



CT-776-SSI  
Don, 2014

CLASIF..	CT 00680
ADQUIS..	CT-776-SS1
FECHA:	22-07-2014
PROCED..	Don: 2014

10.214209 2001

# **Identificación y control de temperatura de un invernadero**

**Tesis de Maestría en Ciencias  
Ingeniería Eléctrica**

Por:

**Edgar Cruz Valeriano**  
Ingeniero en Electrónica

Instituto Tecnológico de Querétaro 2005-2010

Becario de CONACYT, expediente no. 263556

Directores de Tesis

**Dra. Ofelia Begovich Mendoza**

**Dr. José Javier Ruíz León**

CINVESTAV del IPN Unidad Guadalajara, Agosto de 2013.

# Resumen

En este trabajo se propone una metodología para modelar la temperatura y la humedad relativa del prototipo de invernadero construido en CINVESTAV, Unidad Guadalajara. Para este fin, se utiliza un modelo tomado de la literatura, datos adquiridos del prototipo y un algoritmo de optimización.

Es importante señalar, que actualmente el prototipo bajo estudio no cuenta con ningún cultivo, y por lo tanto este trabajo es un primer estudio sobre el control de clima en invernaderos en nuestra institución.

La metodología consiste en tomar un modelo de la literatura, el cual es adaptado al prototipo bajo estudio. Enseguida se detectan los parámetros del modelo cuyos valores no se encuentran en tablas y que además son difíciles de medir. Para encontrar estos valores se propone una función objetivo, la cual es minimizada usando el algoritmo de *optimización por enjambre de partículas* (PSO) en dos etapas, la primera etapa se aplica para determinar los parámetros relacionados con la estructura del prototipo, una vez obtenidos, éstos se agregan al modelo y se aplica la segunda etapa para determinar los parámetros relacionados con los actuadores del prototipo.

Posteriormente se efectúa una validación del modelo con datos reales del prototipo, con el fin de determinar la efectividad del modelo así como la de los parámetros encontrados en las etapas de optimización.

Finalmente se realiza un análisis termodinámico para determinar la capacidad de los actuadores para variar la temperatura del prototipo, y basado en los resultados de este análisis se propone usar aire acondicionado como actuador para regular la temperatura. Con este actuador, se proponen dos leyes de control, la primera basada en retroalimentación de estado y la segunda basada en modos deslizantes, usando una superficie pseudodeslizante, la cual es más adecuada para usarse en sistemas físicos de dinámicas lentas. Finalmente se muestran resultados en simulación al utilizar las leyes de control propuestas.

# Abstract

In this dissertation a methodology for modeling the temperature and the relative humidity of a greenhouse prototype is presented. The prototype used in this work is built at CINVESTAV, Unidad Guadalajara. For this purpose, we use a model taken from the literature, acquired data from prototype and an optimization algorithm.

The prototype is currently under construction, so that it does not have a crop. And therefore, this work is the first study on the climate control in greenhouses in our institution.

The methodology starts by taking a model from the literature, which is adapted to the prototype. Next, the parameters that are either difficult to find in datasheet or difficult to measure are found. To find these parameters, an objective function is proposed, which is minimized by using particle swarm optimization (PSO) in two stages. The first stage is applied in order to find those parameters related to the greenhouse prototype. Once these are obtained, they are added to the model in order to apply a second stage, which is used in order to find those parameters related to the actuators of the prototype.

After that, a model validation is presented by using real data acquired from the greenhouse prototype, which is used in order to determine the effectiveness of the model and the parameters found in the optimization stages.

Finally, a thermodynamic analysis is performed to determine the ability of the actuators to vary the temperature of the prototype, and with the results of this analysis, an air conditioner is proposed to be used as an actuator for regulating the temperature. By using this actuator, two control laws are proposed, the first one is based on state feedback and the second one is based on sliding modes. The first law is presented in the formal way, meanwhile the second one is presented by using a pseudo-sliding surface, which is suitable for use in slow dynamic physical systems. All the results are presented in simulation.

# Agradecimientos

A mis padres, por su cariño y apoyo que siempre me han brindado durante toda mi vida, y a mi hermano.

A mis asesores de tesis, a la Dra. Ofelia Begovich Mendoza y al Dr. José Javier Ruiz León por el apoyo brindado.

A mis compañeros de generación por el apoyo recibido y las experiencias compartidas durante la maestría.

Al CONACYT por la beca otorgada para los estudios de maestría, la cual permitió la elaboración de este trabajo y al CINVESTAV, unidad Guadalajara, por permitirme realizar mis estudios de maestría.

# Índice general

<b>Glosario</b>	<b>XI</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación	2
1.2. Objetivos	2
1.3. Contribuciones del trabajo	3
1.4. Estructura de la tesis	3
<b>2. Preliminares</b>	<b>5</b>
2.1. Respuesta de la planta al ambiente de un invernadero	5
2.1.1. Luz .	5
2.1.2. Temperatura	6
2.1.3. Humedad relativa	7
2.1.4. Ventilación	7
2.1.5. Dióxido de carbono	8
2.2. Dinámica de un invernadero	8
2.3. Optimización por enjambre de partículas	9
<b>3. Prototipo de invernadero</b>	<b>13</b>
3.1. Operación de invernadero	21
3.1.1. Adquisición de datos	21
3.1.2. Control de cortinas	22



3.1.3. Prendido/Apagado de ventiladores	23
<b>4. Modelado del invernadero</b>	<b>25</b>
4.1. Adquisición de datos	25
4.2. Metodología	28
4.2.1. Modelo	28
4.2.2. Adaptaciones	29
4.2.3. Identificación de parámetros	31
4.3. Resultados y validación de la identificación	34
4.3.1. Primera etapa	34
4.3.2. Segunda etapa	36
4.3.3. Validación	39
<b>5. Control de temperatura en un invernadero</b>	<b>43</b>
5.1. Análisis Termodinámico	43
5.2. Aire acondicionado	46
5.3. Modelo definitivo para el sistema de control	49
5.4. Seguimiento de Trayectoria	51
<b>6. Conclusiones</b>	<b>59</b>
6.1. Trabajo futuro	60
<b>Bibliografía</b>	<b>61</b>
<b>A. Apendices</b>	<b>65</b>
A.1. Sensores	65
A.2. Prototipo	67
A.3. Diagrama de conexiones	71
A.4. Fuentes	73
A.5. Tarjeta de adquisición de datos	75
A.6. Programa de adquisición de datos	77

<b>ÍNDICE GENERAL</b>	<b>III</b>
<b>A.7. Programa para cortinas .</b>	<b>78</b>
<b>A.8. Conversión de Humedad Relativa a Humedad Absoluta</b>	<b>79</b>
<b>A.9. Obtención de la función lineal para la humedad de saturación</b>	<b>80</b>

# Índice de tablas

4.1. Parámetros obtenidos de la literatura [1].	30
4.2. Parámetros obtenidos del invernadero.	30
5.1. Datos iniciales tomados de la medición realizada del 6 de Febrero a las 13:43 al 10 de Febrero a las 12:58 de 2013.	44
5.2. Parámetros de entalpía para el aire acondicionado.	47
5.3. Datos para linealizar $u_3$ .	50
A.1. Características del sensor de temperatura-humedad. Ver [2] para consultar hoja de datos.	65
A.2. Características del sensor de $CO_2$ .	65
A.3. Características del sensor de viento. Ver [3] para consultar hoja de datos.	66
A.4. Características del sensor de radiación solar. Ver [4] para consultar hoja de datos.	66
A.5. Características del encoder. Ver [5] para consultar hoja de datos.	66
A.6. Datos de humedad de saturación.	80

# Índice de figuras

2.1. Componentes del micro-clima que influyen en el crecimiento de la planta.	6
3.1. Prototipo de invernadero.	13
3.2. Vista Frontal del prototipo.	14
3.3. Vista Trasera del prototipo.	14
3.4. Invernadero (A la izquierda) y caseta de control (A la derecha).	15
3.5. Prototipo de invernadero (tamaño en metros).	16
3.6. Mecanismo para cortina.	17
3.7. Gabinete principal.	18
3.8. Gabinete principal, en su interior se puede observar las fuentes de alimentación e interruptores principales.	18
3.9. Gabinete principal, en su interior se puede observar las conexiones de la instrumentación.	19
3.10. Gabinetes dentro del prototipo de invernadero.	19
3.11. Gabinetes dentro del prototipo de invernadero, en el interior del gabinete derecho se puede observar la segunda fuente de alimentación e interruptor para su prendido/apagado.	20
3.12. Gabinetes dentro del prototipo de invernadero, en el interior del gabinete izquierdo se puede observar los interruptores para activar manualmente los actuadores en el prototipo.	20
3.13. Programa de adquisición de datos del invernadero.	22
3.14. Programa de control de cortinas del invernadero. .	23
4.1. Configuración Corriente-Voltaje para cada sensor.	26

4.2. Datos adquiridos del invernadero el 15 de Octubre de 2012.	34
4.3. Resultados de la primera etapa de identificación.	36
4.4. Datos adquiridos del invernadero el 26 de Noviembre de 2012.	37
4.5. Resultados de la segunda etapa de identificación.	38
4.6. Datos adquiridos del invernadero del 6 al 10 de Febrero de 2013.	40
4.7. Validación del modelo.	41
5.1. Simulación del enfriamiento en el invernadero causado por los actuadores funcionando al máximo. Temperatura interna medida con actuadores apagados (línea continua en azul), temperatura estimada con los actuadores al máximo (línea discontinua en rojo).	46
5.2. Diagrama a bloques del invernadero.	50
5.3. Temperatura interna medida (azul), temperatura interna estimada sin actuadores (verde) y trayectoria de control que sigue el sistema con el aire acondicionado (rojo).	52
5.4. Señal de control con retroalimentación de estados.	53
5.5. Error de seguimiento con retroalimentación de estados.	53
5.6. Seguimiento de trayectoria con retroalimentación de estados.	54
5.7. Temperatura interna medida (azul), temperatura interna estimada sin actuadores (verde) y trayectoria de control que sigue el sistema con el aire acondicionado (rojo).	55
5.8. Señal de control con modos deslizantes.	55
5.9. Error de seguimiento con modos deslizantes.	56
5.10. Seguimiento de trayectoria con modos deslizantes.	56
A.1. Esquema de Gabinete de Caseta.	67
A.2. Esquema de Gabinete 1 de Invernadero.	68
A.3. Esquema de Gabinete 2 de Invernadero.	69
A.4. Identificación de Cables.	70
A.5. Identificación de Válvulas.	70
A.6. Diagrama de conexiones entre el Gabinete de Caseta y la tarjeta de adquisición de datos. Diagrama general.	71

## ÍNDICE DE FIGURAS

IX

A.7. Diagrama de conexiones entre el Gabinete de Caseta y la tarjeta de adquisición de datos. Diagrama de tarjeta de adquisición.	72
A.8. Fuente ABB CP-E 24/5.0. Más información en [6]. .	73
A.9. Fuente Legrand 466 25. Más información en [7].	74
A.10. Tarjeta de adquisición de datos NI USB DAQ-6229.	75
A.11. Programa de adquisición de datos en Labview 8.5.1.	77
A.12. Programa de adquisición de datos en Labview 8.5.1.	77
A.13. Programa para cortinas en Labview 8.5.1.	78

# Glosario

$A_c$	Coficiente de pérdida por conducción y convección.
$A_i$	Superficie de invernadero.
$A_{vent}$	Área de ventilación.
$\chi_i$	Humedad absoluta interna.
$\hat{\chi}_i$	Humedad absoluta interna calculada por el modelo.
$\chi_o$	Humedad absoluta externa.
$C_p$	Capacidad calorífica del aire.
$C_{pv}$	Calor específico del vapor de agua.
$C_{sat}$	Coficiente de saturación del aire.
$E$	Evotranspiración del aire.
$F_{ac}$	Flujo del aire acondicionado.
$F_F$	Tasa de agua debido a la renovación de aire por ventiladores.
$f_{og}$	Tasa de agua del sistema de nebulización.
$F_v$	Tasa de agua debido a la renovación de aire.
$G$	Flujo de renovación de aire.
$G_0$	Pérdidas por renovación de aire debido a las ventanas.
$G_1$	Pérdidas por renovación de aire debido a los ventiladores en balance de energía.
$G_2$	Pérdidas por renovación de aire debido a los ventiladores en balance de masa.
$H_{ac}$	Entalpía del aire acondicionado.

$H_{acl}$	Humedad del aire acondicionado.
$H_g$	Ancho de las ventanas.
$h_m$	Coefficiente de conductividad entre el aire y la masa térmica.
$\lambda_v$	Calor de evaporación del agua.
$\lambda$	Calor latente de evaporación.
$MV_{fog}$	Activación del sistema de nebulización.
$MV_W$	Activación del sistema de calefacción.
$\phi_F$	Flujo de aire debido a los ventiladores.
$Q_{ac}$	Intercambio de energía por aire acondicionado.
$Q_{cc}$	Intercambio de energía por fenómeno de conducción y convección.
$Q_e$	Pérdida de energía por evotranspiración de cultivo.
$Q_F$	Intercambio de energía por ventiladores.
$Q_m$	Intercambio de energía por masa térmica.
$Q_n$	Pérdida de energía por nebulización.
$Q_s$	Energía solar agregada al aire.
$Q_v$	Intercambio de energía debido a la ventilación por ventanas.
$\rho$	Densidad del aire.
$S_o$	Radiación solar.
$\tau$	Coefficiente de transmisión de invernadero.
$\hat{T}_i$	Temperatura interna calculada por el modelo.
$T_m$	Temperatura de la masa térmica.
$T_o$	Temperatura externa.
$T_{ref}$	Temperatura de referencia.
$u_1$	Entrada del sistema relacionada con la apertura de las cortinas.
$u_2$	Entrada del sistema relacionada con la activación de los ventiladores.



$u_3$	Entrada del sistema relacionada con el aire acondicionado.
$v_i$	Volumen de invernadero.
$V_{int}$	Velocidad interna del viento.
$W_c$	Energía suministrada por el sistema de calefacción.

# Capítulo 1

## Introducción

De todas las actividades de producción agrícola, la industria de invernaderos es el sector con mayor crecimiento a nivel mundial [8].

