1. Invernadero.	23
Figura 2. Vista isométrica del invernadero.	47
Figura 3. Vista frontal del invernadero.	48
Figura 4. Vista lateral del invernadero.	48
Figura 5. Diagrama de variables.	53
Figura 6. Modelo climático del invernadero.	54
Figura 7. Simulación de la temperatura del suelo en el invernadero.	61
Figura 8. Simulación de la temperatura en el invernadero.	62
Figura 9. Aproximación del modelo.	63
Figura 10. Curva característica de la respuesta del sistema a una entrada escalón.	64
Figura 11. Diagrama de Bode, magnitud y fase del sistema.	66
Figura 12. Diagrama de bloques del control P.	69
Figura 13. Respuesta del sistema con control P a una entrada escalón.	69
Figura 14. Diagrama de bloques del control PI.	70
Figura 15. Respuesta del sistema con control PI a una entrada escalón.	70
Figura 16. Diagrama de bloques del control PID.	71
Figura 17. Respuesta del sistema con control PID a una entrada escalón.	71
Figura 18. Diagrama de Bloques de la emulación de la planta	72
Figura 19. Planta física emulada en Visual Nastran.	72
Figura 20. Comportamiento de los actuadores en Visual Nastran.	73

Lista de tablas

Tabla 1. Temperaturas requeridas para distintas especies.	30
Tabla 2. Propiedades físicas	49
Tabla 3. Materiales de cubierta para invernaderos.	52
Tabla 4. Cálculo del control por el método Ziegler-Nichols.	67

GLOSARIO.

Temperatura: La temperatura es un factor determinante de la actividad metabólica, el crecimiento, el desenvolvimiento del vegetal y también en el control de la morfología del vegetal. Para la manipulación de la temperatura es importante conocer las limitaciones y necesidades de cada especie cultivada. Por ejemplo las hortalizas comestibles como el pimentón, tomate, berenjena y pepino, entre otras, poseen una necesidad mínima de temperatura en torno a los 12 °C, abajo del cual ocurre un crecimiento en la presencia de síntomas de deterioro. Por otro lado a partir de un valor, que oscila entre 35-40 °C, se reduce la sintetización proteínica. Desde el punto de vista de la temperatura, son parámetros importantes:

-temperaturas máximas y mínimas biológicas: son valores específicos para el alcance de una determinada fase vegetativa, como la florificación y fructificación, entre otras.

-Temperaturas diurnas y nocturnas: niveles recomendados para el correcto desenvolvimiento del vegetal.

Humedad Relativa: La humedad relativa esta relacionada con el rendimiento de los vegetales. Cuando es elevada, los vegetales reducen la transpiración, y consecuentemente reducen su crecimiento, pudiendo ocurrir incluso abortos florales por aumento de las enfermedades causadas por hongos o bacterias. Por otro lado, cuando la humedad relativa es baja los vegetales transpiran en exceso, lo que causa deshidratación.

Radiación Luminosa: La radiación luminosa es un componente esencial para que ocurra la fotosíntesis, que es un proceso de síntesis orgánica realizado por los vegetales portadores de clorofila. El sol es el principal abastecedor de esta energía radiante, que llega a la tierra principalmente en forma de rayos ultravioleta. En el espectro de frecuencia de radiación solar se encuentra en un intervalo particular, entre 400-700 nm, en la cual ocurre el proceso de fotosíntesis. Este intervalo es conocido como radiación fotosintética activa, representada comúnmente por la sigla inglesa PAR (Photosynthetically Active Radiation). Existen dos dimensiones de la radiación que deben ser resaltadas. La primera es la intensidad de la luz y la segunda el fotoperiodo (periodo de la duración de la luz). La intensidad es responsable de la maximización del crecimiento de la planta y el fotoperiodo es responsable del metabolismo. El control de la radiación es benéfico como un complemento para invernaderos con bajo nivel de luz natural. Puede ser utilizado para extender la duración natural del día.

Concentración De Co2: El carbono es un nutriente esencial de los vegetales.

Existen estudios que demuestran que alrededor del 40 % de la planta seca se compone de carbono. La planta obtiene el carbono presente en el CO₂ atmosférico a través de la fotosíntesis. La concentración ideal del CO₂ depende de los requerimientos, peor para todos existe un punto óptimo. La mayoría de cultivos requieren de concentraciones de CO₂ entre 1000-1500 ppm (partes por milla). Existiendo algunas especies que responden de manera positiva a concentraciones de hasta 1800 ppm.

Nomenclatura de los parámetros utilizados en el modelo de temperatura en el suelo.

As=3136
Auc=2456,19
Au=337,12
Al=614,05
El=0,95
Es=0,7
Ec=0,8534
Esc=0,9
Eri=0,95
Eu=0,95
Euc=0,95
Fl.c=0,4267
Fuc.s=0,0733
Fu.s=0,0733
Fs.c=0,4267
Fs.ri=0,007218
Fs.sc=0,0007218
sigma=0,0000000567051
lambda_s=0,86
dxs=1,247
rhos=1154,41
Cp.s=1500
rhoH2O=998
rhoa=1,29
Cp.a=1000
Vs=2038,40
Io=0
news.is=0,1323
alphaa.s=1,7
Ta=14
Ts=14,89
Tl=14,5
Tc=13
Tuc=13,5
Tri=15
Ts2=14,5

Tsc=14,2
Tu=13,4

rhoc=700
rhor=2500
rhosc=1500
Cp.sc=1500
Cp.r=840
Cp.H2O=4186
VI=7,83
Vc=28,22
Vuc=7,83
Vo=2,36
Vr=13,53
Vsc=1,57

Nomenclatura de los parámetros utilizados en el modelo de temperatura en el invernadero.

Tg = 12, temperatura del aire en el invernadero, [°C].
Ts = 10.3, temperatura del suelo en el invernadero, [°C].
CI = 0,0035, concentración de CO2 en el invernadero, [g/m³].
VI = 0.9709, Vapor de agua dentro del invernadero, [Kg/m³].

To = 19.5, Temperatura aire exterior, [°C].
Tp = Temperatura tubería de calentamiento, [°C].
G = radiación solar onda corta, [watt/m²]
CO = concentración de CO2 exterior, [g/m³].
Vo = concentración de Vapor de agua exterior, [Kg/m³].
W = velocidad del viento, [m/s].
Qf = consumo de agua por nebulizadores, [m³/s].
Φfan = flujo de ventilación por extractores, [m/s].
Cp = 1010, calor específico del aire, [Joules/Kg*°C].
Cg = 602336, capacidad de calor del aire en el invernadero, [Joules/°C*m²].
Cs = 120000, capacidad de calor del suelo en el invernadero, [Joules/°C*m²].
CH = 2010, calor específico del vapor de agua, [Joules/Kg*°C].
Kr = 0,3349, transferencia de calor con el techo, [watt/°C*m²].
Ks = 5,75, transferencia de calor con el suelo, [watt/°C*m²].
η = 0.7, factor de conversión de radiación
Kd = 2, transferencia de calor de suelo a suelo, [watt/°C*m²].
α = 0, transferencia de calor con la tubería de calentador, [watt/°C*m²].
Z = 0.6, radiación solar efectiva por malla sombra.
A_g = 40, área del invernadero, [m²].
V_g = 133, volumen del invernadero, [m³].
W_l = 0,075 peso seco de follaje, [Kg/m²].
M_aire = 179,4, densidad del aire seco a 0°C, [Kg/ m³].

$\rho = 998$, masa específica del agua, [Kg/m³]
 $P_{atm} = 75,2$ presión atmosférica del aire, [KPa].
 $\omega = 0,622$, razón de humedad.
 $q = 10$, radiación evaporación, [m²/Kg].
 $r = 10$, déficit evaporación presión de vapor, [m²/Kg]
 $n = 0,098$, parámetros de radiación.
 $\gamma = 0,067$, densidad del aire seco a 20°C, [KPa/°C].
 $\varepsilon = 3$, resistencia de calor entre la cubierta interior y exterior.
 $S_1 = 0,0001841$, presión de vapor agua saturada, [kPa/°C³]
 $S_2 = 0,0009788$, presión de vapor agua saturada, [kPa/°C²]
 $S_3 = 0,05149$, presión de vapor agua saturada, [KPa/°C]
 $\Lambda = 461,5$, constante de presión, [J/Kg-°C].
 $a_1 = 0,611$, presión de vapor para saturación, [kPa].
 $a_2 = 17,27$, presión de vapor para saturación
 $a_3 = 239$, presión de vapor para saturación [°C].
 $L_1 = 2,501E+06$, coeficiente de energía de vaporización, [J/Kg].
 $L_2 = 2381$, coeficiente de energía de vaporización, [J/Kg-°C].
 $g_b = 0,01$, conductancia límite de frontera, [m/s].

$g_1 = 0,0203$, conductancia del follaje, [m/s].
 $g_2 = 0,44$, conductancia del follaje.
 $g_3 = 0,0568$, conductancia del follaje [m²-s/kg].
 $g_4 = 0,31$, conductancia del follaje [m³/kg].
 $m_1 = 0,000001018$, transferencia de masa, [kg/m²].
 $m_2 = 0,33$, transferencia de masa.
 $P_c = 2,129$, presión calculada, [Kpa].
 $P_g = 14,11$, presión calculada, [Kpa].
 $dT_g = 17,76$.
 $D_g = -12,72$.
 $E_o = -0,2049$.
 $g = 0,02028$.
 $G_o = 170$, [W/m²].
 $K_v = 1,359E+06$.
 $M_c = 2,387E-07$.
 $S = 0,08974$.
 $T_c = 18,63$.
 $W_c = 0,01813$
 $W_g = 0,1437$

I. INTRODUCCION

El proyecto pretende la simulación y control climático en el interior de un invernadero, de esta forma se podrá manipular la ambientación mediante un Sistema de Control de la Temperatura el cual se simulará y tiene como propósito o finalidad hallar un modelo climático adecuado que se ajuste a las condiciones del invernadero.

El proyecto queda restringido al control y regulación de parámetros interiores de humedad y radiación solar. Quedando excluido el control de parámetros como el nivel de anhídrido carbónico y del sistema de riego. Por ultimo queremos anexar que no hace parte del proyecto, el monitoreo y supervisión del invernadero.

1. RESUMEN

El cambio de las condiciones atmosféricas durante los ciclos climáticos hace necesario utilizar invernaderos para proteger ciertos cultivos. Los invernaderos son estructuras cerradas en las que se mantienen microambientes que son adecuados para un buen desarrollo de las plantas. El control efectivo de algunas variables del clima dentro del invernadero es posible con la ayuda de modelos matemáticos. En este trabajo se presenta un modelo mejorado mediante una propuesta que incluye el efecto de la humedad sobre la temperatura dentro del invernadero. Esto puede considerarse como un avance en el diseño de modelos de clima de los invernaderos. Se presentan resultados de una simulación llevada a cabo en donde se muestra la eficacia del modelo propuesto.

1.2 IDENTIFICACION DEL PROBLEMA

La agricultura tradicional en campo abierto depende del medio físico natural, siendo su éxito resultado de las circunstancias favorables del sol, clima y agua, entre otros. La necesidad creciente de producir vegetales con alta calidad, la planeación de la producción agrícola en las condiciones de un periodo, la reducción de costos por unidad de producción, con un aumento en la calidad ha llevado al aumento de la utilización de un cultivo protegido. La realización de la producción agrícola con una cierta dependencia de las condiciones climáticas puede ser obtenida a través de la utilización de casas de vegetación, comercialmente conocidas como invernaderos. Diversos estudios demuestran que las principales variables climáticas envueltas en el proceso de la producción agrícola son: la temperatura, la humedad, la luminosidad, y la concentración de gas carbónico. La presencia de estos factores, dentro de ciertos límites mínimos y máximos, proporciona condiciones propicias para la vida del vegetal, en cuanto que fuera de estos límites, se ve perjudicada su vida. Por tanto una buena política de control de esas variables se puede tornar impredecible.

1.3 JUSTIFICACION

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

En los últimos años son muchos los agricultores que han iniciado la instalación de artilugios que permiten la automatización de la apertura de las ventilaciones, radiómetros que indican el grado de luminosidad en el interior del invernadero, instalación de equipos de calefacción, etc. Por ello a continuación se exponen aquellos parámetros más relevantes que intervienen en el control climático de los invernaderos, así como una breve descripción de los sistemas para la gestión del clima que se pueden encontrar actualmente.

1.4 Problemática del control de un invernadero

Tradicionalmente, el cultivo bajo invernadero se llevaba a cabo por personal que, a pie de invernadero, manejaba sistemas manuales de actuación o como mucho semiautomáticos. En invernaderos de mayor grado de tecnificación se usaban sistemas de control del tipo ON/OFF, PI y/o PID en bucles independientes. Generalmente el sintonizado era manual mediante procedimientos de prueba y error y sin hacer uso de modelos matemáticos. Lo que evidentemente no conducía a unas prestaciones óptimas. En los últimos tiempos empiezan a desarrollarse y aplicarse sistemas con estrategias de control más sofisticadas gracias al empleo de técnicas de modelado e identificación, todo ello apoyado en las nuevas tecnologías de producción, de la información y las comunicaciones.

La problemática del control de invernaderos es fuertemente dependiente de las áreas geográficas, las soluciones que son validas en algunas regiones, deben adaptarse o cambiar para adecuarse a otras. En particular, en los países mediterráneos, los altos índices de radiación y la elevada temperatura y humedad en la época estival constituyen un factor diferenciador respecto a otras regiones del norte de Europa. Hasta ahora, una gran parte de los controladores diseñados para invernaderos se asocian a una sola variable de control, la temperatura, dando lugar a controladores monovariantes. Bajo las citadas condiciones estivales en regiones mediterráneas, ese control resultado del todo insuficiente y debe ser completado controlado con el control de la humedad, exigiendo que los controladores sean multivariantes. Si se identifican de forma conjunta estos aspectos (humedad y temperatura) como “control climático” y desde el punto de vista del ingeniero de control, este bucle multivariable se puede controlar a través de actuadores tales como ventanas, nebulizadores, mallas de sombreado, etc...., sin olvidar el sistema de calefacción.

No obstante, el control de un invernadero va más allá del control climático y pueden incorporarse nuevas variables al bucle multivariable a controlar que influyen directamente sobre el crecimiento del cultivo, en particular la radiación fotosintética activa (PAR), que es la radiación que llega directamente a la planta o la riqueza de CO₂. Nuevas variables a controlar implican actuadores adicionales, en particular sistemas productores de CO₂. Aunque estos últimos sistemas se extienden cada vez más, están limitados por su precio.

En un invernadero el control climático se complementa con el control de riego y la fertilización. No obstante, de nuevo se puede dar un enfoque multivariable y hablar del control de la fertirrigación. Respecto al control de riego, la variable que se debe controlar es la evapotranspiración compensando, a través de la variable manipulada del riego, la pérdida de humedad que se produce. Evidentemente la pérdida de humedad esta directamente relacionada con los factores climáticos de temperatura y humedad. Respecto al control de la fertirrigación, lo más habitual es

asociarlo al control de variables como el pH y la conductividad eléctrica a nivel de las raíces del cultivo, que deben tener unos valores prefijados para asegurar una buena asimilación de los fertilizantes.

Siguiendo con aspectos del modelado, el proceso multivariable así definido es además de naturaleza no lineal e influyen en los procesos biológicos que complican de una manera notable el desarrollo un modelo matemático. Ante un problema de esta envergadura surgen varias alternativas. Una de ellas es tratar el proceso como una caja negra sin utilizar información a priori y ajustar un modelo tipo red neuronal o conjunto borroso. Un importante inconveniente, si se utiliza este tipo de técnicas, es precisamente la falta de relación física entre los parámetros del modelo y las magnitudes fundamentales del cultivo que los convierte en modelos poco entendibles. Otra alternativa consiste en modelar los fenómenos físicos y fisiológicos bien conocidos que se producen en un invernadero a partir de formulación de ecuaciones de primeros principios basados en balances de masas y energía. En este caso los parámetros del modelo si tienen un significado físico, pero el problema aparece cuando se intentan ajustar muchos de esos parámetros, lo cual resulta enormemente dificultoso y provoca una importante discrepancia entre el modelo y el proceso.

La obtención de modelos fiables implica, por una parte, disponer de ecuaciones basadas en primeros principios lo suficientemente representativas de los procesos que se llevan a cabo bajo invernaderos y por otra parte disponer de una alguna técnica que permita ajustar los parámetros para reducir al máximo la discrepancias de los datos reales procedentes de los procesos bajo invernadero de los que se obtendrían de los modelos propuestos. El empleo de un optimizador a través de la minimización de un índice multivariable que minimice las discrepancias antes mencionadas es una manera adecuada de resolver el problema. Los optimizadores eurísticos como los algoritmos genéticos (AGs) presentan indudables ventajas para este cometido debido a las propiedades que tienen para resolver problemas de optimización global.

Con un adecuado modelo es posible disponer de información muy relevante de cara al control del proceso, en particular usando estrategias basadas en modelos de predicción. No obstante estas estrategias requieren la formulación de un índice que, en ocasiones, puede ser bastante complejo, tal y como sucede en este caso, donde el problema planteado viene determinado por la presencia de un modelo no lineal y por la necesidad de estar sujeto a restricciones, debido fundamentalmente a las saturaciones de los actuadores y a las exigencias en las variables controladas. Los AGs pueden, de nuevo, ser la base la optimización de estos índices.

Para abordar el problema del ajuste de un modelo, así como para la posterior incorporación de los algoritmos de control que se diseñen basados en dichos modelos, es necesario disponer de tecnología suficiente que permita desarrollar una adecuada plataforma informática y de comunicaciones que opera con un alto grado de fiabilidad. Siempre es recomendable que dicha plataforma tenga una

estructura abierta y por tanto adaptable a otras configuraciones de invernaderos.

1.5 Líneas de investigación en control de invernaderos

La investigación específica en control de procesos agronómicos tiene hoy un espacio propio, lo que se demuestra por los congresos del ámbito de la automatización que incorporan paneles específicos en agricultura y las revistas de agricultura que incorporan, cada vez más artículos con una componente de modelado y control de procesos bajo invernadero.