Un invernadero es una construcción agrícola de estructura metálica, usada para el cultivo y/o protección de plantas, con una cubierta de película plástica translúcida que no permite el paso de la lluvia al interior y que tiene por objetivo reproducir o simular las condiciones climáticas más adecuadas para el crecimiento y desarrollo de las plantas cultivadas establecidas en su interior, con cierta independencia del medio exterior y cuyas dimensiones posibilitan el trabajo de las personas en el interior. Los invernaderos pueden contar con un aislamiento total de plástico en la parte superior y malla en los laterales [9]. Como consecuencia un invernadero proporciona una mayor producción sobre períodos más prolongados, ofrece una mejor calidad de producto y requiere menor uso de pesticidas. Sin embargo, el costo por unidad de área es mayor que con cultivos a cielo abierto, tomándose esta última como desventaja principal [8].

El uso de un invernadero se remonta al siglo primero de nuestra era, cuando se necesitaba cosecha de pepinos fuera de temporada para el emperador Tiberio, teniéndose como el primer registro de una cosecha protegida del medio ambiente [10]. En el siglo XVI, se usaban linternas, jarras y otras estructuras similares cubiertas con vidrio para proteger las cosechas del frío. Hacia el siglo XVII, se usaban piezas portátiles de madera cubiertas con papel encerado translúcido para calentar el medio ambiente de las plantas. Durante el mismo siglo, en Francia e Inglaterra los invernaderos eran calentados usando estiércol y cubiertos con paneles de vidrio. El primer invernadero apareció por 1700 y usaba un techo inclinado de vidrio. La protección del cultivo se pudo establecer de forma completa con la introducción de polietileno después de la segunda guerra mundial. El primero uso de polietileno como cubierta para un invernadero fue en 1948, cuando el Profesor Emery Myers Emmert de la Universidad de Kentucky, EUA, usó este material pues era más barato que el vidrio [10].

## 1.1. Motivación

Controlar todas las variables dentro de un invernadero tales como: temperatura, humedad, concentración de  $CO_2$ , etc., es una tarea complicada. Por esta razón es importante desarrollar buenos sistemas de control, y para lograrlo, es de suma importancia tener un buen modelo que describa el sistema para así poder diseñar sistemas de control adecuados.

Existen muchas investigaciones sobre modelado de invernaderos que toman y resuelven este problema desde varias perspectivas, la mayoría se basan en balances de masa y energía ([11], [12], [13]) usando técnicas convencionales como: regresión lineal [12], método por subespacios [14], modelos autoregresivos [15], mínimos cuadrados [16], etc., o usando métodos heurísticos como redes neuronales [17] o conjuntos difusos [18], etc. Muchas de estas investigaciones presentan el problema de ser muy complejas debido a la gran cantidad de variables y parámetros que presenta la física del invernadero, y como consecuencia se tienen modelos que generalmente no describen correctamente la naturaleza de un invernadero, este problema se hace aún mayor cuando se tiene que las variables del medio ambiente presentan no linealidades y características estocásticas.

Por estas razones la construcción de un invernadero se puede hacer muy compleja, ya que requiere de numerosos análisis y estudios para su diseño previos a su construcción. Una forma de construir un invernadero es a través de una sucesión de etapas, cada una muy bien limitada con el propósito de obtener los mejores datos de un invernadero y así poder determinar la mejor solución de diseño, por lo que se ha adoptado esta forma para este trabajo.

Por otro lado, se tiene el problema de la instrumentación, la cual también será solucionada a través de una sucesión de etapas con el fin de determinar características como: sensores, actuadores, cableado, tarjeta de adquisición de datos, etc.

Así que para poder controlar las variables de un invernadero es necesario resolver dos problemas al mismo tiempo: construcción e instrumentación.

## 1.2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es aplicar una técnica de identificación que sea fácil, eficiente e intuitiva. Para lograr esto, primero se propondrá un modelo basado en leyes físicas, cuyos parámetros se ajustarán gracias a un algoritmo heurístico y a las señales adquiridas de un prototipo de invernadero.

Debido a que la física de un invernadero tiene muchas variables como: temperatura, humedad, concentración de  $CO_2$ , etc., en este trabajo se enfocará principalmente en la temperatura tanto en modelado como en el control, y para el caso de la humedad, solo se tomará en modelado.

Para obtener un modelo de un invernadero, es necesario contar con un prototipo de invernadero, el cual está en una etapa de construcción. Para cumplir con el objetivo principal es de suma importancia realizar la instrumentación necesaria para la adquisición de señales, ésta además de consistir en la electrónica, también consiste en realizar análisis de las señales adquiridas del invernadero con el propósito de determinar varios aspectos como: frecuencia de muestreo, tipo de filtros para eliminar el ruido de las señales, etc.

Por otro parte, también es necesario caracterizar los actuadores disponibles para este prototipo, los cuales consisten en cortinas y ventiladores, así como de adaptarlos físicamente al invernadero para su buen funcionamiento.

### 1.3. Contribuciones del trabajo

La contribución principal de este trabajo es la de proporcionar una identificación usando un modelo tomado de la literatura y un algoritmo heurístico con el fin de adaptar el modelo a un prototipo de invernadero, la cual ofrece buenos resultados para describir la física de la temperatura interna del prototipo. Además se proporciona la instrumentación para alcanzar los objetivos así como la descripción del invernadero a detalle.

Y finalmente se proporciona la aplicación de un control para la temperatura interna usando la técnica de modos deslizantes, la cual ofrece buenos resultados en simulación.

### 1.4. Estructura de la tesis

La tesis se ordena de la siguiente forma:

- **Capítulo 2 - Preliminares.** En este capítulo se describen las herramientas y conceptos usados en esta tesis de manera muy general con el propósito de facilitar el entendimiento de los capítulos posteriores.
- **Capítulo 3 - Prototipo.** En este capítulo se describe a detalle el prototipo de invernadero así como de la instrumentación usada.
- **Capítulo 4 - Modelado.** En este capítulo se propone y explica la metodología que se llevó a cabo para identificar un invernadero, este capítulo abarca desde la descripción de las ecuaciones que describen el invernadero hasta las adaptaciones de las ecuaciones explicando en detalle cada término, parámetro y constante.

Capítulo 5 - Control. En este capítulo se proponen leyes de control basadas en los resultados del capítulo de Modelado para así poder controlar la temperatura interna de un invernadero.

- Capítulo 6 - Conclusiones. Finalmente se presentan las conclusiones de los resultados obtenidos y el trabajo futuro.

Al final de este trabajo se invita al lector a revisar los apéndices.

## Capítulo 2

# Preliminares

El estudio de un invernadero es muy complejo, ya que requiere de muchas herramientas y de un amplio marco teórico que abarca desde la botánica hasta la termodinámica pasando por la ingeniería, por esta razón en este capítulo se describirá de forma breve los conocimientos básicos aplicados a este trabajo con el propósito de que se pueda entender de forma fácil y sencilla los capítulos posteriores. También se mencionará al final de este capítulo la herramienta principal para lograr la identificación de un invernadero, la cual consiste en un algoritmo heurístico llamado *optimización por enjambre de partículas*.

### 2.1. Respuesta de la planta al ambiente de un invernadero

La producción de cosecha está influenciada no solo por sus características naturales, sino también por el micro-clima alrededor de ella. Los elementos que componen el micro-clima de una cosecha son: luz, temperatura, composición de aire y la cobertura vegetal. En cultivos a cielo abierto, la manipulación de la raíz es posible solo con labranza, irrigación y aplicación de fertilizantes. En este caso, se dice que la raíz está modificada pero no controlada. Sin embargo, en los invernaderos, debido a su ambiente cerrado, se puede controlar uno o más componentes del micro-clima como [10]: temperatura, humedad, concentración de  $CO_2$ , etc.

#### 2.1.1. Luz

La luz visible de la radiación solar es una fuente de energía para las plantas. Tanto la energía luminosa como el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y el agua entran en el proceso de fotosíntesis donde se forman los carbohidratos en presencia de la clorofila, la producción de carbohidratos es responsable del crecimiento y reproducción de la planta. La cantidad de

fotosíntesis está determinada por los elementos fertilizantes disponibles, agua, dióxido de carbono, luz y temperatura, ver Fig. 2.1.

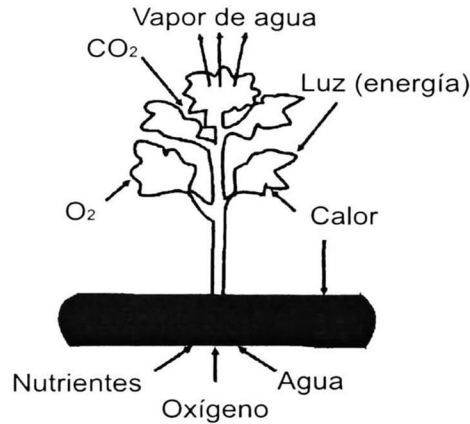
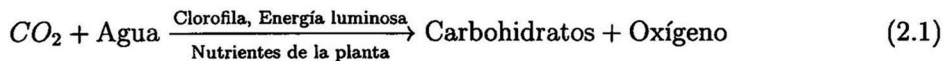


Figura 2.1: Componentes del micro-clima que influyen en el crecimiento de la planta.

La reacción de fotosíntesis se puede representar como [10]



Se requiere de una cantidad considerable de energía para tomar el carbono que está combinado con el oxígeno presente en el  $CO_2$ , y usarlo para formar carbohidratos. Así la energía luminosa es usada para crear carbohidratos. Si la intensidad luminosa disminuye, la fotosíntesis disminuye y por lo tanto el crecimiento de la planta también disminuye. Si la intensidad luminosa es más alta que la intensidad óptima, el crecimiento de la planta también disminuye debido al daño causado a los cloroplastos.

### 2.1.2. Temperatura

La temperatura es una medida del nivel de calor presente. Todos los cultivos tienen un rango de temperatura óptimo para su crecimiento. Debajo de este rango, el proceso de vida de la planta se detiene debido a la formación de hielo dentro del tejido de las hojas, haciendo posible que las células se dañen debido a las estructuras de los cristales del hielo. En condiciones extremas de calor, las enzimas se desnaturalizan, y debido a que las enzimas controlan procesos vitales para la vida, el proceso de vida de la planta también se detiene. La cantidad de reacciones controladas por las enzimas frecuentemente doblan o triplican su

cantidad por cada aumento de 10°C en la temperatura, hasta que alcanzan una temperatura óptima [10].

### **2.1.3. Humedad relativa**

Dado que el invernadero es un espacio cerrado, la humedad relativa del aire dentro del invernadero será mayor que fuera de éste, debido a la humedad agregada por el proceso de evotranspiración, algo de esta humedad escapa del invernadero debido a la ventilación. también el calor sensible [1] de entrada hace que disminuya la humedad relativa.

Para poder mantener la humedad relativa en niveles deseables dentro de un invernadero, se requiere de procesos de humidificación y deshumidificación. Para la mayoría de los cultivos el rango aceptable de humedad relativa está entre 50 % y 80 %. Sin embargo, para que algunas plantas puedan crecer, se necesitan niveles de hasta 90 %.

Debido a que se agrega calor sensible, ya sea durante un día de verano como radiación solar, o durante una noche de invierno como calor que proviene del sistema de calefacción, se crea una reducción en la humedad relativa del aire. Con el propósito de mantener la humedad relativa en un cierto nivel, se emplean sistemas de nebulización y paquetes de enfriamiento evaporativo. Cuando los niveles de humedad relativa son altos, se usan ventiladores, deshumidificadores químicos y condensadores para bajar la humedad relativa dentro del invernadero.

### **2.1.4. Ventilación**

La ventilación en un invernadero se usa ya sea para bajar la temperatura del aire del invernadero, o para reponer el suplemento de dióxido de carbono, o para moderar la humedad relativa del aire.

Dentro de un invernadero se recomienda generalmente no superar una temperatura interna de 35°C para un cultivo. Es muy posible tener la temperatura del aire de un invernadero debajo de este límite durante primavera y otoño simplemente con una buena ventilación.

La ventilación en un invernadero puede ser natural o forzada. En el caso de invernaderos pequeños (menos de 6m de ancho) la ventilación natural puede ser muy efectiva durante las temporadas de primavera y otoño. Sin embargo, la ventilación forzada hace uso de ventiladores, y es esencial para un control preciso de niveles de temperatura del aire, humedad y dióxido de carbono.



### 2.1.5. Dióxido de carbono

El carbono es un nutriente esencial para una planta, éste se encuentra en la mayoría de los nutrientes de una planta. Cerca del 40 % de la materia seca de una planta está compuesta por carbono. El dióxido de carbono ( $CO_2$ ) en el aire es una fuente importante de carbono para una planta. Bajo condiciones normales, el  $CO_2$  existe como un gas en la atmósfera con una concentración de 0.03 % o 345 ppm (ppm: partes por millón).

Durante el día, cuando se realiza la fotosíntesis bajo luz natural, las plantas dentro de un invernadero bajan el nivel de  $CO_2$  por debajo de 200 ppm. Bajo estas circunstancias los niveles de  $CO_2$  se incrementan por filtraciones o ventilación, donde el aire externo que entra mantiene el  $CO_2$  a un nivel ambiental. Si el nivel de  $CO_2$  es menor que el nivel ambiental, existirá un retardo en el crecimiento de una planta.

En ambientes fríos, el mantener niveles de  $CO_2$  con ventilación puede resultar muy caro, debido a la necesidad de calentar el aire que entra al invernadero. El nivel de  $CO_2$  exacto para un invernadero varía dependiendo del cultivo, dado que debe estar correlacionado con otras variables tales como: luz, temperatura, niveles de nutrientes, cultivo y grado de madurez. La mayoría de los cultivos responden favorablemente al  $CO_2$  en concentraciones desde 1000 a 1200 ppm.

## 2.2. Dinámica de un invernadero

La dinámica de un invernadero se puede describir mediante dos leyes fundamentales de la física ([1], [19])

- Ley de la conservación de la energía.
- Ley de la conservación de la masa.