Si en su origen el ámbito del control de procesos agronómicos y en particular de invernaderos estaba liderado por departamentos de ingeniería agrícola y que tenían como objetivo un adecuado modelado de estos procesos, cada vez más los investigadores especialistas en el control de procesos han encontrado en este tipo de sistemas una fuente de prueba de sus algoritmos. En ocasiones ambas visiones convergen en la formación de equipos multidisciplinares.

Dentro del primer caso, hay importantes grupos de investigación radicados en países donde la producción bajo invernadero está muy extendida y que poseen una gran infraestructura para poder llevar a cabo sus investigaciones. Citar, por ejemplo, los grupos de investigación de la Universidad Technion en Haifa (Israel), el instituto INRA de Avignon (Francia) o el Instituto de ingeniería agrícola DLO de Wageningen (Holanda) o la Universidad de Cornell de NY (EEUU).

Se pasa a continuación a referenciar la bibliografía y temática que trata de centrar, con la mayor claridad posible, donde está el interés de los anteriores investigadores, de manera que el lector pueda acudir, a partir de aquí, a conocer más específicamente los avances concretos. Un trabajo pionero en la descripción del modelo de humedad de un invernadero es debido a (Staagheilitii y de Jong, 1905), basado en la obtención de un modelo no lineal de primeros principios de la humedad a través de la definición del balance de flujos de condensación, ventilación y transpiración. En este último caso se emplea la ecuación de Penman-Monteith (Monteith, 1973) que incorpora las medidas del déficit de saturación y radiación para su evaluación, este modelo sigue estando de actualidad para el diseño de la ventilación en invernaderos (Seginer, 2002). El modelo de humedad se complementa con los modelos de balance energético a diferentes niveles. De nuevo se construye una ecuación de primeros principios del balance de flujos térmicos asociados a la ventilación, convección, conducción y de calor latente debidos a la transpiración de la planta (Baillie et al, 1994; Jolliet y Bailey, 1992) que definen la evolución de la temperatura, En función de los diferentes volúmenes del invernadero y el suelo es posible definir ecuaciones de evolución de la temperatura para cada uno de ellos y que se intercambian calor. Una mayor o menor complejidad del modelo es posible en función del número de volúmenes seleccionados que dan lugar a un mayor o menor número de ecuaciones diferenciales.

El modelo climático de humedad y temperatura anterior puede ser complementado

incluyendo nuevos factores determinantes en el crecimiento del cultivo, entre otros, la dinámica del CO₂, la concentración de Nitratos. Los modelos de primeros principios son difíciles de ajustar habiéndose realizado importantes esfuerzos en el desarrollo de modelos de caja negra dentro del campo de la inteligencia artificial basados en el ajuste mediante redes neuronales, que posteriormente se emplean para ajustar un controlador basado en la optimización de un índice. Los resultados demuestran la robustez de estos diseños que filtran adecuadamente las incertidumbres producidas por algunos elementos del sistema, como por ejemplo, el tamaño de las hojas. Con esas mismas pretensiones, se ajustan modelos basados en conjuntos borrosos acciones de control correspondientes basadas en un sistema experto.

También, desde este enfoque mas agronómico, existen grupos españoles mas activos, como el Departamento de Tecnología Hortícola del IRTA de Cataluña que se dedica al desarrollo de tecnología de invernaderos, biosensores, diagnostico de estrés en plantas, etc., el grupo de Energía y Agricultura del Departamento de Ingeniería Rural de la Universidad Politécnica de Madrid que se dedica a la climatización de invernaderos, control automático, modelización climática, control de la condensación en invernaderos, etc., el Departamento de Ingeniería de Alimentos y del Equipamiento Agrícola de la Universidad Politécnica de Cartagena que se dedica al diseño, automatización, control de riegos en invernaderos, etc. y por ultimo, el departamento de Ingeniería Rural de la Universidad de Almería que desarrolla temáticas similares.

Dentro del segundo caso, desde un enfoque mas orientado al control automático, es posible encontrar trabajos que toman en consideración gran parte de las metodologías de control existentes. La colaboración de investigadores especialistas en control automático con los agrónomos ha permitido dar soluciones de control avanzado a los problemas de control complejos que surgen en un invernadero.

Los trabajos son de muy diverso tipo, por ejemplo, es interesante destacar aportaciones donde el control climático se aborda mediante algoritmos de programación lineal, o directamente mediante técnicas de control robusto y aplicadas a un invernadero real. También se han dedicado esfuerzos importantes en el campo del modelado para detección de fallos en invernaderos. Incluso en el ámbito concreto de la identificación de parámetros.

Uno de los grupos probablemente más activos a nivel internacional en la aplicación de técnicas de control óptimo en la producción de invernadero es el de Gerrit van Straten (Wageningen), con experiencia en control robusto, control óptimo, identificación de sistemas e inteligencia artificial. Una de sus principales aplicaciones consiste en el control climático óptimo de invernaderos basado en el controlador óptimo de horizonte deslizante (RHOC) con una función de costo basada en aspectos económicos.

En los últimos tiempos, también se han empezado a publicar artículos donde la metodología de control seleccionada es la de Control Predictivo Basado en

Modelos (MFC). Las ventajas de esta metodología son bien conocidas y se resumen en la posibilidad de mejorar el control de un proceso gracias al conocimiento de la predicción de las salidas del modelo de un proceso en un horizonte amplio. El enfoque dado en la aplicación al invernadero también es muy variado, según los grupos de investigación que trabajan en este campo, Desde una visión mas matemática, donde el problema se resuelve asumiendo un problema de optimización con restricciones y usando LMI's para asegurar robustez, pasando por una visión matemática pero simplificada, acudiendo a modelos lineales y control adaptativo, o a través de una visión mas pragmática con la inclusión de herramientas basadas en optimización heurística (derivada de la optimización de Montecarlo) como los Algoritmos Genéticos (AG) para resolver los costosos problemas de optimización con restricciones que pueden presentarse para calcular las acciones de control adecuadas.

Como se puede observar, el control de un invernadero tiene, hoy en día, un importante interés para la comunidad científica, la razón quizá haya que buscarla en las inherentes características no lineales y multivariables del proceso, la presencia de perturbaciones e incertidumbres acusadas, así como la necesidad de plantear soluciones a las limitaciones impuestas por las saturaciones en sus variables y por supuesto por ser un proceso que cada vez es mas abundante en el ámbito agronómico, lo que augura un gran desarrollo científico-técnico en esta materia.

1.6 OBJETIVO GENERAL

Controlar y Simular un modelo climático de un invernadero para una adecuada manipulación del ambiente.

6.1 Objetivos Específicos

- Diseñar un sistema de Control del modelo propuesto para el invernadero, justificándolo por medio de una emulación.
- Simular el comportamiento del invernadero en las condiciones ambientales según su ubicación geográfica.

II. DESCRIPCION DEL INVERNADERO

2. Marco Teórico

2.1 Invernaderos

Existen tecnologías que permiten alterar las condiciones naturales del ambiente que envuelve a una planta, proporcionando un control de los factores climáticos. Una opción para proteger la producción de un vegetal son los plásticos, que proporciona una opción económica en comparación de otros materiales normalmente utilizados para este fin, como el vidrio, la fibra de vidrio, el acrílico y el poli carbonato, entre otros. La técnica de utilizar el plástico en la agricultura es conocida como plasticultura.



Figura 1. Invernadero

Las casas de vegetación pueden ser clasificadas, con relación al control de los factores meteorológicos en automatizadas, semiautomatizadas y no automatizadas. Las automatizadas son aquellas que permiten un control mas amplio del clima, las semiautomatizadas son aquellas dotadas de una automatización parcial de apenas algunos factores climáticos y finalmente las no automatizadas son aquellas que no utilización ningún tipo de equipamiento, exponiéndose a las condiciones de los factores físicos propios de la naturaleza.

2.2 Variables climáticas

Las principales variables climáticas envueltas en el proceso de producción vegetal son: la temperatura, la humedad relativa, la radiación luminosa y la concentración

de CO₂ (dióxido de carbono). La presencia de esos factores dentro de ciertos límites mínimos y máximos, proporcionan condiciones propicias para el desenvolvimiento de la planta, en cuanto fuera de esos límites, el desenvolvimiento es perjudicial, pudiendo llevar a la misma muerte de la planta.

2.2.1 Temperatura

La temperatura es un factor determinante de la actividad metabólica, el crecimiento, el desenvolvimiento del vegetal y también en el control de la morfología del vegetal. Para la manipulación de la temperatura es importante conocer las limitaciones y necesidades de cada especie cultivada. Por ejemplo las hortalizas comestibles como el pimentón, tomate, berenjena y pepino, entre otras, poseen una necesidad mínima de temperatura en torno a los 12 °C, abajo del cual ocurre un crecimiento en la presencia de síntomas de deterioro. Por otro lado a partir de un valor, que oscila entre 35-40 °C, se reduce la sintetización proteínica. Desde el punto de vista de la temperatura, son parámetros importantes:

-temperaturas máximas y mínimas biológicas: son valores específicos para el alcance de una determinada fase vegetativa, como la florificación y fructificación, entre otras.

-Temperaturas diurnas y nocturnas: niveles recomendados para el correcto desenvolvimiento del vegetal.

2.2.2 Humedad relativa

La humedad relativa esta relacionada con el rendimiento de los vegetales. Cuando es elevada, los vegetales reducen la transpiración, y consecuentemente reducen su crecimiento, pudiendo ocurrir incluso abortos florales por aumento de las enfermedades causadas por hongos o bacterias. Por otro lado, cuando la humedad relativa es baja los vegetales transpiran en exceso, lo que causa deshidratación.

2.2.3 Radiación luminosa

La radiación luminosa es un componente esencial para que ocurra la fotosíntesis, que es un proceso de síntesis orgánica realizado por los vegetales portadores de clorofila. El sol es el principal abastecedor de esta energía radiante, que llega a la tierra principalmente en forma de rayos ultravioleta. En el espectro de frecuencia de radiación solar se encuentra en un intervalo particular, entre 400-700 nm, en la cual ocurre el proceso de fotosíntesis. Este intervalo es conocido como radiación fotosintética activa, representada comúnmente por la sigla inglesa PAR (Photosynthetically Active Radiation). Existen dos dimensiones de la radiación que deben ser resaltadas. La primera es la intensidad de la luz y la segunda el

fotoperiodo (periodo de la duración de la luz). La intensidad es responsable de la maximización del crecimiento de la planta y el fotoperiodo es responsable del metabolismo. El control de la radiación es benéfico como un complemento para invernaderos con bajo nivel de luz natural. Puede ser utilizado para extender la duración natural del día.

2.2.4 Concentración de CO₂

El carbono es un nutriente esencial de los vegetales. Existen estudios que demuestran que alrededor del 40 % de la planta seca se compone de carbono. La planta obtiene el carbono presente en el CO₂ atmosférico a través de la fotosíntesis. La concentración ideal del CO₂ depende de los requerimientos, pero para todos existe un punto óptimo. La mayoría de cultivos requieren de concentraciones de CO₂ entre 1000-1500 ppm (partes por millón). Existiendo algunas especies que responden de manera positiva a concentraciones de hasta 1800 ppm.

2.3 Clases de invernadero según su construcción

Los invernaderos se pueden clasificar de distintas formas, según se atiende a determinadas características de sus elementos constructivos (por su perfil externo, según su fijación o movilidad, por el material de cubierta, según el material de la estructura, etc.).

La elección de un tipo de invernadero está en función de una serie de factores o aspectos técnicos:

- Tipo de suelo. Se deben elegir suelos con buen drenaje y de alta calidad aunque con los sistemas modernos de fertirriego es posible utilizar suelos pobres con buen drenaje o sustratos artificiales.
- Topografía. Son preferibles lugares con pequeña pendiente orientados de norte a sur.
- Vientos. Se tomarán en cuenta la dirección, intensidad y velocidad de los vientos dominantes.
- Exigencias bioclimáticas de la especie en cultivo

- Características climáticas de la zona o del área geográfica donde vaya a construirse el invernadero
- Disponibilidad de mano de obra (factor humano)
- Imperativos económicos locales (mercado y comercialización).

Según la conformación estructural, los invernaderos se pueden clasificar en:

- Planos o tipo parral.
- Tipo raspa y amagado.
- Asimétricos.
- Capilla (a dos aguas, a un agua)
- Doble capilla
- Tipo túnel o semicilíndrico.
- De cristal o tipo Venlo.

En el caso del invernadero de La Floresta (Universidad de La Salle), se encuentra clasificado según su construcción dentro de los invernaderos de capilla.

2.3.1 Invernadero de capilla.

Los invernaderos de capilla simple tienen la techumbre formando uno o dos planos inclinados, según sea a un agua o a dos aguas.

Este tipo de invernadero se utiliza bastante, destacando las siguientes ventajas:

- Es de fácil construcción y de fácil conservación.

- Es muy aceptable para la colocación de todo tipo de plástico en la cubierta.
- La ventilación vertical en paredes es muy fácil y se puede hacer de grandes superficies, con mecanización sencilla. También resulta fácil la instalación de ventanas cenitales.
- Tiene grandes facilidades para evacuar el agua de lluvia.
- Permite la unión de varias naves en batería.

La anchura que suele darse a estos invernaderos es de 12 a 16 metros. La altura en cumbrera está comprendida entre 3,25 y 4 metros.

Si la inclinación de los planos de la techumbre es mayor a 25° no ofrecen inconvenientes en la evacuación del agua de lluvia.

La ventilación es por ventanas frontales y laterales. Cuando se trata de estructuras formadas por varias naves unidas la ausencia de ventanas cenitales dificulta la ventilación.

2.3.2 Invernadero de doble capilla

Los invernaderos de doble capilla están formados por dos naves yuxtapuestas. Su ventilación es mejor que en otros tipos de invernadero, debido a la ventilación cenital que tienen en cumbrera de los dos escalones que forma la yuxtaposición de las dos naves; estas aberturas de ventilación suelen permanecer abiertas constantemente y suele ponerse en ellas malla mosquitera. Además también poseen ventilación vertical en las paredes frontales y laterales.

Este tipo de invernadero no está muy extendido debido a que su construcción es más dificultosa y cara que el tipo de invernadero capilla simple a dos aguas.

2.4 Materiales empleados en las estructuras.

La estructura es el armazón del invernadero, constituida por pies derechos, vigas, cabios, correas, etc., que soportan la cubierta, el viento, la lluvia, la nieve, los

aparatos que se instalan, sobrecarga de plantas, de instalaciones de riego y atomización de agua, etc. Deben limitarse a un mínimo el sombreo y la libertad de movimiento interno.

Las estructuras del invernadero reúnen las condiciones siguientes:

- Son ligeras y resistentes.
- De material económico y de fácil conservación.
- Son susceptibles de poder ser ampliadas.
- Ocupan poca superficie.
- Es adaptable y modificable a los materiales de cubierta.

La estructura del invernadero es uno de los elementos constructivos que mejor se debe estudiar, desde el punto de vista de la solidez y de la economía, a la hora de definirse por un determinado tipo de invernadero.

Los materiales más utilizados en la construcción de las estructuras de los invernaderos son madera, hierro, aluminio, alambre galvanizado y hormigón armado.

Es difícil encontrar un tipo de estructura que utilice solamente una clase de material ya que lo común es emplear distintos materiales.

En las estructuras de los invernaderos que se construyen en la actualidad se combinan los materiales siguientes: madera y alambre; madera, hierro y alambre; hierro y madera; hierro, alambre y madera; hormigón y madera; hormigón y hierro; hormigón, hierro, alambre y madera.

2.5 Ventajas y desventajas de la implementación de un invernadero.

Un invernadero es toda aquella estructura cerrada cubierta por materiales transparentes, dentro de la cual es posible obtener unas condiciones artificiales de microclima, y con ello cultivar plantas fuera de estación en condiciones óptimas.

Las ventajas del empleo de invernaderos son:

- Precocidad en los frutos.
- Aumento de la calidad y del rendimiento.
- Producción fuera de época.
- Ahorro de agua y fertilizantes.
- Mejora del control de insectos y enfermedades.
- Posibilidad de obtener más de un ciclo de cultivo al año.

Inconvenientes:

- Alta inversión inicial.
- Alto costo de operación.
- Requiere personal especializado, de experiencia práctica y conocimientos teóricos.

2.6 Parámetros a considerar en el control climático.

El desarrollo de los cultivos, en sus diferentes fases de crecimiento, está condicionado por cuatro factores ambientales o climáticos: temperatura, humedad relativa, luz y CO₂. Para que las plantas puedan realizar sus funciones es necesaria la conjunción de estos factores dentro de unos límites mínimos y

máximos, fuera de los cuales las plantas cesan su metabolismo, pudiendo llegar a la muerte.

2.6.1 Temperatura.

Este es el parámetro más importante a tener en cuenta en el manejo del ambiente dentro de un invernadero, ya que es el que más influye en el crecimiento y desarrollo de las plantas. Normalmente la temperatura óptima para las plantas se encuentra entre los 10 y 20° C.

Para el manejo de la temperatura es importante conocer las necesidades y limitaciones de la especie cultivada. Así mismo se deben aclarar los siguientes conceptos de temperaturas, que indican los valores objetivo a tener en cuenta para el buen funcionamiento del cultivo y sus limitaciones:

- Temperatura mínima letal. Aquella por debajo de la cual se producen daños en la planta.
- Temperaturas máximas y mínimas biológicas. Indican valores, por encima o por debajo respectivamente del cual, no es posible que la planta alcance una determinada fase vegetativa, como floración, fructificación, etc.
- Temperaturas nocturnas y diurnas. Indican los valores aconsejados para un correcto desarrollo de la planta.

Tabla 1. Temperaturas requeridas para distintas especies.

Exigencias de temperatura para distintas especies						
	TOMATE	PIMIENTO	BERENJENA	PEPINO	MELÓN	SANDÍA
T^a mínima letal	0-2	(-1)	0	(-1)	0-1	0
T^a mínima biológica	10-12	10-12	10-12	10-12	13-15	11-13
T^a óptima	13-16	16-18	17-22	18-18	18-21	17-20
T^a máxima biológica	21-27	23-27	22-27	20-25	25-30	23-28
T^a máxima letal	33-38	33-35	43-53	31-35	33-37	33-37

La temperatura en el interior del invernadero, va a estar en función de la radiación solar, comprendida en una banda entre 200 y 400 W/m².

El calentamiento del invernadero se produce cuando el infrarrojo largo, procedente de la radiación que pasa a través del material de cubierta, se transforma en calor. Esta radiación es absorbida por las plantas, los materiales de la estructura y el suelo. Como consecuencia de esta absorción, éstos emiten radiación de longitud más larga que tras pasar por el obstáculo que representa la cubierta, se emite radiación hacia el exterior y hacia el interior, calentando el invernadero.

El calor se transmite en el interior del invernadero por irradiación, conducción, infiltración y por convección, tanto calentando como enfriando. La conducción es producida por el movimiento de calor a través de los materiales de cubierta del invernadero. La convección tiene lugar por el movimiento del calor por las plantas, el suelo y la estructura del invernadero. La infiltración se debe al intercambio de calor del interior del invernadero y el aire frío del exterior a través de las juntas de la estructura. La radiación, por el movimiento del calor a través del espacio transparente.

2.6.2 Humedad relativa.

La humedad es la masa de agua en unidad de volumen, o en unidad de masa de aire. La humedad relativa es la cantidad de agua contenida en el aire, en relación con la máxima que sería capaz de contener a la misma temperatura.

Existe una relación inversa de la temperatura con la humedad por lo que a elevadas temperaturas, aumenta la capacidad de contener vapor de agua y por tanto disminuye la HR. Con temperaturas bajas, el contenido en HR aumenta.

Cada especie tiene una humedad ambiental idónea para vegetar en perfectas condiciones: al tomate, al pimiento y berenjena les gusta una HR sobre el 50-60%; al melón, entre el 60-70%; al calabacín, entre el 65-80% y al pepino entre el 70-90%.

La HR del aire es un factor climático que puede modificar el rendimiento final de los cultivos. Cuando la HR es excesiva las plantas reducen la transpiración y disminuyen su crecimiento, se producen abortos florales por apelmazamiento del polen y un mayor desarrollo de enfermedades criptogámicas. Por el contrario, si es muy baja, las plantas transpiran en exceso, pudiendo deshidratarse, además de los comunes problemas de mal cuaje.

Para que la HR se encuentre lo más cerca posible del óptimo el agricultor debe ayudarse del higrómetro. El exceso puede reducirse mediante ventilado, aumento

de la temperatura y evitando el exceso de humedad en el suelo. La falta puede corregirse con riegos, llenando canalillas o balsetas de agua, pulverizando agua en el ambiente, ventilado y sombreado. La ventilación cenital en invernaderos con anchura superior a 40 m es muy recomendable, tanto para el control de la temperatura como de la HR.

2.6.3 Iluminación

A mayor luminosidad en el interior del invernadero se debe aumentar la temperatura, la HR y el CO₂, para que la fotosíntesis sea máxima; por el contrario, si hay poca luz pueden descender las necesidades de otros factores. Para mejorar la luminosidad natural se usan los siguientes medios:

- Materiales de cubierta con buena transparencia.
- Orientación adecuada del invernadero.
- Materiales que reduzcan el mínimo las sombras interiores.
- Aumento del ángulo de incidencia de las radiaciones sobre las cubiertas.
- Acolchados del suelo con plástico blanco.

En verano para reducir la luminosidad se emplean:

- Blanqueo de cubiertas.
- Mallas de sombreo.
- Acolchados de plástico negro.

Es interesante destacar el uso del blanqueo ya que esta labor está en función del desarrollo del cultivo y de las temperaturas, y tiene efectos contradictorios que hay que conocer para hacer un correcto uso. Hay que saber que la planta que se encuentra bajo la sombra se ahíla y se producen abortos de flores en determinadas especies sensibles a la luz (especialmente tomate, pimiento y berenjena), por lo que el manejo del riego y de la solución nutritiva tiene que ir unida al efecto que produce el blanqueo. Los plásticos sucios o envejecidos provocan el mismo efecto que el blanqueo.

2.6.4 Dióxido de carbono (CO₂)

El anhídrido carbónico de la atmósfera es la materia prima imprescindible de la función clorofílica de las plantas. El enriquecimiento de la atmósfera del invernadero con CO₂, es muy interesante en muchos cultivos, tanto en hortalizas como en flores.

La concentración normal de CO₂ en la atmósfera es del 0,03%. Este índice debe aumentarse a límites de 0,1-0,2%, cuando los demás factores de la producción vegetal sean óptimos, si se desea el aprovechamiento al máximo de la actividad fotosintética de las plantas. Las concentraciones superiores al 0,3% resultan tóxicas para los cultivos.

En los invernaderos que no se aplique anhídrido carbónico, la concentración de este gas es muy variable a lo largo del día. Alcanza el máximo de la concentración al final de la noche y el mínimo a las horas de máxima luz que coinciden con el mediodía. En un invernadero cerrado por la noche, antes de que se inicie la ventilación por la mañana, la concentración de CO₂ puede llegar a límites mínimos de 0,005-0,01%, que los vegetales no pueden tomarlo y la fotosíntesis es nula. En el caso que el invernadero esté cerrado durante todo el día, en épocas demasiado frías, esa concentración mínima sigue disminuyendo y los vegetales se encuentran en situación de extrema necesidad en CO₂ para poder realizar la fotosíntesis.

Los niveles aconsejados de CO₂ dependen de la especie o variedad cultivada, de la radiación solar, de la ventilación, de la temperatura y de la humedad. El óptimo de asimilación está entre los 18 y 23° C de temperatura, descendiendo por encima de los 23-24° C. Respecto a la luminosidad y humedad, cada especie vegetal tiene un óptimo distinto.

El efecto que produce la fertilización con CO₂ sobre los cultivos hortícolas, es el de aumento de la precocidad de aproximadamente un 20% y aumento de los rendimientos en un 25-30%, mejora la calidad del cultivo así como la de su cosecha.

Sin embargo, no se puede hablar de una buena actividad fotosintética sin una óptima luminosidad. La luz es factor limitante, y así, la tasa de absorción de CO₂ es proporcional a la cantidad de luz recibida, además de depender también de la propia concentración de CO₂ disponible en la atmósfera de la planta. Se puede decir que el periodo más importante para el enriquecimiento carbónico es el mediodía, ya que es la parte del día en que se dan las máximas condiciones de luminosidad.

2.7 Control ambiental.

El control ambiental está basado en manejar de forma adecuada todos aquellos sistemas instalados en el invernadero: sistema de calefacción, la ventilación y el suministro de fertilización carbónica, para mantener los niveles adecuados de la radiación, temperatura, humedad relativa y nivel de CO₂, y así conseguir la mejor respuesta del cultivo y por tanto, mejoras en el rendimiento, precocidad, calidad del producto y calidad del cultivo.

2.7.1 Climatización de invernaderos durante períodos fríos.

Existen distintos sistemas para calentar y mantener la temperatura en el interior de un invernadero, como son:

- Empleo adecuado de los materiales de cubierta.
- Hermetismo del invernadero, evitando pérdidas de calor.

- Empleo de pantallas térmicas, cuyo uso permite mantener entre 2 y 4° C más en el interior del invernadero, con el consiguiente ahorro de energía. Dichas pantallas están justificadas en el caso de utilización de sistemas de calefacción.
- Condensación que evita la pérdida de radiación de longitud de onda larga, aunque tiene el inconveniente del goteo sobre la planta.
- Capas dobles de polietileno de 150 galgas o de polipropileno, que se pueden emplear como pantalla térmica, para evitar condensaciones sobre cubierta, con el inconveniente de pérdida de luminosidad en el interior. Se emplea mucho en invernaderos sin calefacción.
- Invernaderos más voluminosos que permiten mayor captación de la luz y al mismo tiempo mayor pérdida de calor por conducción. La mayor inercia térmica de volúmenes grandes, permite un mejor control del clima.
- Propio follaje de las plantas, ya que almacenan radiación.
- Sistemas de calefacción por agua caliente o por aire caliente.

2.7.2 Sistemas de calefacción

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

Los diferentes sistemas de calefacción aérea o de convección más utilizados se pueden clasificar en:

- Tuberías aéreas de agua caliente.
- Aerotermos.
- Generadores de aire caliente.
- Generadores y distribución del aire en mangas de polietileno.

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

- Suelo a nivel de cultivo.
- Tuberías enterradas.
- Banquetas.

2.7.2.1 Calefacción por agua caliente.

Es el sistema de calefacción aérea más tradicional y se basa en la circulación de agua caliente o vapor procedente de un foco calorífico (caldera, bomba de calor, etc.) por una red de tuberías. En la caldera el agua se calienta a 80-90° C y las tuberías se colocan a unos 10 cm sobre el suelo, que pueden ser fijas o móviles. Los sistemas antiguos tenían las tuberías colgadas del techo lo que incrementaba los costos energéticos.

La distribución del calor dentro del invernadero por el sistema de calefacción central por agua caliente se puede hacer de dos formas diferentes:

- Por termofusión, con tubos de diámetro grande, con una ligera pendiente unidescendiente.
- Por impulsión de bombas o aceleradores con tubería de diámetro menor y una temperatura en el agua de retorno más elevada que en el caso anterior.

Las características del sistema de calefacción del suelo por agua caliente que más destacan, son:

- Al estar el calor aplicado en la base, la temperatura del aire del invernadero es mucho más uniforme en comparación con la calefacción tradicional por tubo caliente colgado del techo.
- Para calentar el suelo se puede utilizar agua entre 30 y 40° C y por tanto es una forma de aplicación de energías alternativas como la geotérmica, calor residual industrial y solar a baja temperatura.
- Los costos de bombeo de agua son mayores. Debido a que la caída de temperatura del agua de calefacción en el invernadero es menor en los sistemas a baja temperatura, se precisa bombear mayor cantidad de agua para ceder la misma cantidad de calor.
- Se pueden usar materiales económicos como el polietileno en lugar de tuberías más caras de acero o aluminio.
- En general, los sistemas de calefacción de suelo representan un ahorro de energía.
- Sus costos de instalación son elevados.

2.7.2.2 Calefacción por aire caliente.

En este caso se emplea aire para elevar la temperatura de los invernaderos. La calefacción por aire caliente consiste en hacer pasar aire a través de focos caloríficos y luego impulsarlo dentro de la atmósfera del invernadero. Existen dos sistemas:

- Generadores de combustión directa. Un ventilador lanza una corriente de aire al interior de la cámara de combustión del generador, con lo que en su salida el aire ya caliente arrastra consigo gases de la combustión, que pueden crear problemas de fitotoxicidad debido a sus componentes azufrados.
- Generadores con intercambiador de calor. La corriente de aire no pasa directamente a través de la cámara de combustión, sino que se calienta atravesando una cámara de intercambio. Por otra parte, la cámara de combustión elimina los gases que se producen en ella a través de una chimenea.

Los generadores de aire caliente pueden instalarse dentro o fuera del invernadero. Si están fuera el aire caliente se lleva hasta intercambiadores que están establecidos dentro del invernadero. Cuando los generadores están colocados

dentro del invernadero, los ventiladores aspiran el aire del invernadero por una parte del aparato, donde se calienta y es expulsado directamente a la atmósfera del invernadero. También puede distribuirse por medio de tubos de plástico perforado, que recorren en todas las direcciones el invernadero.

En el caso de que el generador de calor esté en el exterior, el aire del invernadero es retornado al generador con la ayuda de unos conductos termoaislantes, donde se calienta y es impulsado de nuevo por medio de otros conductos.

Normalmente el combustible empleado es gasoil o propano, y los equipos están dotados de un sistema eléctrico de encendido con accionamiento a través de un termostato.

Los sistemas de calefacción por aire caliente tienen la ventaja de su menor inversión económica y mayor versatilidad al poder usarse como sistema de ventilación, con el consiguiente beneficio para el control de enfermedades. Como inconvenientes pueden citarse los siguientes:

- Proporcionan una deficiente distribución del calor, creando a veces turbulencias internas que ocasionan pérdidas caloríficas (menor inercia térmica y uniformidad).
- Su costo de funcionamiento es elevado y si se averían, la temperatura desciende rápidamente.

2.7.3 Empleo de pantallas térmicas

Se puede definir una pantalla como un elemento que extendido a modo de cubierta sobre los cultivos tiene como principal función ser capaz de variar el balance radiativo tanto desde el punto de vista fotosintético como calorífico. El uso de pantallas térmicas consigue incrementos productivos de hasta un 30%, gracias a la capacidad de gestionar el calor recogido durante el día y esparcirlo y mantenerlo durante la noche, periodo en el que las temperaturas bajan sobremanera en los invernaderos del sureste español. Las pantallas también son útiles como doble cubierta que impide el goteo directo de la condensación de agua sobre las plantas en épocas de excesiva humedad.

Así las pantallas térmicas se pueden emplear para distintos fines:

a) Protección exterior contra:

- El exceso de radiación con acción directa (UV) sobre las plantas, quemaduras.
- El exceso de temperatura (rojo, IR cercano).
- Secundariamente, viento, granizo, pájaros.

b) Protección interior:

- Protección térmica, ahorro energético (IR).
- Exceso contra el enfriamiento convectivo del aire a través de la cubierta.

- Secundariamente, humedad ambiental y condensación.

Existen distintos tipos de pantallas, presentando la mayoría una base tejida con hilos sintéticos y láminas de aluminio. La composición, disposición y grosor de los hilos es variable, ofreciendo distintas características.

También existen pantallas en las que se tejen directamente las láminas del material reflectante entre sí o con otro tipo de lámina plástica (poliéster, polipropileno, etc.). Otro tipo es adaptando el sistema de las mallas de sombreado tradicionales, sustituyendo la llamada rafia de polipropileno o polietileno por aluminio.

Así mismo, las pantallas pueden ser abiertas o ventiladas y cerradas o no ventiladas en lo referente al paso del aire. Las abiertas presentan la ventaja de ser muy útiles en verano al permitir la evacuación del exceso de temperatura y ofrecer propiedades térmicas, reflejando gran parte de la radiación IR durante la noche. Las pantallas cerradas limitan las pérdidas por convección del calor en el aire y reducen el volumen de aire a calentar con lo que el ahorro de cara a la calefacción es mayor.

2.8 Control de procesos

El progreso en el campo del cultivo en invernadero se ha venido desarrollando en los últimos tiempos en dos ámbitos bien diferenciados:

En el ámbito tecnológico, han sido las empresas las que con sus nuevos productos de integración de todos los dispositivos presentes en la planta (sensores, actuadores, microcontroladores, PLC's, etc.) en redes informáticas han logrado reducir el cableado, mejorar la fiabilidad del sistema y facilitar su reconfiguración. También se han abierto nuevas posibilidades a través del Internet para poder realizar a distancia desde cualquier lugar del mundo, lo que hasta hace poco solo era posible directamente sobre el invernadero.

En el ámbito científico, las nuevas metodologías de modelado abren, en el campo concreto de la agricultura bajo invernadero y dentro de ésta el cultivo hidropónico o sin suelo, nuevas perspectivas que permitirán predecir los recursos hídricos y de fertilizantes de las plantas y de esa forma será posible planificar adecuada y coordinadamente las estrategias de control climático, de riego y de fertirrigación que se prevean.

Si, tal y como se ha comentado, en el campo tecnológico han sido las empresas de instalación de invernaderos las que han asumido como imprescindible la incorporación de paquetes informáticos que resuelvan el problema de la monitorización y el control básico de invernaderos, con otras mejoras sustanciales que aportan las tecnologías de la información y las comunicaciones, las universidades e institutos de investigación, con visiones normalmente multidisciplinarias, son las que trabajan en las propuestas científicas basadas en el modelado de los procesos bajo invernadero y en la elaboración de algoritmos

avanzados de control que resuelvan los problemas inherentes a un proceso dificultoso, dada la naturaleza multivariable y su alta no linealidad. Sin embargo, ambos campos, como en otros casos, siguen todavía muy alejados.

2.9 Productos de control y monitorización de invernaderos.

En el ámbito tecnológico de los productos comerciales para monitorización y control de invernaderos se pueden encontrar una variada y en ocasiones heterogénea muestra. No siempre es fácil distinguir las características que poseen los productos, con un lenguaje en ocasiones poco cercano a lo que los ingenieros de control necesitan conocer. Las especificaciones que cada producto aporta, así como el vocabulario que se emplea en los documentos, en ocasiones, hace difícil su catalogación.

No obstante, tratando de dar una respuesta a esta cuestión, se han analizado productos de gama alta de un número importante de empresas conocidas por los expertos en agronomía y otras han sido seleccionadas a través de la consulta por Internet. En este sentido el catálogo de especificaciones propuestas a evaluar es el siguiente:

1. Nodos y bus de campo
2. Monitorización
3. Conexión exterior y gestión remota
4. Tecnología inalámbrica
5. Tratamiento de alarmas
6. Uso de modelos
7. Control del clima
8. Control de fertirrigación

En el caso de nodos y bus de campo se trata de determinar si la instalación dispone de una tecnología más actual basada en redes de tipo industrial. Respecto a la monitorización se trata de analizar si el producto suministrado puede o no calificarse como un SCADA. Respecto a la conexión remota se trata de analizar si el producto realmente permite una adecuada conexión con el mundo exterior y si el nivel de comunicación es flexible. En algunos casos puede empezar a ser relevante el empleo de la tecnología inalámbrica. Respecto al tratamiento de alarmas y muy conectado con la comunicación exterior, se trata de analizar si el producto dispone de módulos propios para la detección de fallos y tratamiento de alarmas que permitan más rápida actuación. Respecto a los controladores, se trata de conocer cual es el tipo de control y, si es posible, su nivel de sofisticación y si hay algún detalle que lo identifique con algún algoritmo concreto de control avanzado. A continuación se anexa una referencia breve de las empresas más importantes a nivel mundial, líderes en el área de control y monitoreo de invernaderos.

2.9.1 Priva Nutricontrol Ibérica (España).

Casa matriz Priva (Canadá). El producto más sofisticado que comercializa es un control climático y de la fertirrigación a través de sensores de temperatura, humedad, radiación, pH y conductividad eléctrica, etc. y los actuadores habituales de ventilación, calefacción, pantallas térmicas, etc. No emplea tecnología de buses de campo, solo conexión vía RS232 y RS485 punto a punto. Tiene módulos de alarmas y un software SCADA específico. También resuelve la conexión por Internet a través de HTML. No hay referencia al uso de tecnología GPRS de mensajes SMS, ni de tecnología inalámbrica.