El *principio de conservación de la energía* se define como: el cambio neto de la energía del sistema durante un proceso es igual a la diferencia entre la energía total que entra y la energía total que sale del sistema durante el proceso, es decir

$$\text{“Energía total que entra”} - \text{“Energía total que sale”} = \text{“Cambio neto de energía”} \quad (2.2)$$

o bien,

$$E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}} = \Delta E_{\text{sistema}}. \quad (2.3)$$

También se puede expresar en forma de tasa como

$$\dot{E}_{\text{entrada}} - \dot{E}_{\text{salida}} = \frac{dE_{\text{sistema}}}{dt}, \quad (2.4)$$

A las ecuaciones (2.3) y (2.4) se les hace referencia como *balance de energía* y están expresadas en  $kJ$  y  $kW$  respectivamente. A pesar de que  $kW$  se usa para referirse a cuestiones de potencia, en este trabajo se le hará uso para referirse a cuestiones de energía por unidad de tiempo.

El *principio de la conservación de la masa* para un volumen de control se expresa como: la transferencia neta de masa hacia o desde el volumen de control durante un intervalo de tiempo  $\Delta t$  es igual al cambio neto en la masa total dentro del volumen de control durante  $\Delta t$ , es decir

$$\text{“Masa total que entra”} - \text{“Masa total que sale”} = \text{“Cambio neto de masa”} \quad (2.5)$$

o bien,

$$m_{\text{entrada}} - m_{\text{salida}} = \Delta m_{VC}, \quad (2.6)$$

donde  $\Delta m_{VC}$  es el cambio en la masa del volumen de control durante el proceso y está expresado en  $kg$ . También se puede expresar en la forma de tasa como

$$\dot{m}_{\text{entrada}} - \dot{m}_{\text{salida}} = \frac{dm_{VC}}{dt}, \quad (2.7)$$

donde  $\dot{m}_{\text{entrada}}$  y  $\dot{m}_{\text{salida}}$  son los flujos másicos hacia adentro y hacia afuera del volumen de control, y  $dm_{VC}/dt$  es la rapidez de cambio de masa con respecto al tiempo dentro de las fronteras del volumen de control, ésta se expresa en  $kg s^{-1}$ . Comúnmente a las ecuaciones (2.6) y (2.7) se les hace referencia como *balance de masa* y son aplicables a cualquier volumen de control que experimenta alguna clase de proceso.

La energía se puede transferir hacia o desde un sistema en tres formas

- Transferencia de calor, “ $Q$ ” relacionado con la energía de las moléculas y por lo tanto la del sistema.
- Transferencia de trabajo, “ $W$ ” es aquella interacción que no es causada por una diferencia de temperatura entre un sistema y el exterior.
- Flujo másico, “ $m$ ” cuando entra masa a un sistema, la energía de éste aumenta debido a que la masa lleva consigo energía.

## 2.3. Optimización por enjambre de partículas

Una de las columnas principales de este trabajo es la de obtener un modelo matemático de un invernadero y debido a la complejidad de un modelo para un invernadero es indispensable

utilizar algoritmos heurísticos, de esta manera se toma un modelo de la literatura y se propone una función de error tal que, al ser minimizada bajo ciertos criterios que se verán en el siguiente capítulo, se podrá determinar el comportamiento físico de un invernadero. Para lograr este objetivo se hace uso de la optimización por enjambre de partículas (PSO, Particle Swarm Optimization) debido a que las ecuaciones matemáticas de un invernadero son muy complejas ya que presentan muchas variables, parámetros y constantes, ésto ocasiona que la función de error que se quiere minimizar presente un amplio conjunto de mínimos locales, por esta última razón no se hace uso de otras técnicas de minimización como por ejemplo mínimos cuadrados.

PSO ha sido usado para resolver varios problemas de optimización desde que fue propuesto por Kennedy y Eberhart en 1995, [20], [21], [22]. A continuación se describe la técnica en detalle.

Sea  $A \subset R^n$ , el espacio de búsqueda, y  $f : A \rightarrow Y \subseteq R$  la función objetivo. Por simplicidad suponemos que  $A$  es conocido. PSO es un algoritmo basado en el comportamiento de una población, esta población se le denomina *enjambre* y a sus individuos, *partículas*. El enjambre se define como

$$S = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}, \quad (2.8)$$

de  $N$  partículas (soluciones candidatas), definidas como

$$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})^T \in A, i = 1, 2, \dots, N. \quad (2.9)$$

Los índices se asignan de forma arbitraria a las partículas, mientras que  $N$  es un parámetro del algoritmo definido por el usuario. Se hace la suposición de que la función objetivo  $f(x)$  está definida para todos los puntos en  $A$ . De esta forma, cada partícula tiene un valor único de la función,  $f_i = f(x_i) \in Y$

También se hace la suposición de que las partículas se mueven dentro del espacio de búsqueda  $A$ , iterativamente. Esto es posible al ajustar sus *posiciones* usando un término que las cambie, llamado *velocidad*, y se describe como

$$v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})^T, i = 1, 2, \dots, N. \quad (2.10)$$

Si  $t$  denota el valor de la iteración, entonces la posición y velocidad actual de la  $i$ -ésima partícula se denota como  $x_i(t)$  y  $v_i(t)$ , respectivamente. La velocidad se adapta basándose en la información previa del algoritmo. Esto se realiza con un término de memoria, donde cada partícula puede almacenar su *mejor posición* que ha visitado durante su búsqueda. Para este propósito, además del enjambre  $S$ , el cual contiene las posiciones actuales de las partículas, PSO mantiene también una memoria

$$P = (p_1, p_2, \dots, p_N), \quad (2.11)$$

el cual contiene las mejores posiciones visitadas por cada partícula

$$p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{in})^T \in A, i = 1, 2, \dots, N, \quad (2.12)$$

estas posiciones se definen como

$$p_i(t) = \arg \min_i f_i(t). \quad (2.13)$$

Existe un mecanismo de intercambio de información que permite a las partículas comunicar sus experiencias. El algoritmo aproxima el mínimo global con la mejor posición que se ha visitado por las partículas. Sea  $g$  el índice de la mejor posición con el valor más bajo de  $P$  en la iteración  $t$ , entonces

$$p_g(t) = \arg \min_i f(p_i(t)). \quad (2.14)$$

Luego, cada partícula actualiza su posición con las siguientes ecuaciones

$$v_{ij}(t+1) = v_{ij}(t) + c_1 R_1(p_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + c_2 R_2(p_{gj}(t) - x_{ij}(t)) \quad (2.15)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (2.16)$$

$$i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, n,$$

donde  $R_1$  y  $R_2$  son vectores de dimensión  $n$  uniformemente distribuidos en el rango  $[0,1]$ ; y  $c_1, c_2$  son factores de peso, también llamados parámetros *cognitivo* y *social*, respectivamente.

En cada iteración, después de actualizar y evaluar las partículas, las mejores posiciones (memoria) se actualizan también. Entonces, la nueva mejor posición de  $x_i$  en la iteración  $t+1$  se define como

$$p_i(t+1) = \begin{cases} x_i(t+1) & \text{si } f(x_i(t+1)) \leq f(p_i(t)), \\ p_i(t) & \text{otro caso.} \end{cases} \quad (2.17)$$

El nuevo índice  $g$  obtenido para las mejores posiciones actualizadas completa una iteración en el algoritmo PSO.

## Capítulo 3

# Prototipo de invernadero

El invernadero usado en este trabajo para experimentación consiste en un prototipo localizado en las instalaciones de CINVESTAV (Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional) Unidad Guadalajara, éste se muestra en la Fig. 3.1.

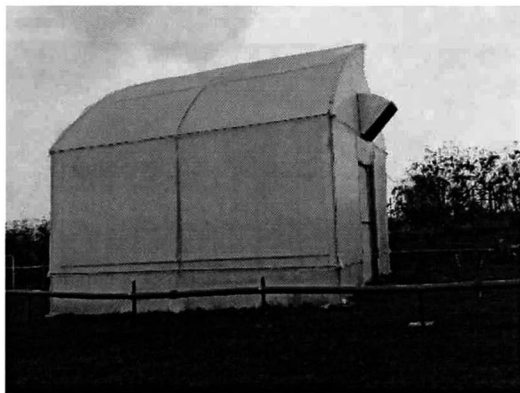


Figura 3.1: Prototipo de invernadero.

En las Figuras 3.2 y 3.3 se muestra el prototipo visto desde enfrente y atrás respectivamente, en estas fotografías tomadas del prototipo se puede apreciar la cubierta de plástico y los ventiladores así como de la entrada principal del invernadero.

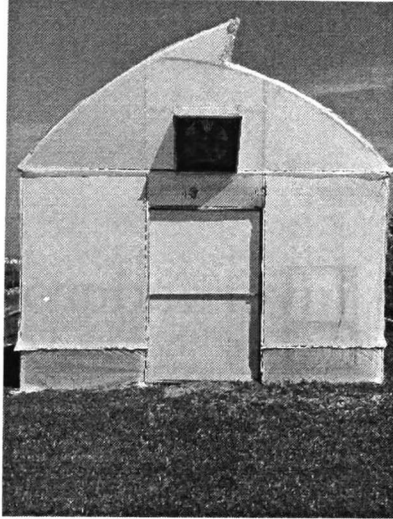


Figura 3.2: Vista Frontal del prototipo.

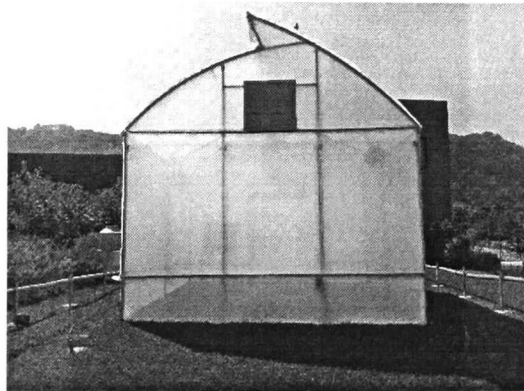


Figura 3.3: Vista Trasera del prototipo.

En la Fig. 3.4 se muestra la caseta de control que está a pocos metros del prototipo de invernadero, en esta caseta se encuentran los paneles principales de alimentación así como de computadores y herramientas, también se puede observar que en los costados de la estructura se encuentran las cortinas.

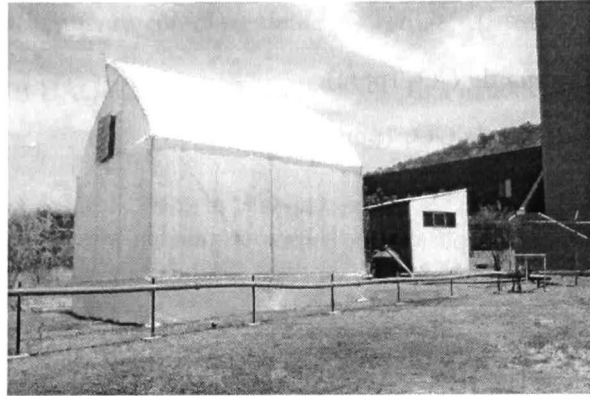


Figura 3.4: Invernadero (A la izquierda) y caseta de control (A la derecha).

Las características principales de este invernadero son:

- Área efectiva de invernadero de  $30m^2$
- Altura total de  $5.14m$ .
- Altura a la base del arco de  $3m$ .
- Plástico UV2 de duración de 24 meses.
- 2 Cortinas laterales de  $2.18m$  de ancho y  $5.23m$  de largo.
- Ventana cenital de  $0.50m$  de ancho y  $5.23m$  de largo.

El prototipo de invernadero tiene sensores para medir

- Temperatura interna ( $^{\circ}C$ ).
- Temperatura externa ( $^{\circ}C$ ).
- Humedad relativa interna (% HR).
- Humedad relativa externa (% HR).
- Velocidad de viento interna ( $ms^{-1}$ ).
- Velocidad de viento externa ( $ms^{-1}$ ).

Radiación solar ( $Wm^{-2}$ ).

Concentración interna de  $CO_2$  (ppm).

- Concentración externa de  $CO_2$  (ppm).

Las características específicas para cada sensor se pueden ver en el Apéndice A.1, donde también se incluyen las direcciones URL de cada sensor para así poder acceder a la hoja de datos correspondiente.

En la Fig. 3.5 se muestran las dimensiones del prototipo de invernadero.

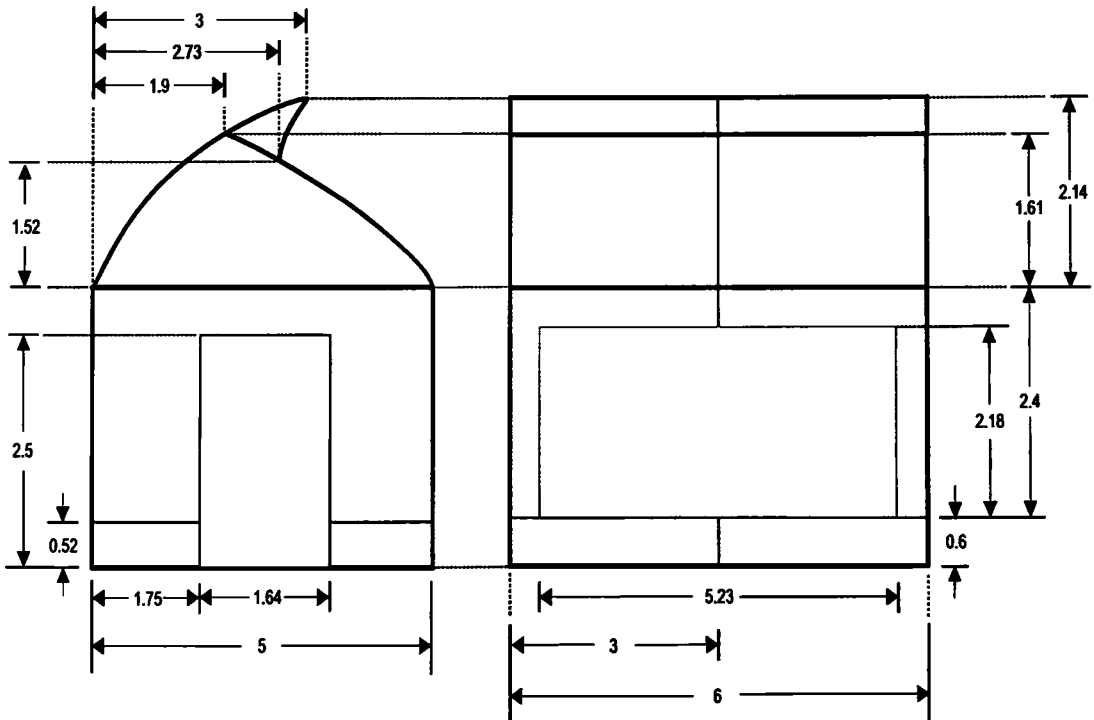


Figura 3.5: Prototipo de invernadero (tamaño en metros).