2.9.2 Box Telematics (Gran Bretaña).

Disponen de un producto que si responde a la filosofía de conexión a través de bases y nodos de interconexión, incluso inalámbricos. Monitoriza las variables clásicas de un invernadero, incluido el CO₂. Incorpora la posibilidad de utilizar conexión exterior a través de radiofrecuencia y un módulo de alarmas a través de SMS.

2.9.3. WTC (EEUU).

Incorpora la sensorización de las variables clásicas en un invernadero. Incorpora bus de campo y nodos. La monitorización puede llevarse a cabo de forma remota vía modem, Envía alarmas con mensajes a impresoras o buscapersonas, pero no a teléfonos móviles. Incorpora algoritmos complejos de riego basados en déficit de saturación, pero no es posible identificar que tipo de metodología de control emplea.

2.9.4. Amplia Wireless Communications Software (España).

Solución que hace uso de las comunicaciones entre máquinas y dispositivos a través de una red inalámbrica. Monitoriza las variables clásicas de un invernadero y controla, a través de lo que denomina agroautomatas, el clima del invernadero. Gestiona alarmas a través de GPRS. No hay información suficiente respecto a modelos y controladores empleados.

2.9.5. Eldar Shany Agricultural Control (Israel).

Producto de control climático y fertirrigación con recirculación mediante el control a través de pH y conductividad. Emplea una red de controladores conectados a través de bus con un PC. Se usan extensivamente las tecnologías de radio, teléfono, modem y móvil. Puede intuirse el empleo de modelos y algún tipo de estrategia de control avanzada.

2.9.6. ACM (España).

Realizan control climático de invernaderos. No hay demasiada información al respecto de este producto, pero se ha incorporado a la tabla 1 al nombrar específicamente el uso de controladores PID para ventilación y el empleo de modelos.

2.9.7 Hortimax (Países Bajos).

Ofrece productos para el control de clima, riego, dosificación de nutrientes y consumo de energía en invernaderos, entre otros. Permite operar de forma remota y recibir notificaciones de alarmas en PDA, usando GSM o WiFi. No hay referencia al uso de bases de campo, realiza predicciones de las condiciones atmosféricas a 5 días vista, con el fin de estimar los requerimientos energéticos y responder rápidamente.

2.9.8. Brinkman (Países Bajos).

Ofrece una amplísima gama de productos no solo informáticos y de control. Utiliza una serie de nodos llamados satélite que configuran una red ampliable. Dichos nodos miden y controlan, destacando su preciso sistema, de medida de 4 kilos. Permite operar de forma remota mediante PC, sin especificar el sistema. Incorpora control de clima, riego y sustrato.

2.9.9 Volmatic (Dinamarca).

Ha formado recientemente parte de Senmatic A/S. Su producto ofrece control de clima y fertirrigación. En su arquitectura usa módulos fácilmente Ampliables que se pueden conectar al PC y permite el control remoto mediante teléfono móvil o PC. Genera listados de alarmas y el software presenta un interfaz abierto que permite comunicarse con otros programas.

2.10. Aire atmosférico

El aire atmosférico se compone de una mezcla de gases, vapor de agua y una mezcla de contaminantes, tales como humo, polvo, y otros elementos gaseosos que no están presentes normalmente, en lugares distantes de las fuentes de contaminación.

Por definición, existe aire seco cuando se ha extraído todo el vapor de agua y los contaminantes del aire atmosférico. Mediante extensas mediciones se ha demostrado que la composición del aire seco es relativamente constante, si bien el

tiempo, la ubicación geográfica y la altura determinan pequeñas variaciones en la cantidad de componentes.

El aire seco, normalmente tiene vapor de agua asociado, lo que da origen al que se denomina aire húmedo, que es una mezcla binaria de aire seco y vapor de agua. La cantidad de vapor presente en la mezcla puede variar entre cero y un valor correspondiente al estado de saturación. Esto corresponde a la cantidad máxima de vapor de agua que el aire puede soportar a una temperatura determinada.

2.11 Propiedades termodinámicas del aire húmedo

Hay diversas propiedades termodinámicas fundamentales ligadas a las propiedades del aire húmedo. Hay dos propiedades independientes, además de la presión atmosférica necesaria para establecer el estado termodinámico del aire húmedo.

Tres propiedades se relacionan con la temperatura:

- Temperatura de bulbo seco.
- Temperatura de bulbo húmedo.
- Temperatura de punto de rocío.

Algunas propiedades termodinámicas caracterizan la cantidad de vapor de agua presente en el aire húmedo:

- Presión de vapor.
- Razón de humedad.
- Humedad relativa.
- Grado de saturación.

Otras propiedades de fundamental importancia, relacionadas con el volumen ocupado por el aire y con la energía del aire, respectivamente, son:

- Volumen específico.
- La entalpía.

La entalpía y el volumen específico son propiedades de la mezcla de aire seco y vapor de agua, pero para mayor comodidad se expresan sobre la base de una unidad de masa de aire seco.

2.12 ESTUDIO DEL MODELO

2.12.1 Volúmenes de control

En general cualquier región del espacio puede elegirse como un volumen de control. No hay reglas concretas para la selección de un volumen de control aunque una buena selección sin duda hace mucho más sencillo del análisis.

Un volumen de control tiene un tamaño y forma fijos, pero también incluyen una frontera móvil y por ello no hay ningún trabajo de la frontera. Un volumen de control también implica interacciones de calor y de trabajo igual que un sistema cerrado, además de interacción de masa.

En volúmenes de control se unen los términos permanente y uniforme. El término permanente indica que no hay cambio con el tiempo, el opuesto de permanente es el transitorio. Por otro lado el término uniforme, implica que no hay cambio con la posición sobre una región especificada.

2.12.2 El proceso de flujo permanente

Un proceso de este tipo definido como un proceso durante el cual un flujo fluye permanentemente por un volumen de control. Es decir, las propiedades del flujo cambian de un punto a otro dentro del volumen de control, pero en cualquier punto fijo permanecerán iguales durante todo el proceso. Un proceso de flujo permanente se caracteriza por:

- Ninguna propiedad cambia con el tiempo. De modo que el volumen, la masa y el contenido de energía total del volumen de control permanecen constante durante un proceso de flujo permanente. Como resultado el trabajo de la frontera es cero y la masa total o energía que entra debe ser igual a la masa total o energía que sale. Estas consideraciones simplifican el análisis.
- Ninguna propiedad cambia en las fronteras del volumen de control con el tiempo, Así las propiedades del fluido en una entrada y en una salida permanecerán iguales durante todo el proceso. No obstante, las propiedades pueden ser diferentes en distintas entradas o salidas. Incluso varían por toda la sección transversal. Pero todas las propiedades, incluso la velocidad y la elevación, deben permanecer constantes con el tiempo en una posición fija. La conclusión es que la relación de flujo de masa del fluido en una abertura permanece constante durante un proceso de flujo permanente.

- Las interacciones de calor y de trabajo entre un sistema de flujo permanente y sus alrededores no cambian con el tiempo. De modo que la potencia liberada por un sistema y la relación de transferencia de calor hacia o de un sistema permanecen constantes durante un proceso de flujo permanente

2.12.3 Conservación de la masa

Durante un proceso de flujo permanente, la cantidad total de masa contenida dentro de un volumen de control no cambia con el tiempo. El principio de conservación de la masa indica que la cantidad total de masa que entra a un volumen de control es igual a la cantidad total de masa que sale.

Cuando se trabaja con flujo permanente, no interesa la cantidad de masa que fluye hacia adentro o hacia fuera del dispositivo a lo largo del tiempo; lo que sí importa es la cantidad de masa que fluye por unidad de tiempo, es decir la relación de flujo de masa m . El principio de conservación de masa (1), en un sistema de flujo permanente se expresa así:

$$\sum m_{ent} = \sum m_{sal}$$

Masa total que entra
al volumen de control
por unidad de tiempo

=

Masa total que sale
al volumen de control
por unidad de tiempo

$$m = \rho \cdot V \cdot A \quad (2.1)$$

$$m = \frac{1}{v} \cdot V \cdot A \quad (2.2)$$

$$m_1 = m_2 \quad (2.3)$$

$$v = \frac{RT^\circ K}{P} \quad (2.4)$$

(1). Ecuaciones tomadas de: Termodinámica para Ingenieros, autor: Potter, Merle

2.12.4 Conservación de energía

El cambio en la energía total del volumen de control durante un proceso de flujo permanente es cero. Entonces las cantidad de energía que entra a un volumen de control en todas formas (calor, trabajo, transferencia de masa) debe ser igual a la cantidad de energía que sale de el en un proceso de flujo permanente.

Al seguir esta línea, la primera ley de la termodinámica, el principio de conservación de energía para un sistema de flujo permanente general con entradas y salidas múltiples puede expresarse así:

Energía total Que cruza la Frontera como Trabajo o calor Por unidad de tiempo	=	Energía total transportada fuera de vc con la masa por unidad de tiempo	-	Energía total transportada hacia dentro de vc con las masa por unidad de tiempo
---	---	---	---	---

$$Q - W = \sum m_{sal} \theta_{sal} - \sum m_{ent} \theta_{ent} \quad (2.5)$$

Donde θ es la energía total del fluido que circula, incluido el trabajo de flujo, por unidad de masa. También puede expresarse así puesto que $\theta = h + ec + ep$.

$$Q - W = \sum m_{sal} \left(h_{sal} + \frac{V_{sal}^2}{2} + gz_{sal} \right) - \sum m_{ent} \left(h_{ent} + \frac{V_{ent}^2}{2} + gz_{ent} \right) (KW) \quad (2.6)$$

En sistemas de una sola corriente (una entrada, una sola salida) se eliminan las sumatorias sobre las entradas y salidas y los estados de entrada y salida, por simplicidad, se denotan por medio de subíndices 1 y 2, respectivamente. La relación de flujo de masa por todo el volumen de control permanece constante $m_1 = m_2$. La ecuación de la conservación de la energía para flujo permanente de una sola corriente, se convierte en:

$$Q - W = m \left[h_2 - h_1 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right] (KW) \quad (2.7)$$

$$Q - W = m(\Delta h + \Delta ec + \Delta ep) (KW) \quad (2.8)$$

Si estas ecuaciones se dividen entre \dot{m} se obtiene la relación de la primera ley en una base de masa unitaria como:

$$q - w = \left[h_2 - h_1 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right] (KJ / Kg) \quad (2.9)$$

$$q - w = \Delta h + \Delta ec + \Delta ep \quad (KJ / Kg) \quad (2.10)$$

Donde

$$q = \frac{Q}{m} \quad \text{Transferencia de calor por unidad de masa (KJ / Kg)} \quad (2.11)$$

$$w = \frac{W}{m} \quad \text{Trabajo efectuado por unidad de masa (KJ / Kg)} \quad (2.12)$$

Si el fluido experimenta un cambio despreciable en sus energías cinética y potencial cuando fluye a través del volumen de control la ecuación se reduce así:

$$q - w = \Delta h \quad (KJ / Kg) \quad (2.13)$$

Los diferentes términos que aparecen en las ecuaciones anteriores son:

Q = La relación de transferencia de calor entre el volumen de control y sus alrededores. Cuando el volumen de control pierde calor Q es negativa, si el volumen de control es adiabático $Q=0$.

W = Potencia. En muchos dispositivos de flujo permanente el volumen de control es constante, por lo que no hay trabajo en la frontera. El trabajo requerido para impulsar masa dentro y fuera del volumen de control también se toma en cuenta mediante el uso de entalpías para energía de corrientes de fluido, en vez de energías internas.

$$\Delta h = (h_2 - h_1) \text{ El cambio en la entalpía de un fluido.} \quad (2.14)$$

Se determina con facilidad al leer en las tablas los calores de la entalpía de los estados de salida y entrada. Para gases ideales, puede aproximarse por medio de

$$\Delta h = C_p (T_2 - T_1) . \text{ El cambio en la entalpía de un gas ideal} \quad (2.15)$$

$$\Delta ec = \left[\frac{V_2^2 - V_1^2}{2} \right] (m^2 / s^2) \text{ Diferencia de energía cinética.} \quad (2.16)$$

La unidad de energía cinética la cual es equivalente a KJ/Kg . Cuando una corriente de flujo entra y sale de un dispositivo de flujo permanente a aproximadamente la misma velocidad $V_2 \cong V_1$ el cambio en la energía cinética es cercano a cero con independencia de la velocidad.

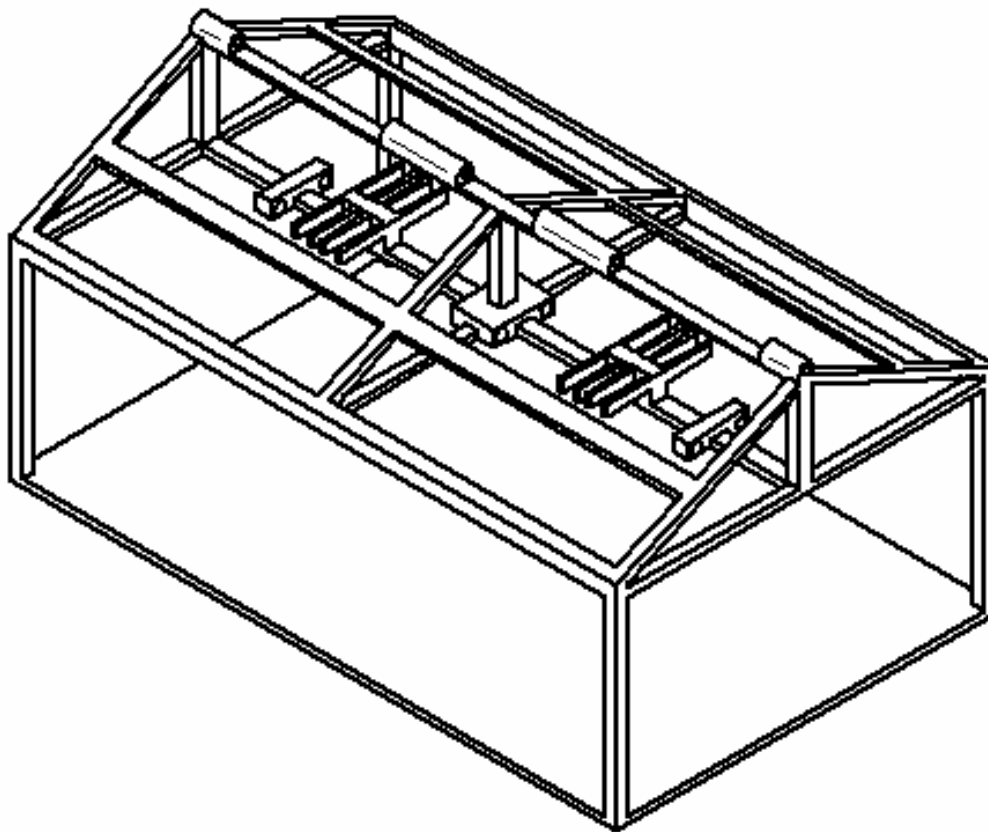
$$\Delta ep = g(z_2 - z_1) \text{ Cambio de la energía potencial} \quad (2.17)$$

Un cambio de la energía potencial de $1 KJ/Kg$ corresponde a una diferencia de altura de 102m. La diferencia de altura entre la entrada y la salida de la mayor parte de dispositivos industriales están por debajo de este valor y este termino de energía potencial siempre se omite.

2.12.5 Descripción detallada del invernadero a simular.

El invernadero a simular es el de La universidad de La salle, ubicado en la sede Floresta. La simulación se basa en las medidas y dimensiones de dicho invernadero (Ver figuras 2, 3 y 4), además de las condiciones requeridas por el mismo, en donde se trabajan cultivos de tomate.

Figura 2. Vista Isométrica del invernadero



Planos elaborados en solid edge versión 14 pieza y plano por Hernando Pérez y Martín Cortes

Figura 3. Vista frontal del invernadero

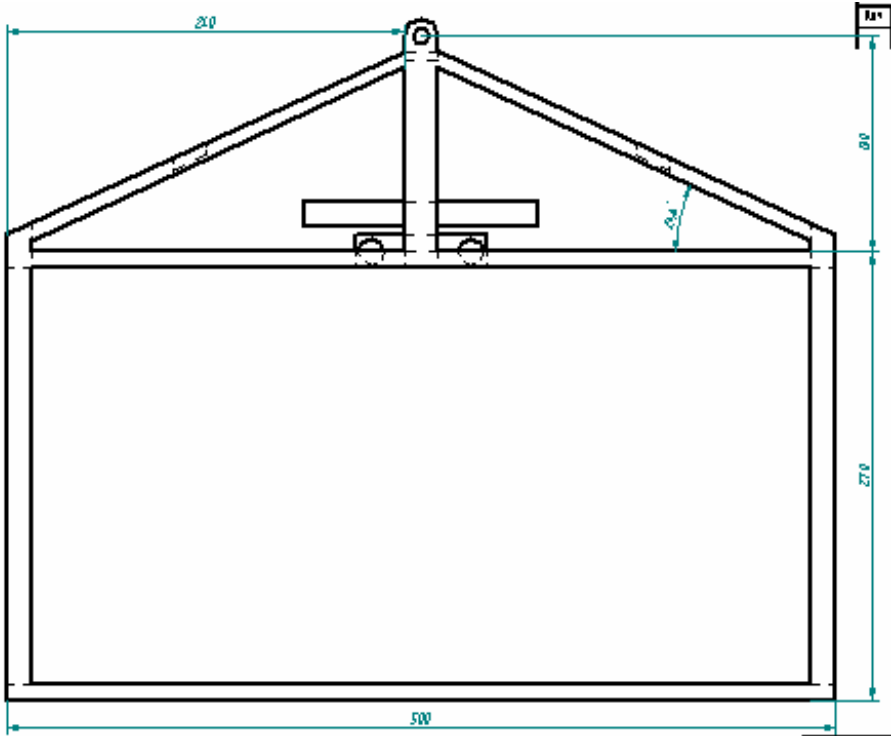
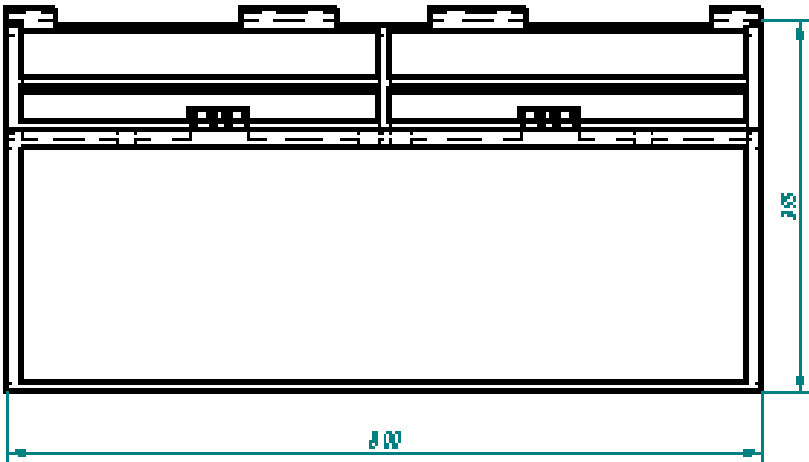


Figura 4. Vista lateral del invernadero



Nota: Para mas detalle de los planos del invernadero, ver anexo 1, Planos del invernadero.

III. MODELAMIENTO Y SIMULACION DE LA PLANTA

En este capítulo se simula el modelo propuesto para la planta, este modelo se ajusta a las condiciones reales del invernadero sobre el cual se realizó el trabajo. Para esto fue necesario realizar un trabajo de investigación en cuanto a todos los valores de los parámetros que influyen en el modelo.

En el caso de la temperatura del suelo que es uno de los parámetros que influyen en el modelo es obligatorio simular su comportamiento debido a que este es un factor que influye en el modelo matemático. Posteriormente se realiza una aproximación del modelo de temperatura a un sistema de primer orden para facilitar el diseño del control.

3.1. Reporte agrometeorológico de la sabana de Bogotá.

Para poder aproximar el modelo a la realidad del ambiente de la geografía colombiana, específicamente la Sabana de Bogotá, se han consultado fuentes y registros acerca del comportamiento del clima en la Sabana, de cada uno de los parámetros que pueden influir en el modelamiento del sistema planteado, adaptándolo concretamente al invernadero de la Floresta de la Universidad de La Salle.

IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia)

Tabla 2: Propiedades físicas.

Temperatura media del aire	13.7° C
Temperatura mínima media	8.4° C
Temperatura máxima media	19.5° C
Humedad relativa del aire	83%
Brillo solar	113.2 horas
Evaporación	65.1 milímetros
Velocidad del viento a 2 metros	0.7 m/s
Velocidad media del viento a 10 metros	1.1 m/s
Velocidad máxima a 10 metros	10 m/s día 22 con dirección Sureste
Velocidad del viento media	4 m/s
Dirección dominante del viento	Sur

Valores extremos de temperatura del aire

Temperatura mínima	3.8° C día 23
Temperatura máxima	22.6° C día 7

En invierno las condiciones climáticas de la mayoría de las zonas de la sabana de Bogotá, excluyen el cultivo al aire libre de plantas con necesidades de calor (por ejemplo, el tomate). Por este motivo los agricultores usan los invernaderos y los abrigos.

El cultivo extratemprano y extratardío sólo puede lograrse en base a la reducción de pérdidas de calor, principalmente por la noche (aumentando la hermeticidad del invernadero, usando paredes dobles o pantallas térmicas), o calentando artificialmente con fuentes de energía tradicionales o no convencionales como la energía solar, geotérmica, etc.

En ambos casos el agricultor se enfrenta al problema de la rentabilidad.

Los agricultores de la sabana de bogota deben intentar mejorar las condiciones térmicas de sus invernaderos si quieren obtener el máximo rendimiento de sus inversiones. La mayoría de los sistemas de calefacción diseñados para los invernaderos de vidrio, sirven también para los de plástico, pero también existen otros sistemas de bajo costo y menor sofisticación que dan resultados positivos en la región mediterránea.

El invernadero debe calentarse si la temperatura exterior cae por debajo de la temperatura que necesitan los cultivos. Las necesidades de calor del invernadero pueden calcularse según la siguiente ecuación (3.1): (El área del invernadero es de 40 m²).

$$Q = A_H K^l (t_i - t_a) (W) \quad (3.1)$$

$$Q = 40 * 7 (12 - 13,7)$$

$$Q = 476 \text{ W/K}$$

Las necesidades específicas de calor por metro cuadrado de suelo de invernadero, se calculan por la ecuación (3.2):

$$q = A_H / A_G K^l (t_i - t_a) \quad (3.2)$$

En dónde:

K' es el coeficiente global de transmisión de calor [W/m^2K]

A_H es el área de la superficie del invernadero [m^2]

A_G es la superficie del suelo del invernadero [m^2]

t_i es la temperatura requerida dentro del invernadero

t_a es la temperatura media de las mínimas en el exterior

El coeficiente global K' , depende del material de cubierta, de la hermeticidad del invernadero, del sistema de calefacción, del sistema de riego, de la velocidad de viento, de la cantidad de nubes que cubran el cielo y de la precipitación.

Para los invernaderos de plástico se pueden usar los siguientes valores, que varían según la hermeticidad del invernadero considerando una velocidad del viento media, de 4 m/s:

Nota: Ecuaciones tomadas de www.structuregreenhouse.com

Película simple $K' = 6 - 8,0$ [W/m^2K]

Película doble: $K' = 4,2 - 6.0$ [W/m^2K]

Para las temperaturas exteriores mínimas promedio, se deben tomar valores registrados en estaciones meteorológicas próximas. En la sabana de Bogotá, tal es de $8,4^\circ C$, mientras que en muchas regiones de la sabana de bogota la temperatura media de las mínimas toman un valor próximo a $0^\circ C$.

El calor requerido de un invernadero con película simple y temperatura interior de $12^\circ C$. (El área del invernadero es de $40 m^2$).

$$t_a = 8,4^\circ C$$

$$q = 1 * 8 * (12 - 8,4)$$

$$q = 28,8 W/m^2C$$

En la tabla 2, se muestran los coeficientes globales de pérdida de calor de una

serie de materiales de cubierta. Para el caso del invernadero de la Floresta, el material es Plástico cuyo coeficiente global de pérdida de calor oscila entre 6 y 8 W/m²C

Tabla 3. Materiales de cubierta para invernaderos

MATERIAL	[Wm ² C]
Vidrio sencillo	6,0 - 8,8
Doble vidrio, cámara de 9 mm.	4,2 - 5,2
Doble acrílico SDP 16	4,2 - 5,0
Triple acrílico S3P 32	3,0 - 3,5
Doble policarbonato, cámara 10 mm.	4,7 - 4,8
Doble policarbonato, cámara 16 mm.	4,2 - 5,0
Plástico	6,0 - 8,0
Doble plástico	4,2 - 6,0
Doble plástico IR opaco + cortina	2,5 - 3,0
Vidrio + cortina térmica de polietileno	6,4
Vidrio + cortina térmica de PVC	4,7
Vidrio + cortina térmica de EVA	5,1
Vidrio + cortina térmica de burbujas	4,9
Vidrio + cortina térmica de plástico, film no tejido	4,1 - 4,8
Vidrio + cortina térmica de doble plástico, burbujas	3,4 - 3,9
Vidrio + cortina térmica de film aluminizado y burbujas	3,2
Vidrio + cortina térmica de film aluminizado sencillo	3,4 - 3,9

3.2. Modelo dinámico del clima en Invernaderos (Con densidad de aire constante)

Este modelo se encuentra basado en el trabajo de investigación (1) realizado por el Ing. Javier Leal Iga de la Facultad de Agronomía de La Universidad UANL de México.

Las ecuaciones fueron obtenidas de balances de masa y energía dentro del invernadero, la variable básica considerada dentro del modelo es la temperatura del aire en un invernadero. Los parámetros que intervienen en el modelo (propuestos por 1), algunos no se ajustan con las condiciones del invernadero propuesto, por lo que ha sido necesario consultar, recalcular y calibrar estos parámetros, para poder aproximar el modelo a nuestra realidad.

Las ecuaciones del modelo propuesto, fueron simuladas en el paquete de matlab, el cual permite obtener resultados confiables de los cálculos de las ecuaciones y de esta forma poder simular un modelo con un factor de confiabilidad más alto.

El modelo consiste en ecuación diferencial de la temperatura del aire dentro del invernadero T_g (ver figura 5).

Figura 5. Diagrama de variables

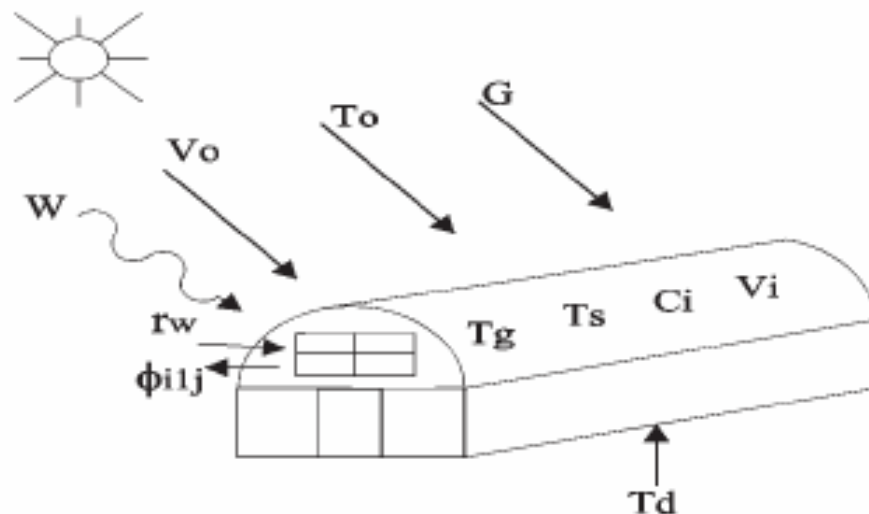
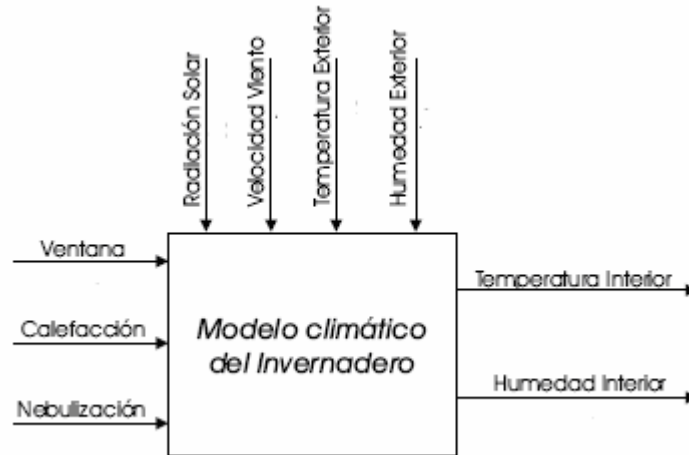


Figura 6. Modelo climático del invernadero.



La ecuación (3.3) de temperatura del aire considera el efecto debido a las siguientes influencias: el intercambio de calor entre el exterior y el interior del invernadero, entre el suelo y el aire dentro del invernadero, entre el aire interior y la tubería del sistema de calentamiento, entre el aire interior y el techo; la influencia de la radiación solar; la pérdida de calor por transpiración de la planta; la ganancia del calor por la condensación del vapor de agua en el techo. La correspondiente ecuación es:

$$C_g \frac{dT_g}{dt} = K_z(T_0 - T_g) + \alpha(T_p - T_g) + K_r(T_0 - T_g) + K_s(T_s - T_g) + Z\eta G - \lambda E + \frac{\lambda}{\varepsilon + 1} M_c \quad (3.3)$$

Esta ecuación nos indica que la variación de temperatura dentro del invernadero es proporcional al intercambio de calor por la ventilación (primer término), intercambio debido a las tuberías del sistema de calefacción (segundo término), al intercambio a través de la cubierta y de las paredes (tercer término), al intercambio de calor con el suelo profundo (cuarto término), a la entrada de calor por radiación (quinto término), a la pérdida de calor por evaporación debido a la transpiración (sexto término) así como al intercambio debido a condensación en el techo del invernadero (último término).

No es objetivo de este proyecto, el control de un sistema de calefacción por la convección de calor por tuberías. En consecuencia se suprime el término α de la ecuación (3.3), obteniendo la ecuación (3.4):

$$C_g \frac{dT_g}{dt} = K_z(T_0 - T_g) + K_r(T_0 - T_g) + K_s(T_s - T_g) + Z\eta G - \lambda E + \frac{\lambda}{\varepsilon + 1} M_c \quad (3.4)$$

El modelo matemático de la ecuación (3.4), requiere como variable de entrada T_s (Temperatura del suelo). Para esto es necesario encontrar un modelo matemático que simule este comportamiento, el cual deberá ser simulado y de esta forma ser parámetro de entrada para el modelo de la temperatura dentro del invernadero.

$$dT_s = \frac{Q_{rd.s} + Q_{a.s} + Q_{l.s} + Q_{uc.s} + Q_{u.s} - Q_{s.c} - Q_{s.ri} - Q_{s.s2} - Q_{s.sc}}{(0,7 \cdot \rho_s \cdot C_{p.s} + 0,2 \cdot \rho_{H2O} \cdot C_{p.H2O} + 0,1 \cdot \rho_a \cdot C_{p.a}) \cdot V_s} \quad (3.5)$$

Para calcular los valores de la suma de calores de la ecuación (3.5) se cuenta con las siguientes ecuaciones:

$$Q_{rd.s} = A_s \cdot new_{s.is} \cdot I_o \quad (3.6)$$

$$Q_{a.s} = A_s \cdot \alpha_{a.s} \cdot (T_a - T_s) \quad (3.7)$$

$$Q_{l.s} = A_l \cdot E_l \cdot E_c \cdot F_{l.c} \cdot \sigma \cdot (T_l^4 - T_c^4) \quad (3.8)$$

$$Q_{uc.s} = A_{uc} \cdot E_{uc} \cdot E_s \cdot F_{uc.s} \cdot \sigma \cdot (T_{uc}^4 - T_s^4) \quad (3.9)$$

$$Q_{u.s} = A_u \cdot E_u \cdot E_s \cdot F_{u.s} \cdot \sigma \cdot (T_u^4 - T_s^4) \quad (3.10)$$

$$Q_{s.c} = A_s \cdot E_s \cdot E_c \cdot F_{s.c} \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_c^4) \quad (3.11)$$

$$Q_{s.ri} = A_s \cdot E_s \cdot E_{ri} \cdot F_{s.ri} \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{ri}^4) \quad (3.12)$$

$$Q_{s.s2} = A_s \cdot \frac{\lambda_s}{dx_s} \cdot (T_s - T_{s2}) \quad (3.13)$$

$$Q_{s.sc} = A_s \cdot E_s \cdot E_{sc} \cdot F_{s.sc} \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{sc}^4) \quad (3.14)$$

(1) Wageninigen. Optimal control Desing for a solar greenhouse. Rachel Johann Catharina Van Ooteghem. PhD Thesis Wageninigen Universiteit, Nederland (Pdf)

Los valores de las constantes de las ecuaciones, desde (3.6) hasta (3.14) se encuentran en el glosario.

A través de la simulación podemos observar el comportamiento de temperatura del suelo, este parámetro de entrada sirve para la solución del modelo de la temperatura dentro del invernadero, ecuación (3.4).

Asumiendo las constantes:

Kv: 8 transferencia de calor por ventilación [Watts/°C.m²]
 Kr: 0.3349 transferencia de calor con el techo (cubierta) [Watts/°C.m²]
 Ks: 5.75 transferencia de calor con el suelo [Watts/°C.m²]

3.3 Modelo de la temperatura del invernadero ecuación (3.4):

$$T_c = \frac{\varepsilon}{\varepsilon + 1} T_0 + \frac{1}{\varepsilon} T_g \quad (3.15)$$

Donde

$\varepsilon = 3$, resistencia de calor de la cubierta entre el interior y el exterior.

$T_0 = 19,5^\circ\text{C}$

$T_g = 12^\circ\text{C}$

Reemplazando en los valores en la ecuación (3.15) se tiene:

$$T_c = 10,3^\circ\text{C}$$

Mc: Ganancia del calor por la condensación del vapor de agua en el techo.

$$M_c = \begin{cases} \left\{ m_1 |T_g - T_c|^{m_2} (W_g - W_c) \right\} & \left\{ \begin{array}{l} W_g > W_c \\ W_g \leq W_c \end{array} \right. \\ 0 & \end{cases} \quad (3.16)$$

En donde W_g y W_c , se calculan por medio de las ecuaciones (3.17) y (3.18)

$$W_c = \frac{\omega P_c}{P_{atm} - P_c} \quad (3.17)$$

$$W_g = \frac{\omega P_g}{P_{atm} - P_g} \quad (3.18)$$

Para calcular los valores de P_c y P_g , se realiza mediante las ecuaciones (3.19) y (3.20):

$$P_c = a_1 e^{\frac{a_2 T_c}{a_3 + T_c}} \quad (3.19)$$

$$P_g = \Lambda (T_g + T_0) V_i \quad (3.20)$$

Los valores de las constantes son los siguientes:

$\omega = 0,622$, Razón de humedad
 $P_{atm} = 75,2$ Kpa, Presión atmosférica del aire
 $a_1 = 0.611$ Kpa, Presión de vapor para saturación.
 $a_2 = 17,27$ Presión de vapor para saturación
 $a_3 = 239^\circ\text{C}$, Presión de vapor para saturación.
 $\Lambda = 0,46152$ Nm/ $^\circ\text{Cg}$, Constante de presión
 $V_i = 0,9709$ Kg/m³ Humedad

Reemplazando en las ecuaciones (3.19) y (3.20) los anteriores valores obtenemos:

$$P_c = 1,2471 \text{ Kpa}$$

$$P_g = 9,14 \text{ Kpa}$$

Reemplazando los valores de P_c y P_g en las ecuaciones (3.17) y (3.18), se obtiene:

$$W_c = 0,010$$

$$W_g = 0,086$$

Como $W_g > W_c$, entonces

$$M_c = \begin{cases} m_1 |T_g - T_c|^{m_2} (W_g - W_c) & \left\{ \begin{array}{l} W_g > W_c \\ W_g \leq W_c \end{array} \right. \\ 0 & \end{cases}$$

$$M_c = 0,000092201$$

E: Perdida de calor por transpiración de la planta

$$E = W_L \left[\frac{[qSn\eta G + r\rho C_p D_g g_b]}{\lambda \left(S + \gamma \left(1 + \frac{g_b}{g} \right) \right)} \right] \quad (3.21)$$

En donde S Presión de agua saturada, se calcula mediante la ecuación (3.22):

$$S = S_1 T_g^2 + S_2 T_g + S_3 \quad (3.22)$$

$$S_1 = 0.00018407 \text{ KPa}/^\circ\text{C}^3$$

$$S_2 = 0.0009788 \text{ KPa}/^\circ\text{C}^2$$

$$S_3 = 0.051492 \text{ KPa}/^\circ\text{C}$$

$$T_g = 12^\circ\text{C}$$

Reemplazando los anteriores valores en la ecuación obtenemos:

$$S = 0.08973864 \text{ KPa}/^\circ\text{C}$$

$$D_g = a_1 e^{\frac{a_2 T_g}{a_3 + T_g}} - \Lambda (T_g + T_0) V_i \quad (3.23)$$

a 1= 0.611 Kpa, Presión de vapor para saturación.

a 2= 17,27 Presión de vapor para saturación

a 3= 239°C, Presión de vapor para saturación.