El prototipo también cuenta con el siguiente equipo:

- 1 tarjeta NI USB DAQ-6229. Ver Apéndice A.5 para más detalles.
- 1 PC de escritorio.
- 2 ventiladores de  $\frac{1}{4}$  HP y  $750m^3h^{-1}$  cada uno.
- 2 cortinas laterales, cada cortina tiene un sistema mecánico automático-manual, el cual consiste en un sistema de engranes acoplado a un motor de 100W con torque de  $100Nm$  y velocidad de 3.6 rpm, y a un encoder de la serie E50S de tipo incremental. Ver Fig. 3.6.
- 2 humidificadores de  $\frac{1}{20}$  HP, 115V. 60Hz cada uno.
- 1 cortina cenital, la cual actualmente se posiciona a través de un sistema mecánico de engranes y polea.

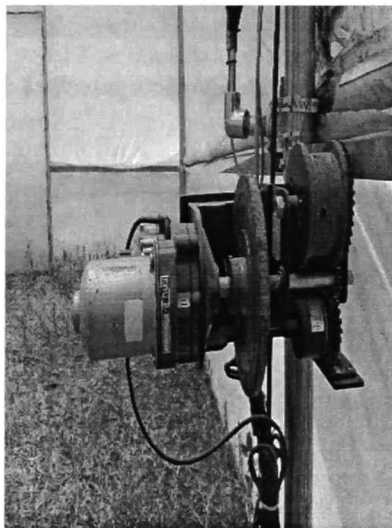


Figura 3.6: Mecanismo para cortina.

Todo este equipo descrito anteriormente está distribuido entre el invernadero y una caseta de control, en las Figuras 3.7, 3.8 y 3.9 se muestra el gabinete principal que está dentro

de dicha caseta, este gabinete alimenta eléctricamente al segundo conjunto de gabinetes localizados al interior del prototipo de invernadero, y permite controlar de forma manual los actuadores.

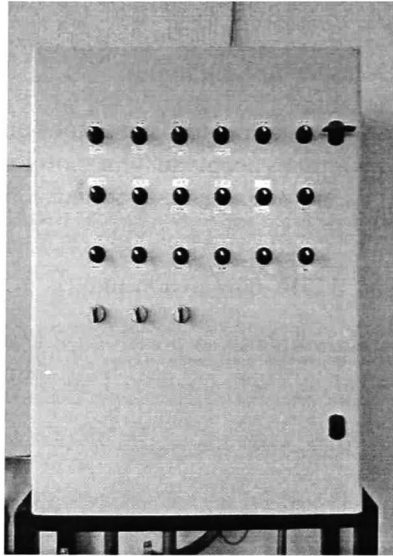


Figura 3.7: Gabinete principal.

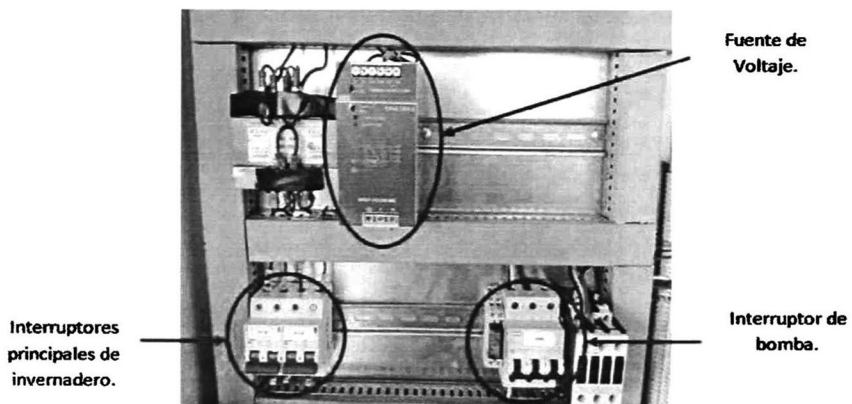


Figura 3.8: Gabinete principal, en su interior se puede observar las fuentes de alimentación e interruptores principales.

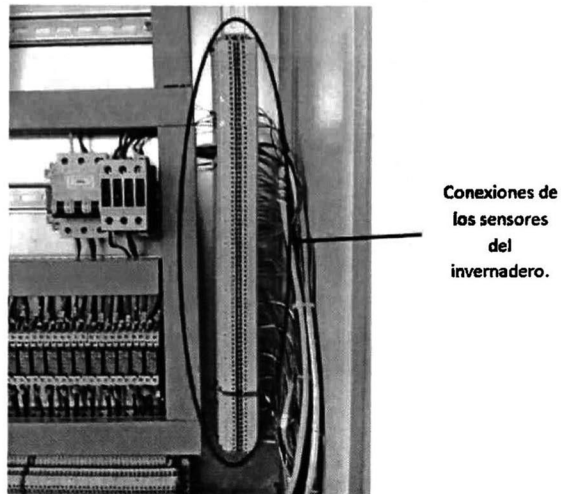


Figura 3.9: Gabinete principal, en su interior se puede observar las conexiones de la instrumentación.

En las Figuras 3.10, 3.11 y 3.12 se muestra el segundo conjunto de gabinetes, los cuales están localizados dentro del prototipo de invernadero, éstos alimentan eléctricamente la instrumentación y los actuadores.

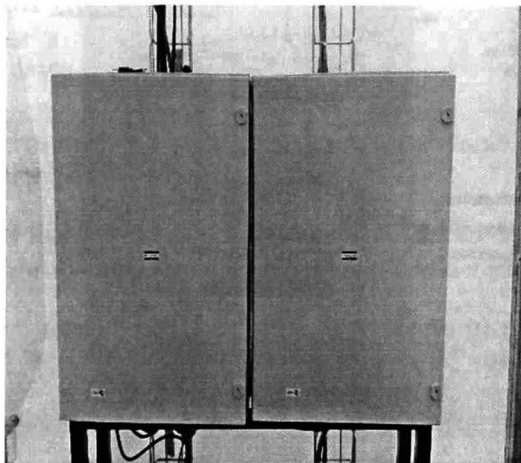


Figura 3.10: Gabinetes dentro del prototipo de invernadero.

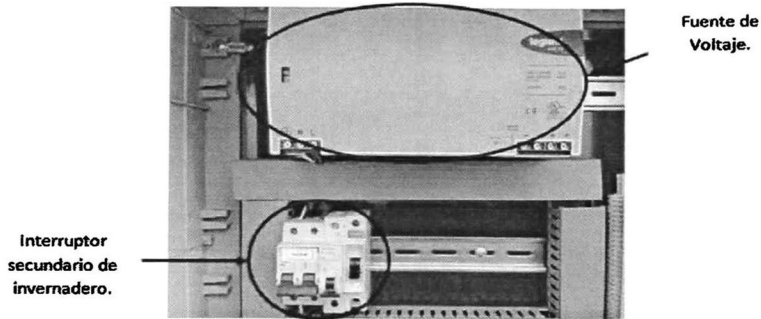


Figura 3.11: Gabinetes dentro del prototipo de invernadero, en el interior del gabinete derecho se puede observar la segunda fuente de alimentación e interruptor para su prendido/apagado.

Los diagramas de las conexiones de los gabinetes se muestran en el Apéndice A.2, y una breve descripción de las fuentes usadas se muestra en el Apéndice A.4.

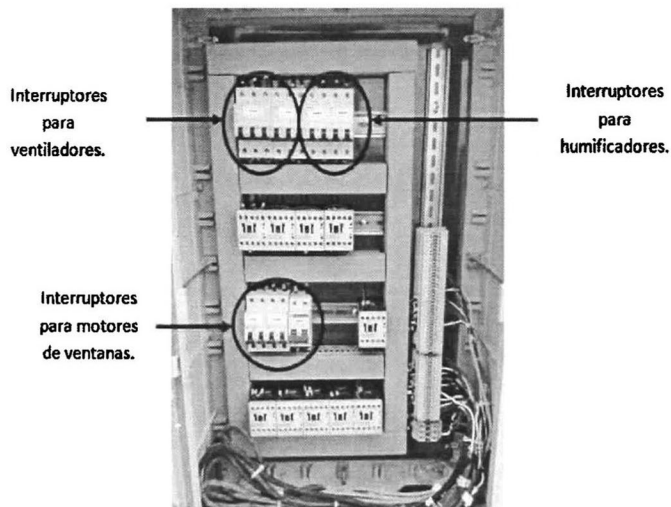


Figura 3.12: Gabinetes dentro del prototipo de invernadero, en el interior del gabinete izquierdo se puede observar los interruptores para activar manualmente los actuadores en el prototipo.

## 3.1. Operación de invernadero

Para poder operar el invernadero se realizaron las siguientes tareas

- **Sensores.-** Se realizó el respectivo cableado entre los distintos sensores del invernadero y la tarjeta de adquisición de datos, así como de la programación para la adquisición de datos, ver Apéndices A.3, A.6.
- **Actuadores.-** Se realizó una interfaz para activar las cortinas a través de una PC usando una tarjeta de datos, esta interfaz consiste en un conjunto de relevadores para acoplar y activar las cortinas, también se realizó un programa para controlar la posición de las cortinas usando encoders de cuadratura como sensor de posición, ver Apéndices A.3, A.7.

En el caso de la programación para el control de las cortinas tan solo se requirió de un control proporcional con ganancia de uno, ya que el motor usado para posicionar las cortinas ofrece una excelente exactitud en posición debido a que la velocidad del motor es muy lenta, se abre o cierra la cortina en un tiempo aproximado de 15 minutos con 43 segundos para una distancia de  $1.6m$ , cabe destacar que esta distancia es la máxima permitida por los motores pues la ventana puede abrirse hasta  $2.18m$ . A partir de aquí nos referiremos al prototipo de invernadero simplemente como invernadero.

### 3.1.1. Adquisición de datos

Para poder adquirir datos en el invernadero se llevan a cabo los siguientes pasos

- Se prenden los interruptores principales del invernadero como se muestra en la Fig. 3.7, los cuales están dentro de la caseta de control.
- Luego, se prende el interruptor secundario del invernadero como se muestra en la Fig. 3.11, el cual está dentro del invernadero en el gabinete derecho.
- Después se abre el programa "DAQ-USB6229\_sensores.01.vi" el cual está en "C : \Users \ Miguel \ Documents \ Invernadero\" en la PC del invernadero.

Se hace click en el botón "Run" como se muestra en la Fig. 3.13.

- Para terminar la adquisición de datos, se hace click en el botón de "Stop" como se muestra en la Fig. 3.13.

- Los datos se guardan en “C : \Users\Miguel\Documents\Invernadero\invernadero.tdms”

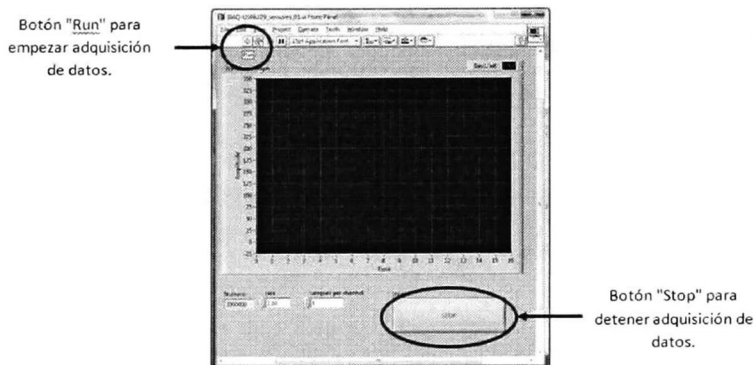


Figura 3.13: Programa de adquisición de datos del invernadero.

### 3.1.2. Control de cortinas

Para poder abrir/cerrar las cortinas del invernadero se llevan a cabo los siguientes pasos

- 1 Se prenden los interruptores principales del invernadero como se muestra en la Fig. 3.7, los cuales están dentro de la caseta de control.
- 2 Luego, se prende el interruptor secundario del invernadero como se muestra en la Fig. 3.11, el cual está dentro del invernadero en el gabinete derecho.
- 3 Después se prenden los interruptores para motores de ventanas como se muestra en la Fig. 3.12, los cuales están dentro del invernadero en el gabinete izquierdo.
- 4 Luego se abre el programa “DAQ-USB6229-Control.cortinas.vi”, el cual está en “C : \Users \ Miguel \ Documents \ Invernadero \” en la PC del invernadero, ver Apéndice A.7 para más detalle.
- 5 Para poder controlar la apertura/cierre de las cortinas, solo es necesario girar el botón que se muestra en la Fig. 3.14 hasta la posición deseada.

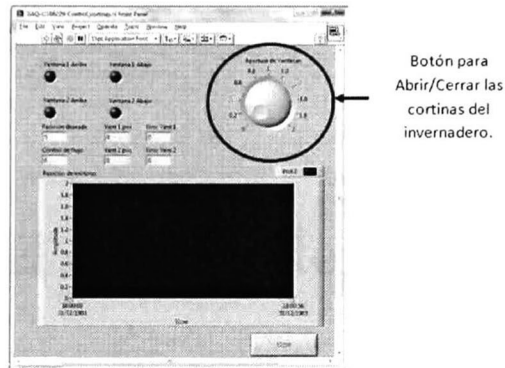


Figura 3.14: Programa de control de cortinas del invernadero.

### 3.1.3. Prendido/Apagado de ventiladores

Para prender/apagar los ventiladores del invernadero se llevan a cabo los siguientes pasos

- Se prenden los interruptores principales del invernadero como se muestra en la Fig. 3.7, los cuales están dentro de la caseta de control.
- Luego, se prende el interruptor secundario del invernadero como se muestra en la Fig. 3.11, el cual está dentro del invernadero en el gabinete derecho.
- Después se prenden los interruptores para ventiladores como se muestra en la Fig. 3.12, los cuales están dentro del invernadero en el gabinete izquierdo.
- Y finalmente se activan los botones que están en el frente del gabinete principal dentro de la caseta de control, ver Fig. 3.7.