$\Lambda = 0.46152 \text{ Nm}/^\circ\text{Cg}$, Constante de presión

$V_i = 0.9709 \text{ Kg}/\text{m}^3$ Humedad

$T_g = 12^\circ\text{C}$, $T_0 = 19.5^\circ\text{C}$

Reemplazando los anteriores valores en la ecuación (3.23) obtenemos:

$$D_g = -11.8268 \text{ KPa}/^\circ\text{C}$$

$$g = g_1 \left(1 - g_2 e^{-g_3 G} \right) e^{-g_4 C_i} \quad (3.24)$$

$g_1 = 20.3 \text{ mm}/\text{s}$, conductancia del follaje

$g_2 = 0.44$, conductancia del follaje

$g_3 = 0.0025 \text{ sm}^2/\text{Mmol}$, conductancia del follaje

$g_4 = 0.00031 \text{ m}^3/\text{g}$, conductancia del follaje

$G = 170 \text{ Watts}/\text{m}^2$, Radiación solar onda corta.

Ci= 350 ppm, Dióxido de Carbono (CO2)

Reemplazando los anteriores valores en la ecuación (3.24) obtenemos:

$$g = 12,9736$$

$$\lambda = L_1 - L_2 T_g \quad (3.25)$$

L1= 2501 J/g, coeficiente de energía de vaporización

L2= 2.381 J/g°C coeficiente de energía de vaporización

Tg= 12°C

Reemplazando los anteriores valores en la ecuación (3.25) obtenemos:

$$\lambda = 2472,428 \text{ J/g}$$

gb= 10 mm/s, conductancia limite de frontera

ñ: 0.7, factor de conversión de radiación

G: 170 Watts/m2, radiación solar onda corta

r = 0,01m2/g, déficit evaporación presión de vapor

n= 0,098, parámetro de radiación

q= 0,01m2/g, radiación evaporación

p= 998Kg/m3, masa especifica del agua

Y = 0,067 KPa/°C, Constante de psicometría aparente.

Cp=1010 Jouls/Kg°C, calor especifico del aire.

Reemplazando los anteriores factores en la ecuación (3.21) de pérdida de calor por transpiración de la planta (E), se obtiene:

$$E = 9608,51$$

Cg: Capacidad calorífica del aire dentro del invernadero.

$$C_g = M_{\text{aire}} C_p \frac{V_g}{A_g} \quad (3.26)$$

Maire= 179.36 Kg, Densidad del aire seco

Vg= 133 m3, Volumen del invernadero

Ag= 40 m2, Área del invernadero

Cp= 1010 Jouls/Kg°C, Calor especifico del aire

Reemplazando los anteriores valores en la ecuación (3.26) obtenemos:

$$C_g = 602335,76 \text{ Joules/}^\circ\text{Cm}^2$$

ε : 3, resistencia de calor de la cubierta entre interior y exterior.

Z: 0.6, radiación solar efectiva por malla sombra

C_g : 602335,76 Joules/°Cm², capacidad de calor del aire en el invernadero.

E: Perdida de calor por transpiración de la planta

$$E = W_L \left[\frac{[qSn\eta G + r\rho C_p D_g g_b]}{\lambda \left(S + \gamma \left(1 + \frac{g_b}{g} \right) \right)} \right]$$

$$E = -173535,25$$

Gracias a los anteriores cálculos de los factores que influyen en nuestro modelo, se puede reemplazar en la ecuación (3.4) del sistema:

$$C_g \frac{dT_g}{dt} = K_z(T_0 - T_g) + K_r(T_0 - T_g) + K_s(T_s - T_g) + Z\eta G - \lambda E + \frac{\lambda}{\varepsilon + 1} M_c \quad (3.4)$$

Al reemplazar todos los factores en la ecuación resultante, se obtiene:

$$\frac{dT_g}{dt} = 17,82 \text{ }^\circ\text{C}$$

El anterior resultado es el valor de la temperatura dentro del invernadero según los cálculos obtenidos a partir de la ecuación del modelo.

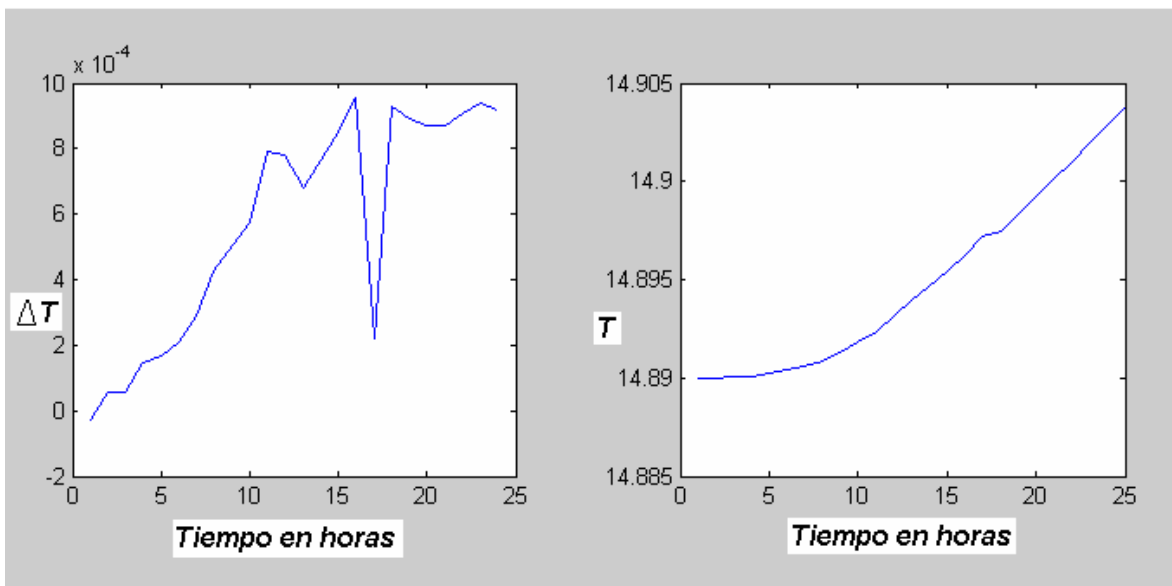
3.4. Simulación

La simulación del modelo matemático se desarrolló en un paquete matemático llamado MATLAB. En el se programaron varias rutinas donde se evalúa el comportamiento de la temperatura del suelo, del exterior o ambiente y dentro del invernadero.

3.4.1 Simulación de la temperatura del suelo del invernadero

Para poder simular la temperatura dentro del invernadero es necesario simular las variables que influyen sobre el modelo. Dicha simulación corresponde a la de la temperatura del suelo que es influenciada a su vez por la temperatura del ambiente, la radiación solar y el calor dentro del invernadero. El resultado de esta simulación es el siguiente (Ver figura 7):

Figura 7. Simulación de la temperatura del suelo en el invernadero.



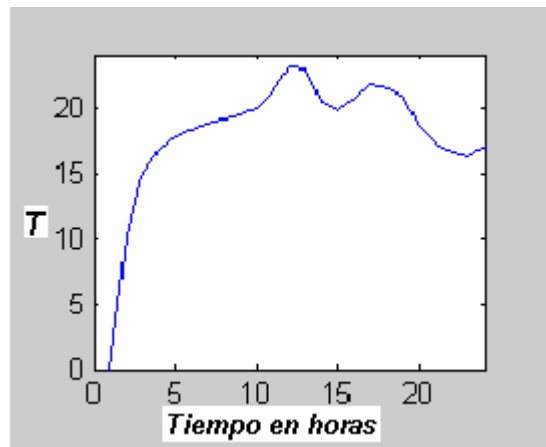
En la gráfica del primer cuadro se puede observar la diferencia o variación detallada de la temperatura dentro del invernadero, en el segundo cuadro se observa el cambio de la temperatura en general. Una vez obtenido el resultado de la simulación de la temperatura del suelo, este resultado será un parámetro de entrada para la simulación de la temperatura en el invernadero.

La línea de código de la simulación de la temperatura del suelo se encuentra en los anexos del presente documento.

3.4.2 Simulación de la temperatura en el Invernadero

Con el resultado de la simulación de la temperatura del suelo, ya se puede simular la temperatura dentro del invernadero, en la figura 8 se observa el resultado de la simulación.

Figura 8. Simulación de la temperatura en el invernadero.



La línea de código de la simulación se encuentra en los anexos del presente documento.

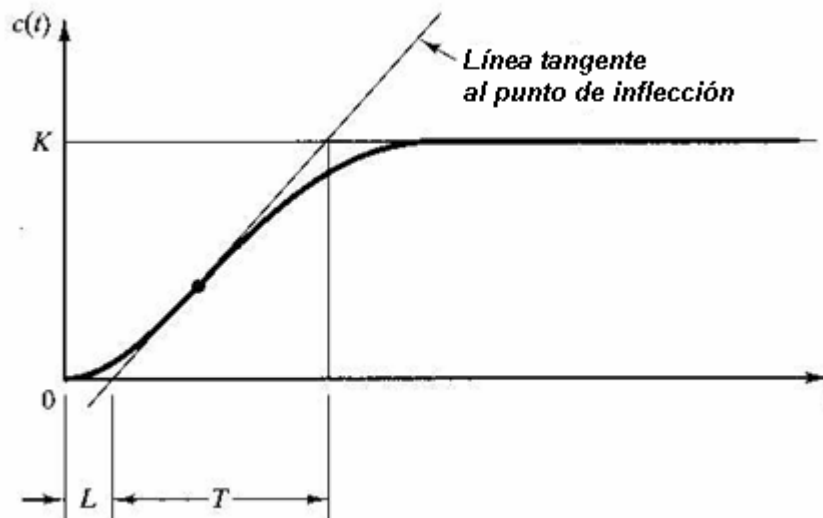
3.4.3 Aproximación de la simulación al modelo.

Con el resultado obtenido de la anterior simulación del modelo se aproxima a un sistema de primer orden con atraso de tiempo, cuyo modelo corresponde a la ecuación (3.27).

$$G(s) = \frac{ke^{-Ls}}{Ts + 1} \quad (3.27)$$

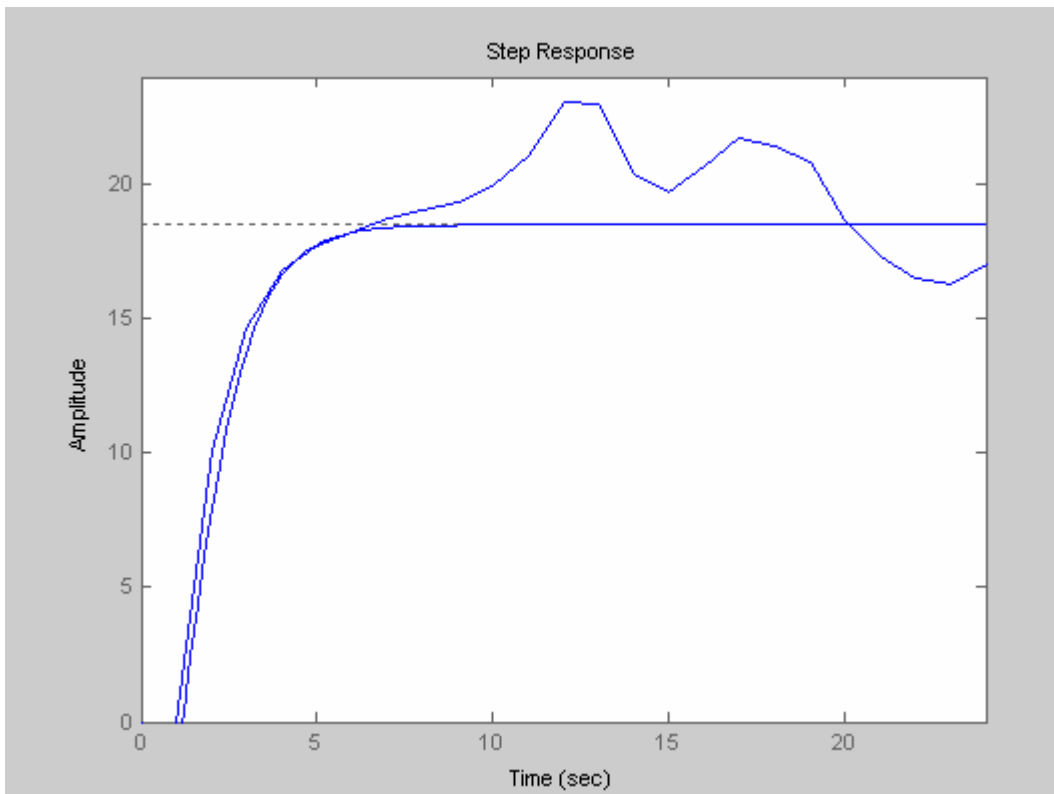
Por medio de esta aproximación se puede obtener los valores de los parámetros de la ecuación (3.27) aplicando el método de Ziegler-Nichols (Ver figura 9). Este método se aplica para el diseño del control.

Figura 9. Curva característica de la respuesta del sistema a una entrada escalón.



La aproximación del modelo se realiza también en MATLAB (Ver figura 10). La línea de código de la aproximación se encuentra en los anexos del presente documento.

Figura 10. Aproximación del modelo.



A través de las figuras, se observa que los modelos presentan resultados satisfactorios que son fáciles de ser aproximados a un sistema de primer orden.

IV. CONTROL Y EMULACION

Obtenidos los resultados de la simulación se diseña un control para el sistema propuesto, se calculan los controles Proporcional (P), Proporcional Integral (PI) y Proporcional Integral Derivativa (PID); y se evalúa cual es el mas apropiado o conveniente para el sistema.

Mediante la Emulación se pretende observar el funcionamiento del controlador diseñado asemejándolo a como se debería de verse en la realidad.

4.1 Control

4.1.1 Criterio de Estabilidad de Routh-Hurwitz

El criterio de Routh-Hurwitz, permite determinar el intervalo de K, para lograr la estabilidad del sistema. Para esto se hace necesario utilizar la transformada W, con cual se calcularan los valores de saturación para K.

Para comenzar es de gran utilidad, discretizar la función, esto es posible realizarlo en matlab. A continuación se observa la línea de código de dicha discretización en MATLAB:

```
s=tf('s');
Gs=18/(10.1*s+1)
Td=2;
Gz=c2d(Gs,Td)
margin(Gz)
Gmf = feedback(Gz,0.05)
DC = dcgain(Gmf)
```

Los resultados arrojados por MATLAB, en la discretización de la función son los siguientes:

```
Transfer function:
  18
-----
10.1 s + 1
```

```
Transfer function:
  3.234
-----
z - 0.8204
```

```
Sampling time: 2
```

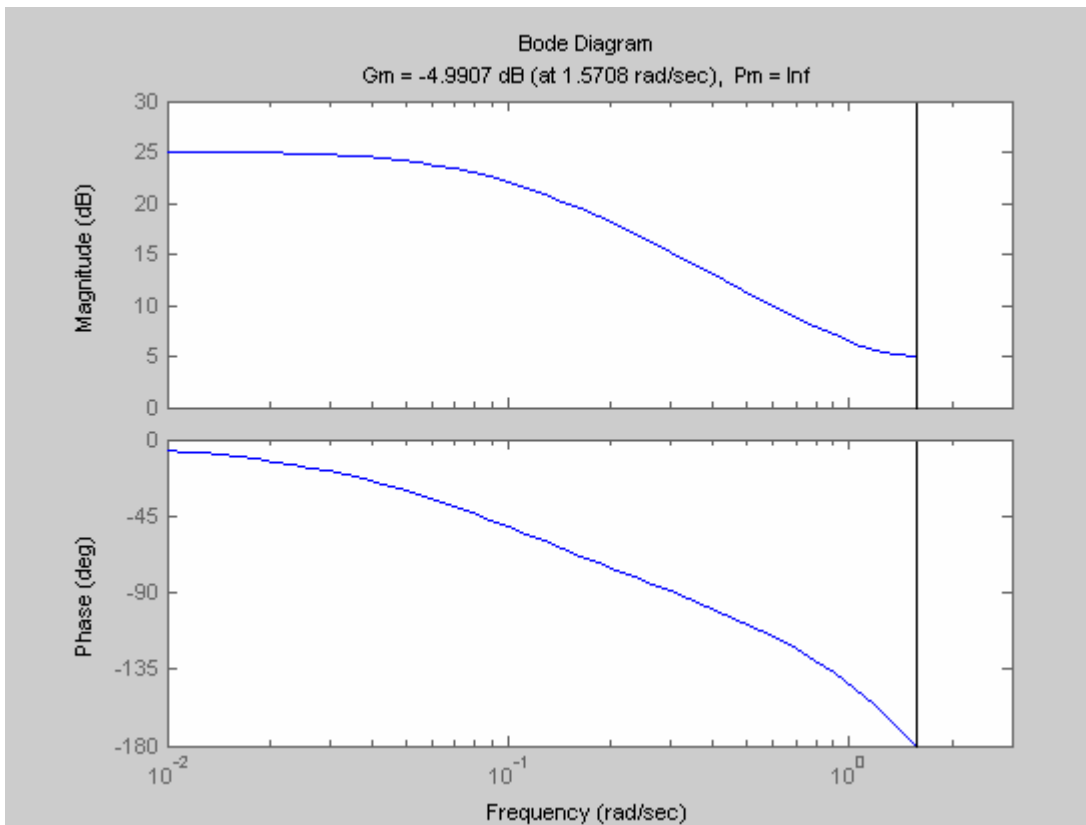
Transfer function:
3.234

z - 0.6587

Sampling time: 2

DC = 9.4737

Figura 11. Diagrama de Bode, magnitud y fase del sistema



Usando el criterio de ROUTH HURWITZ

La función de transferencia en malla cerrada es la siguiente:

$$Gmf(z) = \frac{GsK}{1 + H.Gs.K} \quad (3.28)$$

Siendo la ecuación característica del sistema: $1 + H.Gs.k = 0$ (3.29)

$$\text{Remplazando los valores tenemos: } 1 + k \cdot 0.05 \cdot \frac{3.234}{z - 0.8204} = 0 \quad (3.30)$$