## Capítulo 4

# Modelado del invernadero

La dinámica de un invernadero se describe generalmente por dos tipos de metodologías de modelado:

- Modelos en caja negra. Éstos tratan de aproximar el comportamiento a través del análisis de los datos de entrada-salida del proceso. Por ejemplo: ajuste polinomial, redes neuronales [17], lógica difusa [18], [23], etc.
- Modelos de conocimiento. Son aquellos que describen los fenómenos físicos por medio de ecuaciones diferenciales (usualmente en espacio de estados). En este tipo de modelos, los parámetros tienen una interpretación física. Sin embargo, la obtención de este tipo de modelos es muy difícil debido a que los sistemas presentan no linealidades, retardos, fenómenos estocásticos, múltiples variables, etc.

Uno de los principales problemas al obtener un modelo de conocimientos para un invernadero es que involucra una gran cantidad de parámetros, la mayoría de éstos pueden medirse (ejemplo: volumen de invernadero, áreas de invernadero, etc.), pero otros son muy difíciles de obtener (ejemplo: coeficiente de pérdida por conducción y convección, etc.) ya que en general se usan métodos experimentales para determinar sus valores de forma aproximada, lo cual es una tarea muy complicada y una desventaja para el diseño de sistemas de control.

### 4.1. Adquisición de datos

La adquisición de datos que se toma del invernadero se realiza con una tarjeta NI USB DAQ-6229 (ver Apéndice A.5) y un programa elaborado en Labview<sup>TM</sup>8.5.1 (ver Apéndices A.6 y A.7).



Debido a que este trabajo es el primero en considerar experimentos con un prototipo de invernadero en CINVESTAV Unidad Guadalajara, el tiempo de muestreo que se propone para este trabajo es de 1 segundo, éste se determinó de forma experimental, ya que permite analizar de forma cualitativa las mediciones en función de los cambios ambientales (radiación solar, temperatura externa, etc.), además de que estas dinámicas son muy lentas. Existe mucha literatura donde se proponen diversos tiempos de muestreo, algunos tan largos como 5 minutos [24], y algunos otros tan cortos como de 15 segundos [11], 5 segundos [25], etc., donde se destaca que los trabajos donde se proponen tiempos de muestreo más largos son aquellos que presentan algoritmos de control implementados en tiempo real y algoritmos de identificación complejos, y aquellos donde se proponen tiempos de muestreo cortos son aquellos que presentan identificación fuera de línea.

Las señales adquiridas del invernadero son:

- Temperatura interna ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- Temperatura externa ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- Humedad relativa interna (% HR).
- Humedad relativa externa (% HR).
- Velocidad de viento interna ( $\text{ms}^{-1}$ ).
- Velocidad de viento externa ( $\text{ms}^{-1}$ ).
- Radiación solar ( $\text{Wm}^{-2}$ ).

Todos los sensores están configurados para que emitan una señal estándar de instrumentación, es decir, su salida es de  $4\text{-}20\text{mA}$ , así ponemos una resistencia de  $270\Omega$  para cambiarlo a voltaje ( $1.08\text{V}\text{-}5.4\text{V}$ ) y pueda leerlo la tarjeta de adquisición sin ningún problema, ya que ésta no puede leer señales de corriente, ver Fig. 4.1.

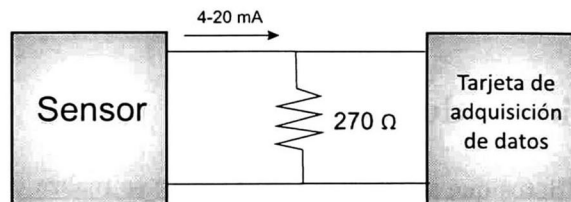


Figura 4.1: Configuración Corriente-Voltaje para cada sensor.

Además las señales adquiridas se tienen que convertir de  $mA$  a la unidad correspondiente para cada sensor, usando la información del Apéndice A.1 se obtienen las siguientes conversiones

$$\begin{aligned} \text{Temperatura} &= f(Volt_{RES}) = 23.15 * Volt_{RES} - 45, \\ \text{Humedad} &= f(Volt_{RES}) = 23.15 * Volt_{RES} - 25, \\ \text{Velocidad de viento} &= f(Volt_{RES}) = 11.57 * Volt_{RES} - 12.5, \\ \text{Radiación solar} &= f(Volt_{RES}) = 696.05 * Volt_{RES} - 751.68, \end{aligned}$$

donde  $Volt_{RES}$  es el voltaje suministrado por cada sensor a través de una resistencia de  $270\Omega$  descrita arriba.

Para poder realizar el análisis de los datos, se requiere filtrar el ruido presente, por lo que se aplica una etapa de filtrado a las señales adquiridas del invernadero con las siguientes características:

- Filtro Digital.
- Tipo fase cero.
- Butterworth de segundo orden.
- Pasabajas con frecuencia de corte de  $4Hz$ .

Se escogen estas características de filtrado debido a

Las señales adquiridas son discretas, por lo que es necesario un filtro digital.

Como se tienen los datos de antemano para filtrar, es posible filtrar la señal sin mover la fase de las mismas, esto es imposible en tiempo real, pero para análisis previos a implementaciones en tiempo real es muy útil tener un filtro de tipo fase cero.

- Se escoge un tipo Butterworth pasabajas debido a que es el más simple de implementar, éste mantiene plana la banda pasante (en diagrama de Bode), y finalmente de segundo orden para tener una banda de  $-40dB$  por decada después de la frecuencia de corte [26].

Se selecciona  $4Hz$  como frecuencia de corte en el filtro pasabajas debido a que es 4 veces la frecuencia de muestreo, pues al realizar un análisis espectral no se encuentra un ruido significativo como para poder determinar con exactitud una frecuencia de corte.

## 4.2. Metodología

Una metodología para identificar invernaderos es propuesta por [27] y [28], la cual consiste en minimizar un conjunto de funciones objetivo en términos de error relativo medio, error absoluto medio, error estándar y error cuadrático medio. En este trabajo se minimiza la función objetivo en términos de la raíz cuadrada del error cuadrático medio usando PSO descrito en el capítulo 2.

### 4.2.1. Modelo

La dinámica de un invernadero se puede describir de acuerdo a [11] por las siguientes ecuaciones diferenciales (Consultar el glosario de términos para ver el significado de cada variable, parámetro y constante.)

Ecuación de humedad

$$\rho v_i \frac{\chi_i}{dt} = F_v + C_{sat}(E + fog), \quad (4.1)$$

y ecuación de temperatura

$$v_i \rho C_p \frac{T_i}{dt} = Q_s - Q_{cc} + Q_m - C_{sat}(Q_e + Q_n) - Q_v + W_c, \quad (4.2)$$

donde  $\chi_i$  y  $T_i$  son la humedad absoluta y temperatura interna respectivamente, y cada término de las ecuaciones (4.1) y (4.2) se define como

$$F_v = \rho G(\chi_o - \chi_i), \quad (4.3)$$

$$fog = \frac{MV_{fog}}{100} fog_{max} \quad (4.4)$$

$$Q_s = A_i \tau S_o, \quad (4.5)$$

$$Q_{cc} = A_i A_c (T_i - T_o), \quad (4.6)$$

$$Q_m = A_i h_m (T_m - T_i), \quad (4.7)$$

$$Q_e = \lambda E, \quad (4.8)$$

$$Q_n = \lambda fog, \quad (4.9)$$

$$Q_v = \rho C_p G (T_i - T_o), \quad (4.10)$$

$$W_c = \frac{MV_w}{100} W_{max}, \quad (4.11)$$

con el coeficiente de saturación definido como

$$C_{sat} = \begin{cases} 100, & H_i > 100, \\ H_i, & H_i \leq 100, \end{cases} \quad (4.12)$$

Debido a que se cuenta con sensores de humedad relativa en el invernadero, surge la necesidad de convertir la humedad relativa a humedad absoluta, ésto se debe a que al convertirse a humedad absoluta se quitan no linealidades permitiendo realizar cálculos con facilidad como balances de masa [1], [29]. Una vez terminado de realizar los cálculos correspondientes es necesario convertir de humedad absoluta a humedad relativa, ver Apéndice A.8 para la conversión. Cabe aclarar que estas conversiones no se verán directamente en este trabajo, pero si es fundamental realizarlas cuando se quiera hacer simulaciones o llevar algoritmos a tiempo real relacionados con la humedad.

### 4.2.2. Adaptaciones

Debido a que el invernadero está en fase de prototipo, las siguientes consideraciones se toman en cuenta en este trabajo para el proceso de modelado

- $C_{sat}(E + fog) = 0$ , dado que no existe cultivo y un actuador de humedad (nebulizador).
- $C_{sat}(Q_e + Q_n) = 0$ , dado que no existe cultivo y un actuador de humedad (nebulizador).
- $W_c = 0$ , dado que no existe sistema de calefacción.
- $Q_m = 0$ , dado que la energía almacenada por la masa térmica no se considera durante el día debido a que no se tiene un sensor de temperatura para el suelo.
- No se consideran retardos en el sistema causados por los actuadores.

En (4.3), el término  $G$  se describe como

$$G = A_{vent}V_{int}G_0, \quad (4.13)$$

donde  $A_{vent}$  es el área de ventilación de las cortinas y se describe como

$$A_{vent} = H_g u_1, \quad (4.14)$$

donde  $H_g$  y  $u_1$  son el ancho y la altura de la ventana respectivamente,  $u_1$  es una entrada del sistema relacionada con la apertura de las cortinas y toma valores en el rango de  $[0,1.6]$  m. Al sustituir el término (4.14) en la ecuación (4.13) se tiene

$$G = H_g V_{int} G_0 u_1. \quad (4.15)$$

Debido a que el modelo tomado de [11] no considera la ventilación forzada, se agregan los términos  $F_F$  y  $Q_F$ , los cuales están basados en balances de masa y energía, y se describen

como

$$F_F = \rho\phi_F G_2(\chi_o - \chi_i)u_2, \quad (4.16)$$

$$Q_F = \rho\phi_F C_p G_1(T_i - T_o)u_2, \quad (4.17)$$

donde  $\chi_o$  y  $T_o$  son la humedad y temperatura externas respectivamente,  $u_2$  es una segunda variable de entrada del sistema, la cual toma los siguientes valores

$$u_2 = \begin{cases} 0 & \text{si los ventiladores están apagados,} \\ 1 & \text{si los ventiladores están prendidos.} \end{cases} \quad (4.18)$$

Para este trabajo solo se considera una sola ecuación para ambos ventiladores, tanto para el balance de masa como el de energía, esto se debe a que no se cuenta con la instrumentación suficiente (sensores de temperatura para cada ventilador) en el invernadero, de lo contrario se tendra que agregar 2 ecuaciones más, una en el balance de masa y la otra en el de energía.

De las anteriores consideraciones, el modelo que describirá nuestro invernadero será

$$\rho v_i \frac{\chi_i}{dt} = \rho H_g V_{int} G_0(\chi_o - \chi_i)u_1 + \rho\phi_F G_2(\chi_o - \chi_i)u_2, \quad (4.19)$$

$$v_i \rho C_p \frac{T_i}{dt} = A_i \tau S_o - A_i A_c (T_i - T_o) - \rho C_p H_g V_{int} G_0 (T_i - T_o) u_1 - \rho\phi_F C_p G_1 (T_i - T_o) u_2. \quad (4.20)$$

El siguiente paso es encontrar los valores de los parámetros del modelo descrito, donde algunos de estos parámetros son obtenidos directamente por mediciones en el invernadero, y otros de tablas de datos, las cuales se pueden encontrar en la literatura.

Parámetro	Valor
$C_p$	$1003 Jkg^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$
$\rho$	$1.25 kg_{aire}^{-1} m^{-3}$

Tabla 4.1: Parámetros obtenidos de la literatura [1].

Parámetro	Valor
$A_i$	$30m^2$
$H_g$	$5.23m$
$v_i$	$122.52m^3$
$\phi_F$	$1.9583m^3 s^{-1}$

Tabla 4.2: Parámetros obtenidos del invernadero.

Al sustituir los parámetros de las Tablas 4.1 y 4.2 en las ecuaciones (4.19) y (4.20), tenemos

$$\frac{\chi_i}{dt} = 42.68 \times 10^{-3} V_{int} G_0 (\chi_o - \chi_i) u_1 + 15.98 \times 10^{-3} G_2 (\chi_o - \chi_i) u_2, \quad (4.21)$$

$$\begin{aligned} \frac{T_i}{dt} = & 1.95 \times 10^{-4} \tau S_o - 1.95 \times 10^{-4} A_c (T_i - T_o) - 42.68 \times 10^{-3} V_{int} G_0 (T_i - T_o) u_1 \\ & - 15.98 \times 10^{-3} G_1 (T_i - T_o) u_2. \end{aligned} \quad (4.22)$$

Las variables  $\chi_i$ ,  $\chi_o$ ,  $T_i$ ,  $T_o$ ,  $S_o$  y  $V_{int}$  se medirán con los sensores descritos en el Apéndice A.1.

### 4.2.3. Identificación de parámetros

Para completar las ecuaciones (4.21) y (4.22), se necesita identificar los siguientes parámetros: coeficiente de pérdida por conducción y convección ( $A_c$ ), coeficiente de transmisión de invernadero ( $\tau$ ), pérdidas por renovación de flujo de aire por las cortinas ( $G_0$ ) y pérdidas por renovación de flujo de aire debido a los ventiladores ( $G_1$ ,  $G_2$ ).

Sea  $P_G = \{A_c, \tau, G_0, G_1, G_2\}$  el conjunto de parámetros a encontrar. Existen dos metodologías para encontrarlos, la primera consiste en una metodología experimental, ésta requiere que se realicen un conjunto de mediciones con su respectiva instrumentación en el invernadero, pero éstas demandan mucho tiempo y suelen ser muy difíciles de realizar. La segunda metodología consiste en usar un algoritmo de identificación heurístico (ejemplo: Algoritmos genéticos, PSO, etc.), ésta suele ser más rápida y fácil que la primera y permite obtener buenos resultados.