Sustituyendo z por su equivalente en ω (transformada W):

$$z = \frac{1 + \omega}{1 - \omega} \quad (3.31)$$

Después de algunas operaciones algebraicas la ecuación característica queda:

$$\frac{1 + \omega}{1 - \omega} - 0.8204 + 0.1617 \cdot k = 0 \quad (3.32)$$

Finalmente la ecuación característica puede ser escrita de la siguiente manera:

$$0.1796\omega + 0.1617\omega \cdot k + 1.8204 - 0.1617k = 0 \quad (3.33)$$

Usando el criterio, se tiene dos condiciones necesarias para la estabilidad del sistema

$$a) \quad (0.1796 + 0.1617k)w + (1.8204 - 0.1617k) = 0 \quad (3.34)$$

$$s^1 \quad 0.1796 + 0.1617k \quad \rightarrow \text{para } k > 0 \rightarrow k = -1.11 \text{ "K mínimo"} \quad (3.35)$$

$$s^0 \quad 1.8204 - 0.1617k \quad \rightarrow \text{para } k > 0 \rightarrow k = 11.25 \text{ "K máximo"} \quad (3.36)$$

4.1.2 Diseño del controlador por el método de Ziegler-Nichols.

Para el diseño del control, se opta por el método de Ziegler-Nichols, que suministra la información necesaria para calcular el control partiendo de la ecuación de primer orden ya obtenida. En la tabla (4) se encuentra las formulas para obtener el control Proporcional (P), Proporcional Integral (PI) y Proporcional Integral Derivativo (PID).

Tabla 4. Cálculo del control por el método Ziegler-Nichols

Tipo de Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	2L	0.5L

Teniendo en cuenta los valores de los parámetros de la ecuación (3.27)

$$G(s) = \frac{ke^{-Ls}}{Ts + 1}$$

Que fueron obtenidos a través de la figura (10) Aproximación del modelo, se tiene:

$$\begin{aligned} K &= 18 \\ L &= 0.5 \\ T &= 10.1 \end{aligned}$$

Reemplazando en la tabla (3) se tiene:

Tipo de Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{10.1}{0.5}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{10.1}{0.5}$	$\frac{0.5}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{10.1}{0.5}$	2(0.5)	0.5(0.5)

Al obtener los valores de K_p , T_i y T_d se reemplazan en la ecuación (3.28), con la cual obtenemos el control requerido.

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (3.38)$$

4.1.2.1 Control Proporcional (P)

$$K_p = 20.2$$

Reemplazando en la ecuación (3.38), se tiene:

$$G(s) = 20.2$$

Simulando este control en simulink, se obtiene el siguiente resultado:

Figura 12. Diagrama de Bloques del control P

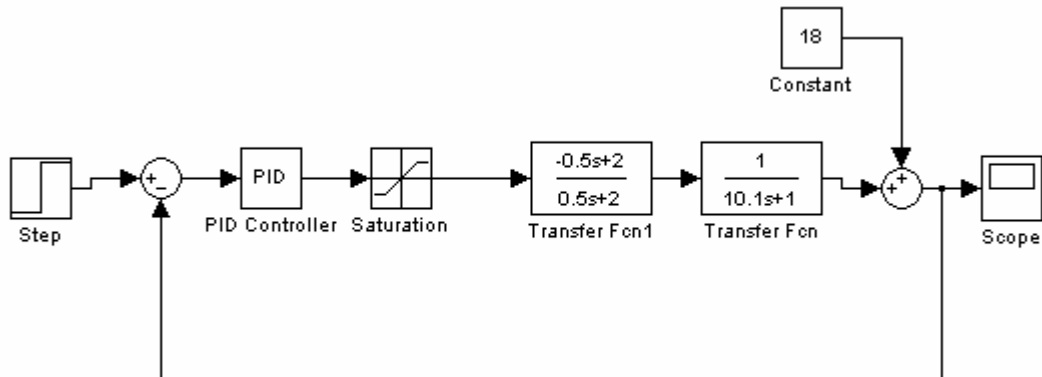
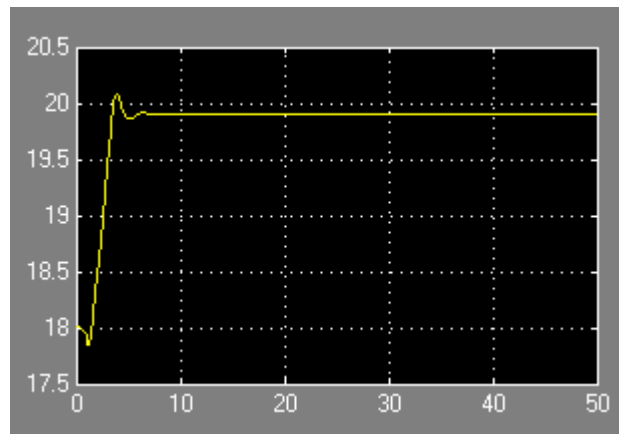


Figura 13. Respuesta del sistema con control P a una entrada escalón.



4.1.2.2 Control Proporcional Integrativo (PI)

$$K_p = 18.18$$

$$T_i = 1.66$$

Reemplazando en la ecuación (3.38), se obtiene:

$$G(s) = 18.18 + \frac{18.18}{1.66s}$$

Simulando este control en simulink, se obtiene el siguiente resultado:

Figura 14. Diagrama de bloques del control PI

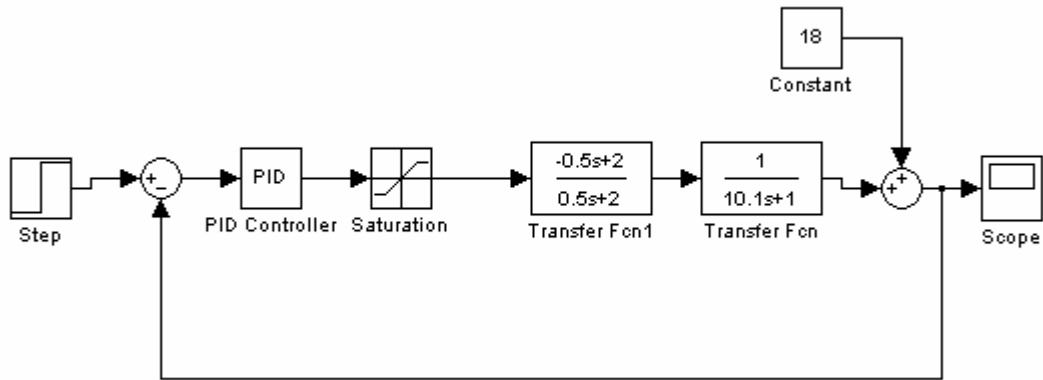
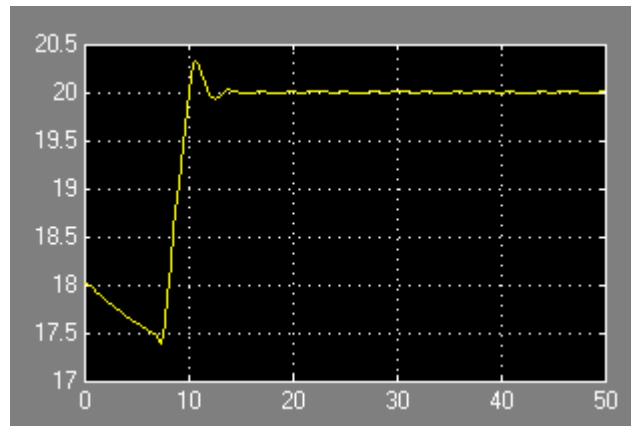


Figura 15. Respuesta del sistema con control PI a una entrada escalón.



4.1.2.3 Control Proporcional Integral Derivativo (PID)

$$K_p = 24.24$$

$$T_i = 1$$

$$T_d = 0.25$$

Reemplazando en la ecuación (3.38), se obtiene:

$$G(s) = 24.24 + \frac{24.24}{s} + 6.06 s$$

Figura 16. Diagrama de bloques del control PID

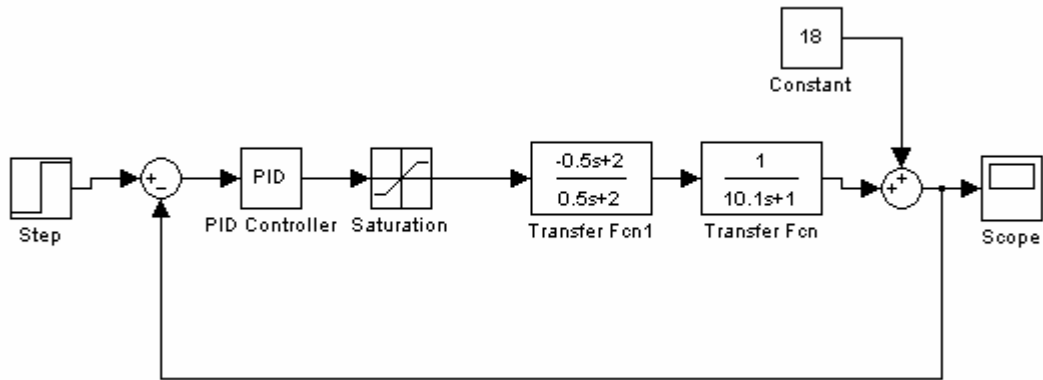
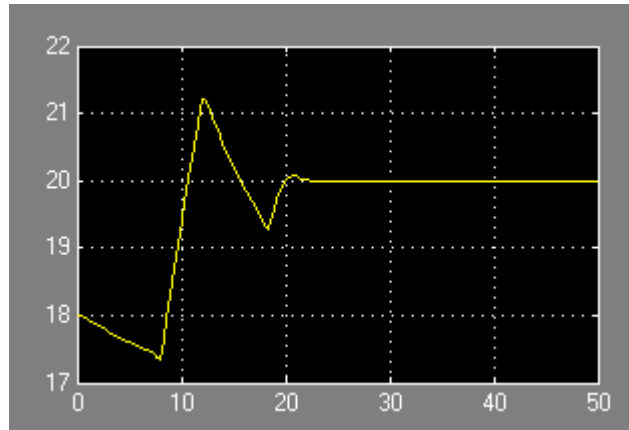


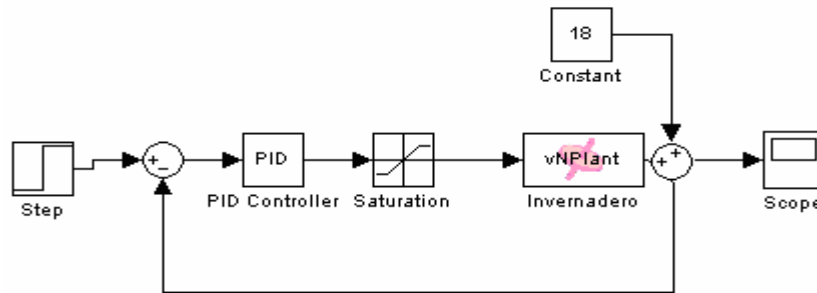
Figura 17. Respuesta del sistema con control PID a una entrada escalón.



4.2 Emulación

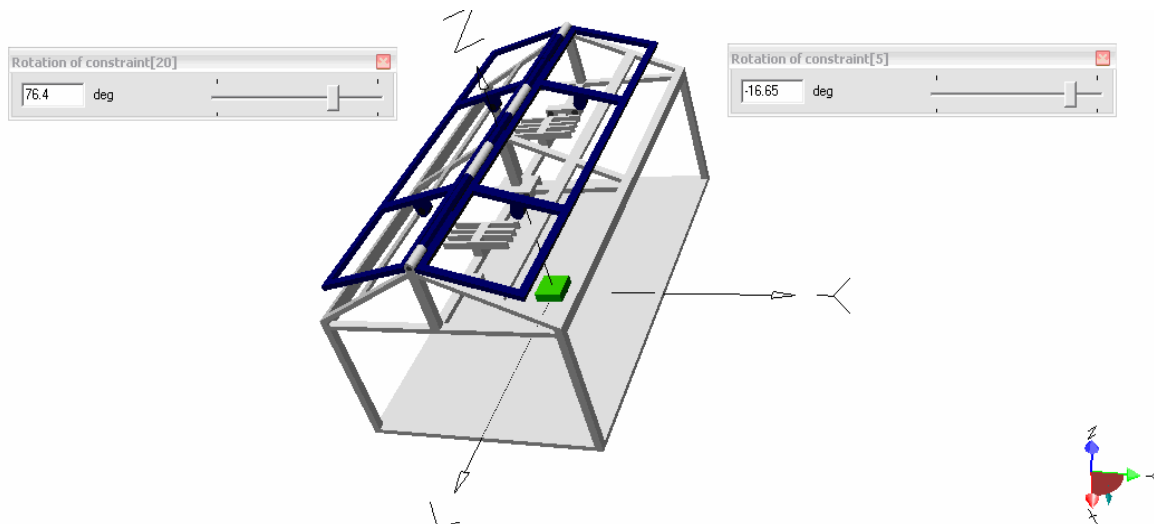
La emulación es desarrollada en visual Nastran y analizada en simulink; lo que se pretende es observar y analizar como será el funcionamiento del control diseñado para la planta.

Figura 18. Diagrama de bloques de la emulación de la planta.



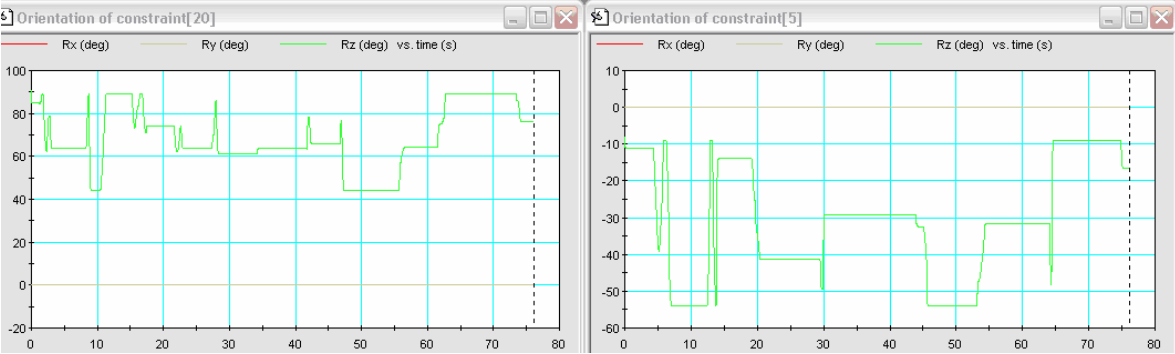
En la figura 19 se observa el diseño realizado para visual nastran, de la planta física en este caso el invernadero. Los deslizadores que divisan a lado y lado del invernadero, representan el movimiento del actuador que son dos motores ubicados en los extremos del eje que sujeta a las ventanas.

Figura 19. Planta física, emulada en Visual Nastran.



En la figura 20, se visualizan 2 graficas las cuales entregan información sobre como se están moviendo los actuadores de la planta (Invernadero).

Figura 20. Comportamiento de los actuadores en Visual Nastran.



V. RECOMENDACIONES

-Para poder ejecutar la aplicación eficientemente el equipo donde se corra la simulación debe tener instalados los programas de VISUAL NASTRAN 2002 y MATLAB (se recomienda la versión 6.1 que cuenta con la conexión a Visual Nastran); además se requiere de recursos de maquina necesarios como un procesador de 3 GHz y memoria de 512 Mb (como mínimo).

-El modelo propuesto, fue desarrollado a partir de modelos ya realizados y comprobados, pero que fue ajustado a las condiciones reales del invernadero de La Floresta (Universidad de la Salle), lo que proporciona una aproximación muy buena a lo que es en realidad un invernadero de la sabana de Bogotá.

-La simulación del modelo entrega resultados veraces y bastantes aproximados a la realidad, lo que es garantía para que en un futuro el modelo pueda ser implementado y complementado en dicho invernadero.

VI. CONCLUSIONES

- El trabajo pretende mejorar la modelación de las ecuaciones de temperatura de un invernadero. La estrategia que se utilizó fue la de quitar la restricción de trabajo que considera la densidad de aire constante.
- Una primera consecuencia al eliminar la restricción sobre la densidad del aire es que se aumenta la aproximación del modelo con la realidad. Los cambios que se producen en la temperatura se pueden apreciar en las simulaciones realizadas. Como resultado la parte dinámica no modelada es compensada por un proceso de calibración (selección de parámetros aproximados a la realidad realizado para reducir el error de predicción del modelo). Esto también es un buen indicador de que la modelación propuesta es correcta.
- La recopilación de datos e información pertenecen a zonas cercanas al invernadero de La Floresta, Universidad de La Salle; esto garantiza que la aproximación del modelo se acerque bastante a la realidad de este invernadero. O dicho de otra manera podremos concluir que el modelo simulado se ajusta y cumple los parámetros de aproximación a un invernadero real.
- Referente al control se manipuló el modelo hacia un sistema de primer orden y de esta forma se obtuvo un sistema más estable cuyos resultados fueron más fáciles de interpretar. En el área de control es un procedimiento que optimiza y garantiza que el sistema logre estabilizarse de una manera más rápida.

VII. PRESUPUESTO.

El presupuesto empleado en este proyecto, no es de carácter físico, puesto que no es objetivo de este el implementarse. El presupuesto puede valorarse en el área de investigación previa que fue necesaria en la obtención y recopilación de la información necesaria para poder ejecutarlo; se puede incluir dentro de este presupuesto los traslados que se realizaron hasta los invernaderos de La Floresta (Universidad de La Salle) y el invernadero del Cecil en Silvana (Propiedad del Incoder), lugares en los cuales se recopiló la mayoría de información. También es de incluirse dentro del presupuesto del proyecto el software y los laboratorios suministrados por la facultad.

VIII. BIBLIOGRAFIA

- Termodinamica para Ingenieros, Autor: Ptter, Merle C. & Somerton Craig W. Editorial McGraw-Hill.
- Sistemas de control automatico, Autor: Kuo, Benjamin C Editorial Prentice Hall Hispanoamérica, 1996.
- Javier Leal Iga, Efrain Alcorta, Humberto Rodríguez. Facultad de agronomia UANL, Mexico, Variación de la temperatura con densidad del aire constante. 2006.
- Automatic Control Systems, Autor: Kuo, Benjamín C Editorial John Wiley, 2003
- Economics-based optimal control of greenhouse tomato crop prod., PhD tesis. Wageningen, 2000.
- Sears, Francis W., Zemansky, Mark W., Young, Hugo D., Freedman, Roger A. Física universitaria. Novena edición, Prentice Hall, México, 1999.
- Perry, Robert H. Manual del ingeniero químico. Sexta edición, tomo 1, capitulo 3, McGraw-Hill, México, 1992.
- Valiente, Antonio. Problemas de flujo de fluidos. Editorial Limusa, México, 1990.

IX. ANEXOS

Anexo Código Programa ESS

Cálculos del comportamiento de Temperatura del suelo.

A_s=3136
A_uc=2456,19
A_u=337,12
A_l=614,05
E_l=0,95
E_s=0,7
E_c=0,8534
E_sc=0,9
E_ri=0,95
E_u=0,95
E_uc=0,95
F_l.c=0,4267
F_uc.s=0,0733
F_u.s=0,0733
F_s.c=0,4267
F_s.ri=0,007218
F_s.sc=0,0007218
sigma=0,0000000567051
lambda_s=0,86
dx_s=1,247

rho_s=180
C_p.s=1500
rho_H2O=998
rho_a=1,29
C_p.a=1000
V_s=160
{l_o=200}
new_s.is=0,1323
alpha_a.s=1,7

T_s=14,89
{T_a=17}
T_l=14,5
{T_c=13}
T_uc=13,5
{T_ri=14}

T_s2=13,5
{T_sc=13,2}
T_u=13,4

C_p.sc=1500
C_p.H2O=4186

Q_rd.s=A_s*new_s.is*I_o
Q_a.s=A_s*alpha_a.s*(T_a-T_s)
Q_l.s=A_l*E_l*E_c*F_l.c*sigma*(T_l^4-T_c^4)
Q_uc.s=A_uc*E_uc*E_s*F_uc.s*sigma*(T_uc^4-T_s^4)
Q_u.s=A_u*E_u*E_s*F_u.s*sigma*(T_u^4-T_s^4)
Q_s.c=A_s*E_s*E_c*F_s.c*sigma*(T_s^4-T_c^4)
Q_s.ri=A_s*E_s*E_ri*F_s.ri*sigma*(T_s^4-T_ri^4)
Q_s.s2=A_s*(lambda_s/dx_s)*(T_s-T_s2)
Q_s.sc=A_s*E_s*E_sc*F_s.sc*sigma*(T_s^4-T_sc^4)

dT_s=(Q_rd.s+Q_a.s+Q_l.s+Q_uc.s+Q_u.s-Q_s.c-Q_s.ri-Q_s.s2-
Q_s.sc)/(((0,7*rho_s*C_p.s)+(0,2*rho_H2O*C_p.H2O)+(0,1*rho_a*C_p.a))*V_s)

Cálculos del modelo de Temperatura del invernadero.

"Ecuaciones del modelo de Temperatura"

"Variable de Estado (Salida)"

T_g=12{Temperatura del aire en el invernadero, (temperatura interior) 12C}

"Entradas"

T_s=10,3{Temperatura del suelo en el invernadero, 10.3C.}

T_a=19,5{Temperatura del aire exterior, (temperatura exterior) 19,5C}

"Parametros"

{K_v=8[Watts/C-m^2]} {transferencia de calor por ventilación}

K_r=0,3349 {transferencia de calor con el techo (cubierta)}

K_s=5,75{ transferencia de calor con el suelo.}

epsilon=3{resistencia de calor de la cubierta entre el interior y el exterior.}

omega=0,622{Razón de humedad}

P_atmosferica=75,200{Presión atmosférica del aire}

a_1=0,611{Presión de vapor para saturación}

a_2=17,27{Presión de vapor para saturación}

a_3= 239{Presión de vapor para saturación.}

LAMDA1= 461,52{Constante de presión}

V_i=0,9709{Humedad}

S_1=0,00018407

S_2=0,0009788

S_3=0,051492

g_b=0,01{Conductancia limite de frontera}

g_1=0,0203{conductancia del follaje}

g_2=0,44{conductancia del follaje}

g_3=0,0568{conductancia del follaje}

g_4=0,31{conductancia del follaje}

G_o=170{Radiación solar onda corta.}

C_i=0,00350{Dióxido de Carbono (CO₂)}

m_1=0,0000010183{Transferencia de masa, g/sm²}

m_2=0,33{Transferencia de masa}

L_1=2501000{coeficiente de energía de vaporización}

L_2=2381{coeficiente de energía de vaporización}

phi=0,7{factor de conversión de radiación}

r=10{déficit evaporación presión de vapor}

n=0,098{parámetro de radiación}

q=10{radiación evaporación}

ro=998{masa especifica del agua}

gamma= 0,067{Constante de psicometría aparente.}

C_p=1010{calor especifico del aire.}

W_l=0,075{peso seco de follaje}

M_aire=179,36{Kg, Densidad del aire seco}

V_g=133{Volumen del invernadero}

A_g=40{Área del invernadero}

Z=0,6{radiación solar efectiva por malla sombra}

"Ecuaciones"

$$D_g = a_1 \cdot \exp((a_2 \cdot T_g)/(a_3 + T_g)) - (\text{LAMDA1} \cdot (T_g + T_0) \cdot V_i) / 1000$$

$$S = S_1 \cdot T_g^2 + S_2 \cdot T_g + S_3$$

$$g = g_1 \cdot (1 - g_2 \cdot \exp(-g_3 \cdot G_o)) \cdot \exp(-g_4 \cdot C_i)$$

$$\text{lamda} = L_1 - L_2 \cdot T_g$$

$$T_c = (\text{epsilon}/(\text{epsilon} + 1)) \cdot T_0 + (1/\text{epsilon}) \cdot T_g$$

$$P_c = a_1 \cdot \exp((a_2 \cdot T_c)/(a_3 + T_c))$$

$$W_c = (\text{omega} \cdot P_c) / (P_{\text{atmosferica}} - P_c)$$

$$P_g = (\text{LAMDA1} * (T_g + T_0) * V_i) * 1000$$

$$W_g = (\omega * P_g) / (P_{\text{atmosferica}} - P_g)$$

$$C_g = M_{\text{aire}} * C_p * (V_g / A_g)$$

$$M_c = m_1 * \text{abs}(T_g - T_c)^{m_2} * (W_g - W_c)$$

$$E_o = W_i * ((q * S * n * \phi * G_o + r * r_o * C_p * D_g * g_b) / (\text{lamda} * (S + \gamma * (1 + (g_b / g)))))$$

$$C_g * dT_g = K_v * (T_0 - T_g) + K_s * (T_s - T_g) + Z * \phi * G_o - \text{lamda} * E_o + ((\text{lamda} / (\epsilon + 1))) * M_c$$

$$K_v = M_{\text{aire}} * C_p * \text{DELTA}T$$

$$\text{DELTA}T = 19,5 - 12$$

Resultados obtenidos

Todos los parámetros se encuentran en unidades del sistema Internacional (kPa, °C, kg, m, J, sg)

Imagen tomada de la consola ESS

Unit Settings: [kJ]/[C]/[kPa]/[kg]/[degrees]

a ₁ = 0,611	a ₂ = 17,27	a ₃ = 239	A _g = 40	C _g = 602336
C _i = 0,0035	C _p = 1010	ΔT = 7,5	dT _g = 17,76	D _g = -12,72
ε = 3	E _o = -0,2049	g = 0,02028	γ = 0,067	g ₁ = 0,0203
g ₂ = 0,44	g ₃ = 0,0568	g ₄ = 0,31	g _b = 0,01	G _o = 170
K _r = 0,3349	K _s = 5,75	K _v = 1,359E+06	lamda = 2,472E+06	LAMDA1 = 461,5
L ₁ = 2,501E+06	L ₂ = 2381	m ₁ = 0,000001018	m ₂ = 0,33	M _{aire} = 179,4
M _c = -0,000001217	n = 0,098	ω = 0,622	φ = 0,7	P _{atmosferica} = 75,2
P _c = 2,129	P _g = 1,411E+07	q = 10	r = 10	r _o = 998
S = 0,08974	S ₁ = 0,0001841	S ₂ = 0,0009788	S ₃ = 0,05149	T ₀ = 19,5
T _c = 18,63	T _g = 12	T _s = 10,3	V _g = 133	V _i = 0,9709
W _c = 0,01813	W _g = -0,622	W ₁ = 0,075	Z = 0,6	

No unit problems were detected.

Línea de código de la simulación del modelo matemático de la temperatura del suelo y el ambiente en MATLAB.

```
clear all
close all
A_s=3136
A_uc=2456.19
A_u=337.12
```

A_l=614.05
E_l=0.95
E_s=0.7
E_c=0.8534
E_sc=0.9
E_ri=0.95
E_u=0.95
E_uc=0.95
F_l_c=0.4267
F_uc_s=0.0733
F_u_s=0.0733
F_s_c=0.4267
F_s_ri=0.007218
F_s_sc=0.0007218
sigma=0.0000000567051
lambda_s=0.86
dx_s=1.247

rho_s=180
C_p_s=1500
rho_H2O=998
rho_a=1.29
C_p_a=1000
V_s=160
I_o=[0 31.9 36.36 66.4 72.73 82.3 109.1 130.7 145.5 150 181.8 201.7 218.2 250.1
254.5 270 .1 290.9 311.9 327.3 345.6 363.6 391 400 400];

new_s_is=0.1323
alpha_a_s=1.7
T_s=[14.89]
T_a=[16 16.5 17 17 17.3 17.8 18 18.3 19 20.5 23 21.6 17.5 18 20 21 20 19.2 16
15.3 14.8 15 16.3 15];
T_l=[15 14.8 15 15.6 15 15.5 15.2 15.9 16 17 16.3 18 17 19.4 23 22.6 21.5 21.7 21
21.8 20 17.7 15 15];
T_c=[15 16 15 15.4 15 14.6 15.2 16.5 16 17 16.3 16 17 22 23 24 21.5 20 21 19 20
18 15 14.9];

T_uc=[4.5 5 3.8 4 4.2 4.5 4.6 6 6.5 10.5 14.5 15 13.5 14 12.5 16 17 16.3 15 12 8.5
8 8 8];
T_ri=[5 4 3.5 4 4.2 5 4.8 6 6.3 13.9 15 14.2 12.5 12 12.5 14.1 17 16.4 14 10 8.5 8 8
8];

T_s2=[10 9 7 8 7.5 8 8.2 13.6 15 16 20 19 18 17.4 18 20.3 19 19 20 17.2 15 13.8
7.5 7.4];
T_sc=[10 9 7 8 7.5 7.8 8.2 12.6 15 15.9 20 18.7 18 17 18 17 19 20.8 20 18 15 9
7.5 7.7];

```
T_u=[6 6 4.5 5 4.2 4.2 4.8 5.3 6.5 9.8 14 13 12.5 13.6 12.5 12 17 16 14 13 9.5 9 8
7.9];
```

```
C_p_sc=1500
C_p_H2O=4186
```

```
dT_s=0;
for i=1:24
```

```
    Q_rd_s(i)=A_s*new_s_is*I_o(i)
    Q_a_s(i)=A_s*alpha_a_s*(T_a(i)-T_s(i))
    Q_l_s(i)=A_l*E_l*E_c*F_l_c*sigma*(T_l(i)^4-T_c(i)^4)
    Q_uc_s(i)=A_uc*E_uc*E_s*F_uc_s*sigma*(T_uc(i)^4-T_s(i)^4)
    Q_u_s(i)=A_u*E_u*E_s*F_u_s*sigma*(T_u(i)^4-T_s(i)^4)
    Q_s_c(i)=A_s*E_s*E_c*F_s_c*sigma*(T_s(i)^4-T_c(i)^4)
    Q_s_ri(i)=A_s*E_s*E_ri*F_s_ri*sigma*(T_s(i)^4-T_ri(i)^4)
    Q_s_s2(i)=A_s*(lambda_s/dx_s)*(T_s(i)-T_s2(i))
    Q_s_sc(i)=A_s*E_s*E_sc*F_s_sc*sigma*(T_s(i)^4-T_sc(i)^4)
```

```
    dT_s(i)=(Q_rd_s(i)+Q_a_s(i)+Q_l_s(i)+Q_uc_s(i)+Q_u_s(i)-Q_s_c(i)-Q_s_ri(i)-
Q_s_s2(i)-Q_s_sc(i))/...
```

```
    (((0.7*rho_s*C_p_s)+(0.2*rho_H2O*C_p_H2O)+(0.1*rho_a*C_p_a))*V_s)
```

```
    T_s(i+1) =T_s(i)+dT_s(i)
```

```
end
```

```
SUBPLOT(2,2,1), plot(dT_s)
SUBPLOT(2,2,2), plot(T_s)
%SUBPLOT(3,3,1), plot(T_a)
%SUBPLOT(2,1,4), plot(I_o)
%SUBPLOT(2,1,5), plot(T_sc)
%SUBPLOT(2,1,6), plot(T_c)
```

Línea de código de la simulación del modelo matemático de la temperatura dentro del invernadero en MATLAB.

```
clc
clear all
```

```
%"Ecuaciones del modelo de Temperatura"
```

```
%"Variable de Estado (Salida)"
```

```
T_g=0;
```

```
%"Entradas"
```

```
T_s
```

```
T_a
```

```
I_o
```

```
%"Parametros"
```

```
K_r=0.3349;
```

```
K_s=5.75;
```

```
epsilon=3;
```

```
omega=0.622;
```

```
P_atmosferica=75.200;
```

```
a_1=0.611;
```

```
a_2=17.27;
```

```
a_3= 239;
```

```
LAMDA1= 461.52;
```

```
V_i=0.9709;
```

```
S_1=0.00018407;
```

```
S_2=0.0009788;
```

```
S_3=0.051492;
```

```
g_b=0.01;
```

```
g_1=0.0203;
```

```
g_2=0.44;
```

```
g_3=0.0568;
```

```
g_4=0.31;
```

```
%l_o=170;
```

```
C_i=0.00350;
```

```
m_1=0.0000010183;
```

```
m_2=0.33;
```

```
l_o=[0 31.9 36.36 66.4 72.73 82.3 109.1 130.7 145.5 150 181.8 201.7 218.2 250.1  
254.5 270.1 290.9 311.9 327.3 345.6 363.6 391 400 400];
```

```
L_1=2501000;
```

```
L_2=2381;
```

```
phi=0.7;
```

```
r=10;
```

```
n=0.098;
```

```
q=10;
```

```
ro=998;
```

```
gamma= 0.067;
```

```
C_p=1010;
```

```
W_l=0.075;
```

```
M_aire=179.36;
```

```
V_g=133;
```

```
A_g=40;
```

```

Z=0.6;
load Ts;
T_a=[16 16.5 17 17 17.3 17.8 18 18.3 19 20.5 23 21.6 17.5 18 20 21 20 19.2 16
15.3 14.8 15 16.3 15];

%"Ecuaciones"
dT_g=0;

for i=1:24

D_g=a_1*exp((a_2*T_g(i))/(a_3+T_g(i)))-(LAMDA1*(T_g(i)+T_a(i))*V_i)/1000;

S=S_1*T_g(i)^2+S_2*T_g(i)+S_3;

g=g_1*(1-g_2*exp(-g_3*I_o(i)))*exp(-g_4*C_i);

lamda=L_1-L_2*T_g(i);

T_c=(epsilon/(epsilon+1))*T_a(i)+(1/epsilon)*T_g(i);

P_c=a_1*exp((a_2*T_c)/(a_3+T_c));

W_c=(omega*P_c)/(P_atmosferica-P_c);

P_g=(LAMDA1*(T_g(i)+T_a(i))*V_i)/1000;

W_g=(omega*P_g)/(P_atmosferica-P_g);

C_g=M_aire*C_p*(V_g/A_g);

M_c=m_1*abs(T_g(i)-T_c)^m_2*(W_g-W_c);

E_o=W_l*((q*S*n*phi*I_o(i)+r*ro*C_p*D_g*g_b)/(lamda*(S+gamma*(1+(g_b/g)))));

DELTAT = 2;%19.5-12;

K_v = M_aire*C_p*DELTAT;

dT_g(i)=(K_v*(T_a(i)-T_g(i))+K_s*(T_s(i)-T_g(i))+Z*phi*I_o(i)-
lamda*E_o+((lamda/(epsilon+1)))*M_c)/C_g;

T_g(i+1) =T_g(i)+dT_g(i)
end

SUBPLOT(2,2,2), plot(T_g)
axis([0 24 0 24])

```

Línea de código de la aproximación del modelo a un sistema de primer orden en MATLAB.

```
load comportamiento
close all
Ga=tf([-2 2],[2 2])
Gp=tf([18.5],[0.7 1])
sys=Ga*Gp
step(sys,24)
hold on
plot(T_g)
axis([0 24 0 24])

save plantaGs sys
```