Después de adquirir datos del invernadero y definir un modelo, hacemos uso de la segunda metodología para encontrar los valores de los parámetros que faltan por determinar (para que el modelo se aproxime al comportamiento real del sistema), por lo que es necesario establecer y minimizar una función de error. Debido a que el modelo del invernadero es una función muy compleja y con muchas variables, el algoritmo heurístico propuesto a usar para este caso es PSO.

El criterio de minimización está definido por las siguientes funciones objetivo basadas en la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE: Root Mean Square Error)

$$J_1 = e_{RMST} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (T_i - \hat{T}_i)^2}, \quad (4.23)$$

$$J_2 = e_{RMSH} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\chi_i - \hat{\chi}_i)^2}. \quad (4.24)$$

Las ecuaciones (4.23) y (4.24) están relacionadas con el RMSE de la temperatura y humedad respectivamente, donde  $\widehat{T}_i$  y  $\widehat{\chi}_i$  son la temperatura y humedad internas obtenidas por el modelo descrito en las ecuaciones (4.21) y (4.22) respectivamente, mientras que  $\chi_i$  y  $T_i$  son la humedad y temperatura internas medidas.

Luego, las ecuaciones (4.23) y (4.24) se minimizan con respecto a  $P_G$  como

$$\min_{P_G} J_1 = \min_{P_G} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (T_i - \widehat{T}_i)^2}, \quad (4.25)$$

$$\min_{P_G} J_2 = \min_{P_G} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\chi_i - \widehat{\chi}_i)^2}. \quad (4.26)$$

Para obtener  $\widehat{T}_i$  y  $\widehat{\chi}_i$ , se necesitan resolver las ecuaciones (4.19) y (4.20). Para diferenciar las variables que son medidas de las variables estimadas por el modelo, notaremos a las variables como  $\widehat{\chi}_i$  y  $\widehat{T}_i$  para describir la humedad y temperatura estimadas por el modelo respectivamente, mientras que  $\chi_i$  y  $T_i$  serán la humedad y temperatura medidas respectivamente, de esta forma las ecuaciones diferenciales se resuelven de la siguiente forma

$$\widehat{\chi}_i = k_1 e^{-C_1 t} + \frac{1}{C_1} [C_1 \widehat{\chi}_o], \quad (4.27)$$

donde  $k_1$ ,  $C_1$  y  $C_2$  son

$$\begin{aligned} k_1 &= \widehat{\chi}_i(0) - \frac{1}{C_2} [C_2 \widehat{\chi}_o(0)], \\ C_1 &= \frac{1}{v_i} (H_g V_{int} G_o u_1 + \phi_F G_2 u_2), \\ C_2 &= \frac{1}{v_i} (H_g V_{int}(0) G_o u_1 + \phi_F G_2 u_2). \end{aligned}$$

$$\widehat{T}_i = k_2 e^{-C_3 t} + \frac{1}{C_3} \left[ \frac{A_i \tau}{v_i \rho C_p} S_o + C_3 \widehat{T}_o \right] \quad (4.28)$$

donde  $k_2$ ,  $C_3$  y  $C_4$  son

$$\begin{aligned} k_2 &= \widehat{T}_i(0) - \frac{1}{C_4} \left[ \frac{A_i \tau}{v_i \rho C_p} S_o(0) + C_3 \widehat{T}_o(0) \right] \\ C_3 &= \frac{1}{v_i} \left( \frac{A_i A_c}{\rho C_p} + H_g V_{int} G_o u_1 + \phi_F G_1 u_2 \right) \\ C_4 &= \frac{1}{v_i} \left( \frac{A_i A_c}{\rho C_p} + H_g V_{int}(0) G_o u_1 + \phi_F G_1 u_2 \right) \end{aligned}$$

donde  $\hat{\chi}_i(0)$ ,  $\hat{\chi}_o(0)$ ,  $V_{int}(0)$ ,  $S_o(0)$ ,  $\hat{T}_i(0)$  y  $\hat{T}_o(0)$  son las condiciones iniciales, éstas son tomadas de las mediciones en  $t = 1$  en la adquisición de datos.

Al sustituir los parámetros de las Tablas 4.1 y 4.2 en las ecuaciones (4.27) y (4.28), tenemos

$$\hat{\chi}_i = k_1 e^{-C_1 t} + \frac{1}{C_1} [C_1 \hat{\chi}_o], \quad (4.29)$$

donde  $k_1$ ,  $C_1$  y  $C_2$  son

$$\begin{aligned} k_1 &= \hat{\chi}_i(0) - \frac{1}{C_2} [C_2 \hat{\chi}_o(0)], \\ C_1 &= 42.68 \times 10^{-3} V_{int} G_0 u_1 + 15.98 \times 10^{-3} G_2 u_2, \\ C_2 &= 42.68 \times 10^{-3} V_{int}(0) G_0 u_1 + 15.98 \times 10^{-3} G_2 u_2. \end{aligned}$$

$$\hat{T}_i = k_2 e^{-C_3 t} + \frac{1}{C_3} [1.95 \times 10^4 \tau S_o + C_3 \hat{T}_o] \quad (4.30)$$

donde  $k_2$ ,  $C_3$  y  $C_4$  son

$$\begin{aligned} k_2 &= \hat{T}_i(0) - \frac{1}{C_4} [1.95 \times 10^4 \tau S_o(0) + C_3 \hat{T}_o(0)], \\ C_3 &= 1.95 \times 10^{-4} A_c + 42.68 \times 10^{-3} V_{int} G_0 u_1 + 15.98 \times 10^{-3} G_1 u_2, \\ C_4 &= 1.95 \times 10^{-4} A_c + 42.68 \times 10^{-3} V_{int}(0) G_0 u_1 + 15.98 \times 10^{-3} G_1 u_2. \end{aligned}$$

Para el proceso de identificación, se usan los intervalos de búsqueda para  $A_c$ ,  $\tau$  y  $G_0$  definidos en [11], para  $G_1$  y  $G_2$  se establecen de forma experimental. Entonces el espacio de búsqueda aplicado a PSO es

$$\begin{aligned} 2 &\leq A_c \leq 20 \\ 0.1 &\leq \tau \leq 0.9 \\ 0.0005 &\leq G_0 \leq 0.01 \\ 0.01 &\leq G_1 \leq 0.2 \\ 0.5 &\leq G_2 \leq 2 \end{aligned}$$

El método que se propone en este trabajo consiste en la aplicación de dos etapas de optimización para poder minimizar las ecuaciones (4.23) y (4.24). El uso de dos etapas permite determinar los parámetros de forma sencilla e intuitiva, ya que de esta manera, se pueden clasificar los parámetros y ponerlos en conjuntos; a cada conjunto de parámetros se le aplica una etapa de minimización. esto representa una reducción en tiempo de cómputo y esfuerzo en programación. Así, las etapas aplicadas son



- Primera etapa.- Ésta consiste en determinar aquellos parámetros relacionados con el invernadero ( $A_c$ ,  $\tau$  y  $G_0$ ).
- Segunda etapa.- Teniendo ya conocido  $A_c$ ,  $\tau$  y  $G_0$ , ésta consiste en determinar aquellos parámetros relacionados con los actuadores ( $G_1$  y  $G_2$ ).

### 4.3. Resultados y validación de la identificación

#### 4.3.1. Primera etapa

La primera etapa fue realizada bajo el siguiente escenario

- Cortinas cerradas ( $u_1 = 0$  metros).  
Ventiladores apagados ( $u_2 = 0$ ).
- Datos adquiridos el 15 de Octubre de 2012 en el intervalo de tiempo de 11:43-18:43 h. Ver Fig. 4.2.

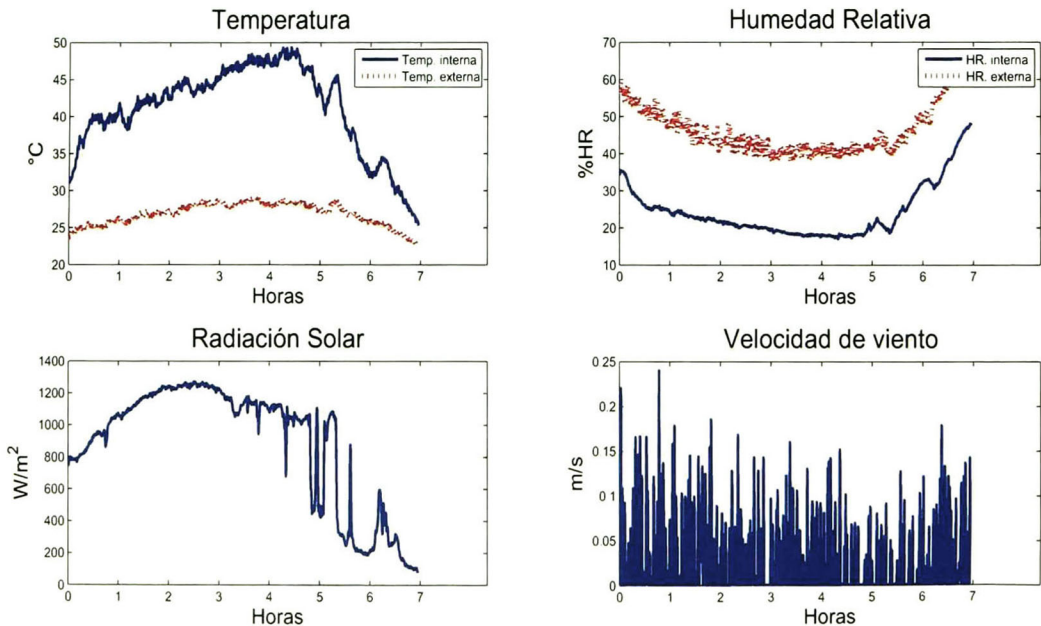


Figura 4.2: Datos adquiridos del invernadero el 15 de Octubre de 2012.

Los parámetros de síntesis del PSO en esta etapa son

- Población de partículas  $N = 100$ .
- Parámetro cognitivo  $c_1 = 0.001$ .
- Parámetro social  $c_2 = 0.001$ .
- Número de iteraciones igual a 150.

Estos parámetros de síntesis fueron propuestos de forma experimental, ya que dieron los mejores resultados de entre una multitud de simulaciones, cabe destacar que cada simulación tomó cerca de 30 minutos en completarse, donde cada simulación presentaba el mejor resultado al cabo de 100 iteraciones aproximadamente, por esta razón se tomó 150 iteraciones como criterio de paro.

Después de aplicar el algoritmo, se obtuvieron los parámetros  $A_c$ ,  $\tau$  y  $G_0$ . Los mejores resultados fueron

$$A_c = 6.5203, \quad (4.31)$$

$$G_0 = 0.00050181, \quad (4.32)$$

$$\tau = 0.10009, \quad (4.33)$$

presentando los siguientes errores

$$e_{RMST} = 2.1923^\circ\text{C}, \quad (4.34)$$

$$e_{RMSH} = 2.9219\%RH. \quad (4.35)$$

Los resultados también se pueden ver en la Fig. 4.3

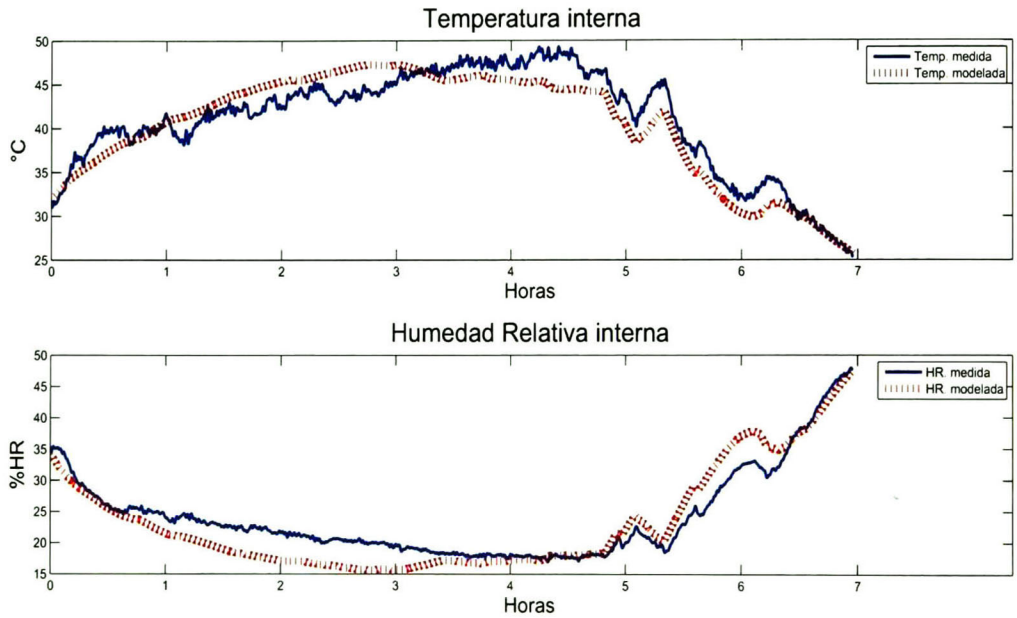


Figura 4.3: Resultados de la primera etapa de identificación.

### 4.3.2. Segunda etapa

La segunda etapa fue realizada bajo el siguiente escenario

- Cortinas abiertas al 75 % ( $u_1 = 1.2$  metros).
- Ventiladores prendidos todo el tiempo ( $u_2 = 1$ ).
- Datos adquiridos el 26 de Noviembre de 2012 en el intervalo de tiempo de 09:02-18:03 h. Ver Fig. 4.4.

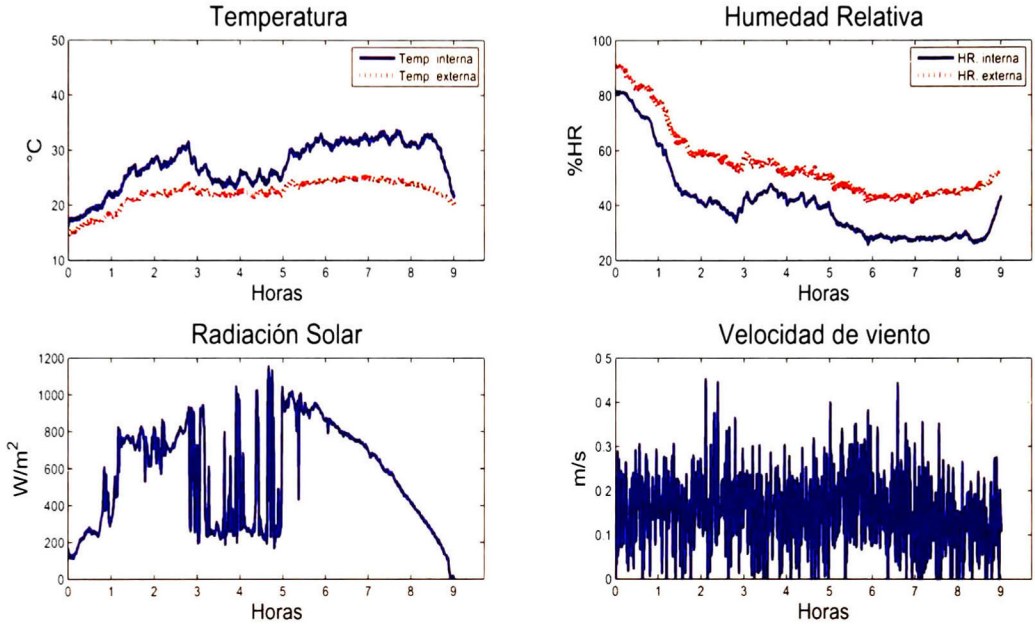


Figura 4.4: Datos adquiridos del invernadero el 26 de Noviembre de 2012.

Los parámetros de síntesis del PSO en esta etapa son

- Población de partículas  $N = 40$ .
- Parámetro cognitivo  $c_1 = 0.05$ .
- Parámetro social  $c_2 = 0.05$ .
- Número de iteraciones igual a 150.

Estos parámetros de síntesis también fueron propuestos de forma experimental, ya que dieron los mejores resultados de entre una multitud de simulaciones. Cada simulación presentaba el mejor resultado al cabo de 100 iteraciones aproximadamente, por esta razón se tomó 150 iteraciones como criterio de paro.

Después de aplicar el algoritmo, se obtuvieron los parámetros  $G_1$  y  $G_2$ . Los mejores resultados fueron

$$G_1 = 0.067318, \quad (4.36)$$

$$G_2 = 1.0067, \quad (4.37)$$

presentando los siguientes errores

$$e_{RMST} = 2.0359^\circ\text{C}, \quad (4.38)$$

$$e_{RMSH} = 4.2446\%RH. \quad (4.39)$$

Los resultados también se pueden ver en la Fig. 4.5

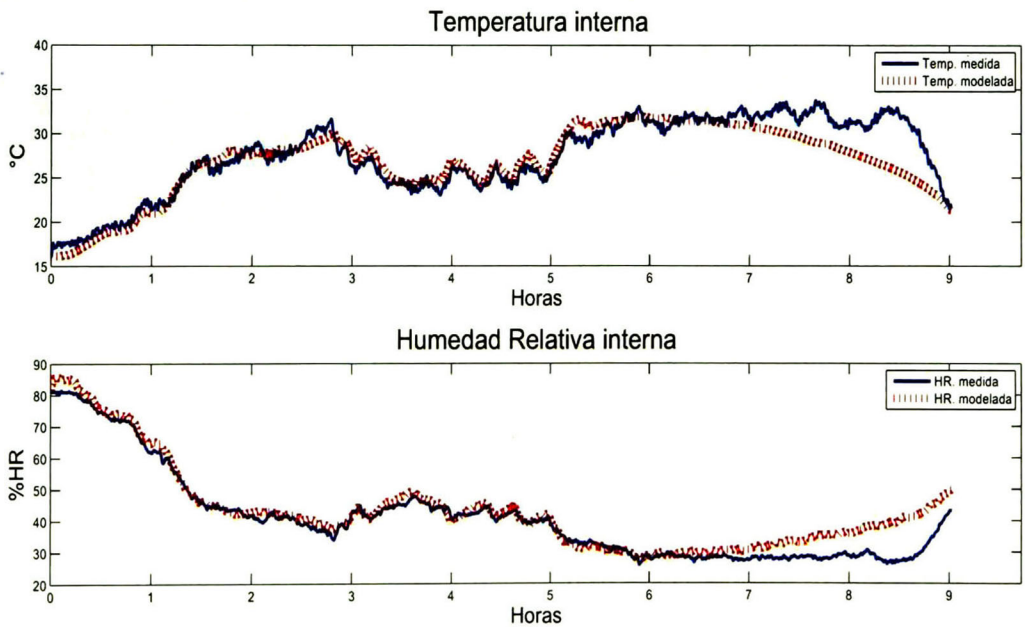


Figura 4.5: Resultados de la segunda etapa de identificación.

En la Fig. 4.5 se puede apreciar que al final de las gráficas el modelo no predice bien el comportamiento tanto en la temperatura como en la humedad, esto se debe a que el calor ganado por fenómeno de convección debido a la radiación solar no está modelado, ya que los

motores de los ventiladores están protegidos del medio ambiente por una cubierta metálica ocasionando una inercia en el sistema. Existe muchas soluciones a este problema, pero solo dos se comentarán en este trabajo

- La primera solución consiste en cubrir la cubierta metálica con algún material que ofrezca una resistencia térmica alta con el fin de que la radiación solar no caliente dicha cubierta.
- La segunda solución es agregar al modelo un término que describa la física de este problema.

Entonces el conjunto de parámetros encontrados que minimizan las ecuaciones (4.23) y (4.24) se define como

$$P_G = \{6.5203, 0.00050181, 0.10009, 0.067318, 1.0067\} \quad (4.40)$$

### 4.3.3. Validación

Una vez obtenido el modelo del invernadero con las restricciones y consideraciones antes mencionadas, se presentará una validación de cinco días aproximadamente con el fin de determinar si el modelo predice la física del invernadero y rechazar si fue una casualidad que aquellos parámetros encontrados solo funcionen para el conjunto de datos con el que se obtuvieron.

Para la validación se toman las siguientes consideraciones

- Cortinas cerradas ( $u_1 = 0$  metros).
- Ventiladores apagados ( $u_2 = 0$ ).
- Datos adquiridos del 6 de Febrero a las 13:43 h. al 10 de Febrero a las 12:58 h. de 2013. Ver Fig. 4.6.

Esta validación presenta los siguientes errores

$$e_{RMST} = 2.1625^\circ\text{C} \quad (4.41)$$

$$e_{RMSH} = 8.7510\%RH. \quad (4.42)$$

Los resultados se aprecian en la Fig. 4.7.

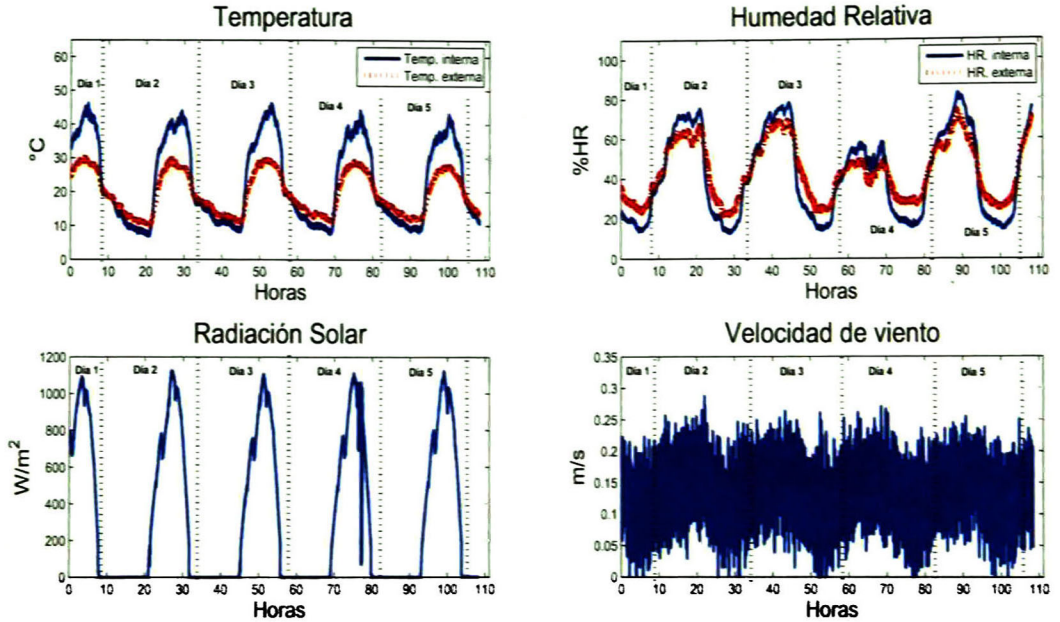


Figura 4.6: Datos adquiridos del invernadero del 6 al 10 de Febrero de 2013.

Como se puede observar en la Fig. 4.7. el modelo predice muy bien la temperatura interna, a pesar de que presenta algunos errores pequeños que son evidentes a simple vista, se considera que es buena aproximación tomando en cuenta el error que presenta. Cabe destacar que en esta validación los actuadores no se prendieron debido a que la adquisición de datos se tomó de manera continua y a que no se cuenta con un programa inteligente con una infraestructura para activar dichos actuadores durante todo el día, pues existen cortes en el suministro de energía de CINVESTAV unidad Guadalajara.

Por otra parte, se puede observar que la humedad interna presenta un error muy grande, esto es causado por las dinámicas no modeladas, pues la ecuación que describe la humedad en este trabajo es relativamente sencilla si se compara con la de la temperatura.

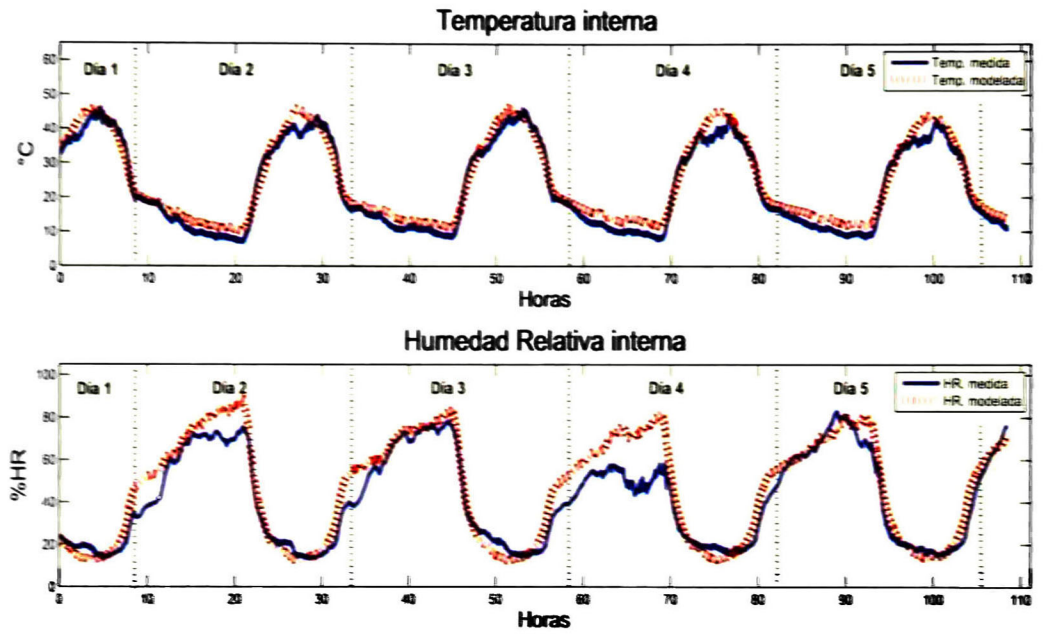


Figura 4.7: Validación del modelo.



## Capítulo 5

# Control de temperatura en un invernadero

Para realizar control en un invernadero es necesario contar con los actuadores adecuados y suficientes, de tal forma que éstos permitan manipular las variables dentro de éste tales como: temperatura, humedad, concentración de  $CO_2$ , etc. Por esta razón se presenta un análisis termodinámico con el fin de determinar si los actuadores (cortinas y ventiladores) son suficientes para realizar un buen control. Cabe destacar que en este trabajo solo se controlará la temperatura interna en el prototipo de invernadero bajo estudio.

### 5.1. Análisis Termodinámico

Para realizar un control de temperatura, dentro de un invernadero, es recomendable hacer un análisis termodinámico de la temperatura interna usando un modelo y mediciones del sistema. En este trabajo se ha obtenido una ecuación que describe la temperatura interna en función de las variables climatológicas y de los actuadores en el Capítulo 4, y se han tomado mediciones del 6 de Febrero al 10 de Febrero de 2013. Con este análisis se podrá determinar si los actuadores son suficientes para realizar un control de temperatura en el invernadero bajo estudio y condiciones actuales del prototipo, en particular, sin cultivo, dado que las condiciones son muy diferentes en un invernadero con cultivo.

El punto de partida del análisis está en la ecuación (4.30) del Capítulo 4, aquí se considerará el máximo cambio que pueden provocar los actuadores para así poder determinar el enfriamiento máximo causado por éstos, por esta razón consideramos el siguiente escenario

Apertura de cortinas al 100 % ( $u_1 = 1.6m$ ).

Ventiladores prendidos todo el tiempo ( $u_2 = 1$ ).

Velocidad del viento interna al máximo,  $V_{int} = 1ms^{-1}$

Es importante señalar que

- Las cortinas presentan una apertura máxima de  $1.6m$ .
- Los ventiladores solo presentan dos estados: 1 para activarlos ó 0 para apagarlos.

La velocidad de viento, se obtuvo a partir de mediciones con los ventiladores apagados y las cortinas abiertas. Se observó que en distintas mediciones la máxima velocidad de viento fue de  $0.8342ms^{-1}$  en el período Octubre-2012 a Febrero-2013, por lo que se propone  $1ms^{-1}$  como velocidad máxima de viento dentro del invernadero.

Para el análisis también es necesario usar los datos de las Tablas 4.1 y 4.2, el conjunto de parámetros encontrados en (4.40) del Capítulo anterior y los valores iniciales de las distintas variables medidas, los cuales son

Datos iniciales	
Parámetro	Valor
$T_i(0)$	$33.8511\text{ }^\circ\text{C}$
$S_o(0)$	$736.8301Wm^{-2}$
$V_{int}(0)$	$1ms^{-1}$

Tabla 5.1: Datos iniciales tomados de la medición realizada del 6 de Febrero a las 13:43 al 10 de Febrero a las 12:58 de 2013.

Al sustituir las constantes del invernadero, los datos iniciales de la Tabla 5.1 y las consideraciones iniciales de los actuadores en la ecuación (4.30), se tiene

$$\begin{aligned} c_3 &= 2.38 \times 10^{-3}, \\ c_4 &= 2.38 \times 10^{-3}, \\ k_2 &= -6.0518, \end{aligned}$$

$$\hat{T}_i(t) = -6.0518e^{-2.38 \times 10^{-3}t} + \frac{1}{2.38 \times 10^{-3}} [1.95 \times 10^{-5}S_o + 2.38 \times 10^{-3}T_o] \quad (5.1)$$

Así, esta ecuación describe la temperatura interna para un tiempo  $t$  específico en función de la temperatura externa y radiación solar.

Para continuar con el análisis, se propone un tiempo  $t$  tal que las mediciones correspondientes son tomadas durante el día, de tal manera que se puede determinar el enfriamiento máximo para los siguientes casos: cuando el invernadero tiene los actuadores en funcionamiento y cuando no los tiene. Los datos fueron tomados del invernadero del 6 de Febrero al 10 de Febrero. El  $t$  seleccionado es  $t = 10000$  que corresponde a las 16:30 del 6 de Febrero. Por lo tanto

$$\begin{aligned} T_o|_{t=10000} &= 28.1373 \text{ }^\circ\text{C}, \\ S_o|_{t=10000} &= 1057 \text{ Wm}^{-2} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Al sustituir los datos anteriores para  $t = 10000$  en (5.1), se obtiene que la temperatura interna estimada con los actuadores funcionando al máximo es

$$\widehat{T}_i|_{t=10000} = 36.82 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (5.3)$$

Al comparar el resultado anterior con la temperatura interna medida sin actuadores ( $T_{ireal}$ ) para el instante  $t = 10000$ , la cual es de  $40.81 \text{ }^\circ\text{C}$ , se tiene una diferencia de

$$\Delta T|_{t=10000} = (\widehat{T}_i - T_{ireal})|_{t=10000} = 36.82 - 40.81 = -3.99 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (5.4)$$

Este resultado significa que el invernadero se enfría  $3.99 \text{ }^\circ\text{C}$  por debajo de la temperatura interna medida. Para verificar lo anterior, se realiza una simulación en Matlab<sup>TM</sup> usando la ecuación (4.30) considerando los actuadores apagados y la ecuación (5.1) con los actuadores al máximo. Ver Fig. 5.1.

En la Fig. 5.1 se aprecia que durante el día la temperatura interna estimada (con actuadores al máximo) está por debajo de la temperatura interna medida, mientras que por las noches está por arriba, este pequeño calentamiento durante las noches no es considerado en el análisis, pues los actuadores solo pueden enfriar físicamente. Cabe aclarar que para esta figura y las siguientes, el valor inicial en el eje del tiempo corresponde a las 13:43 del 6 de Febrero, mientras que el valor final corresponde a las 12:58 del 10 de Febrero de 2013.

Para verificar el resultado de la ecuación (5.4), se calcula la raíz del error cuadrático medio para la simulación que se presenta en la Fig. 5.1, lo que da como resultado

$$e_{RMST} = 3.8642 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (5.5)$$

Este resultado proporciona un buen aproximado con lo que se obtuvo en (5.4), de este modo se concluye que los actuadores (cortinas y ventiladores) no son suficientes para poder hacer un enfriamiento significativo de al menos  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  como se sugiere en [30].

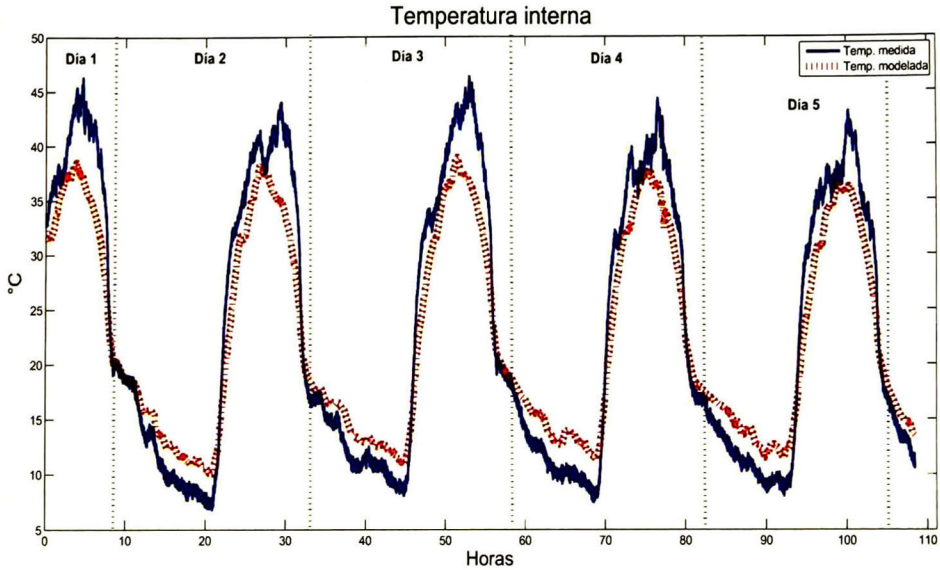


Figura 5.1: Simulación del enfriamiento en el invernadero causado por los actuadores funcionando al máximo. Temperatura interna medida con actuadores apagados (línea continua en azul), temperatura estimada con los actuadores al máximo (línea discontinua en rojo).

## 5.2. Aire acondicionado

De acuerdo a lo visto en la sección anterior sobre la incapacidad de los actuadores para producir cambios significativos en la temperatura, surge la necesidad de determinar algún actuador que sea más eficiente para enfriar nuestro invernadero. Así, para este trabajo se hace uso del aire acondicionado como actuador de temperatura despreciando a las cortinas y ventiladores.

Para hacer uso de aire acondicionado en un invernadero, se empieza por las ecuaciones que describen la dinámica de éste, así en la ecuación (4.20) se agrega el término  $Q_{ac}$  ([31], [1]), el cual representa la dinámica de un aire acondicionado basado en un balance de masa y energía, y está expresado por

$$Q_{ac} = F_{ac}H_{ac}, \quad (5.6)$$

donde  $F_{ac}$  es el flujo de aire que inserta el aire acondicionado al invernadero expresado en  $kg s^{-1}$ ,  $H_{ac}$  es la entalpía del aire acondicionado [29] expresado en  $J kg^{-1}$ , la cual está muy relacionada con el cambio de fase de una sustancia [32],[29], y está definida como

$$H_{ac} = C_p(u_3 - T_{ref}) + H_{acl}(C_{pv}(u_3 - T_{ref}) + \lambda_v), \quad (5.7)$$

donde  $u_3$  es una entrada del sistema y representa la temperatura deseada,  $H_{acl}$  es la humedad del aire acondicionado, la cual se calcula usando una carta psicrométrica [1], ver Apéndice A.9 para más detalles. El resto de los parámetros se obtienen de la literatura [1] y se expresan como

Parámetro	Valor	Descripción
$T_{ref}$	0 °C	Temperatura de referencia.
$C_{pv}$	1820 $J kg^{-1} °C^{-1}$	Calor específico del vapor de agua.
$\lambda_v$	2450 $k J kg^{-1} °C^{-1}$	Calor de vaporación de agua.

Tabla 5.2: Parámetros de entalpía para el aire acondicionado.

Al sustituir los datos de la Tabla 5.2 en (5.7), se tiene

$$H_{ac} = 1.3923u_3^2 + 2879.63u_3 + 3211.95. \quad (5.8)$$

Ya que se obtuvo una expresión para  $H_{ac}$ , ahora se procede a determinar  $F_{ac}$ , ya que con este dato se podrá completar la ecuación (5.6). Para encontrar dicho valor, se necesita calcular la máxima energía necesaria para enfriar, así que en la ecuación (4.30) se agrega el término  $Q_{ac}$  y se quitan los términos relacionados con los actuadores (cortinas y ventiladores), quedando la ecuación como

$$v_i \rho C_p \frac{\widehat{T}_i}{dt} = Q_s - Q_{cc} - Q_{ac}, \quad (5.9)$$

al sustituir  $Q_s$  y  $Q_{cc}$  del Capítulo anterior en (5.9), se tiene que

$$v_i \rho C_p \frac{\widehat{T}_i}{dt} = A_i \tau S_o - A_i A_c (\widehat{T}_i - T_o) - Q_{ac}. \quad (5.10)$$

Ahora se sustituyen las constantes del invernadero, los datos iniciales de las Tablas 4.1 y 4.2, y el conjunto de parámetros encontrados en (4.40) del Capítulo anterior en (5.10), así se tiene

$$\frac{\widehat{T}_i}{dt} = 1.97 \times 10^{-5} S_o - 1.27 \times 10^{-3} (\widehat{T}_i - T_o) - 6.51 \times 10^{-6} Q_{ac}. \quad (5.11)$$

Al resolver (5.11) como una ecuación diferencial lineal, se tiene

$$\widehat{T}_i(t) = ke^{-1.27 \times 10^{-3}t} - \frac{1}{-1.27 \times 10^{-3}} [1.97 \times 10^{-5}S_o + 1.27 \times 10^{-3}T_o - 6.51 \times 10^{-6}Q_{ac}], \quad (5.12)$$

$$k = T_i(0) + \frac{1}{-1.27 \times 10^{-3}} [1.97 \times 10^{-5}S_o(0) + 1.27 \times 10^{-3}T_o(0) - 6.51 \times 10^{-6}Q_{ac}].$$

Posteriormente se sustituyen los datos de la Tabla 5.1 en (5.12)

$$\widehat{T}_i(t) = (-1.5737 + 5.12 \times 10^{-3}Q_{ac})e^{-1.27 \times 10^{-3}t} + \frac{1}{1.27 \times 10^{-3}} [1.97 \times 10^{-5}S_o + 1.27 \times 10^{-3}T_o - 5.12 \times 10^{-3}Q_{ac}]. \quad (5.13)$$

De la misma manera que en la sección anterior, se hace el análisis en un tiempo  $t$  específico para así poder calcular la energía necesaria de enfriamiento. Tomando el mismo tiempo de la sección anterior y los datos de (5.2), (5.13) para  $t = 10000$  se expresa como

$$\widehat{T}_i|_{t=10000} = 35.37 - 5.11 \times 10^{-3}Q_{ac}. \quad (5.14)$$

Posteriormente se calcula la diferencia de temperatura  $\Delta T_i$  usando la ecuación (5.14) y la temperatura real medida para  $t = 10000$ , entonces se tiene

$$\Delta T_i|_{t=10000} = T_{ireal}|_{t=10000} - \widehat{T}_i|_{t=10000} = 40.8187 - (35.37 - 5.11 \times 10^{-3}Q_{ac}), \quad (5.15)$$

donde  $T_{ireal}|_{t=10000}$  es la temperatura interna medida en  $t = 10000$ , luego al despejar  $Q_{ac}$  de (5.15), se obtiene

$$Q_{ac} = \frac{\Delta T_i|_{t=10000} - 5.4487}{5.12 \times 10^{-3}}. \quad (5.16)$$

A partir de la ecuación (5.16) se puede determinar cuánta energía se requiere para enfriar el invernadero, así se propone  $\Delta T_i = 20^\circ\text{C}$ , que son  $5^\circ\text{C}$  más que como se sugiere en [30]. Por lo tanto, la energía necesaria para enfriar el invernadero es de

$$Q_{ac} = 2842 J s^{-1} \quad (5.17)$$

Ahora que se ha calculado la energía necesaria para tener una diferencia de temperatura de  $20^\circ\text{C}$ , se puede calcular  $F_{ac}$  a partir de la ecuación (5.6) como

$$F_{ac} = \frac{Q_{ac}}{C_p(u_3 - T_{ref}) + H_{acl}(C_{pv}(u_3 - T_{ref}) + \lambda_v)}. \quad (5.18)$$

Para calcular  $F_{ac}$  en la ecuación anterior, se sustituyen los siguientes valores:  $u_3 = 20^\circ\text{C}$ ,  $T_{ref} = 0^\circ\text{C}$ ,  $Q_{ac}$  de (5.17),  $H_{act}$  del Apéndice A.9 y los datos de las Tablas 4.1 y 5.2: así se obtiene

$$F_{ac} = 0.04998 \text{ kgs}^{-1}. \quad (5.19)$$

Por lo tanto (5.6) queda expresado como

$$Q_{ac} = 0.0942u_2^2 + 194.95u_3 + 217.44. \quad (5.20)$$

La ecuación (5.20) permitirá realizar un control de temperatura en simulación y proporcionar la cantidad de energía que se necesita. Por ejemplo, la energía consumida por un aire acondicionado ideal con una eficiencia del 100% será de aproximadamente  $3 \text{ kJ/s}$  ó  $10800 \text{ kWh}$  de acuerdo al resultado de este trabajo. Cabe destacar que este consumo de energía puede bajar si se llevan a cabo sugerencias para su uso eficiente (tiempo de prendido, instalación del equipo, eficiencia térmica, etc.).

### 5.3. Modelo definitivo para el sistema de control

Una vez que se determinó la dinámica del aire acondicionado, se agrega el término  $Q_{ac}$  de (5.20) a la ecuación (4.22), aunque se consideran las dinámicas de los actuadores, éstas solo serán expresadas pero no usadas en el resto del trabajo debido a la incapacidad de cambiar la temperatura. así se tiene que

$$\begin{aligned} \frac{\hat{T}_i}{dt} = & 1.95 \times 10^{-4} \tau S_o - 1.95 \times 10^{-4} A_c (\hat{T}_i - T_o) - 42.68 \times 10^{-3} V_{int} G_o (\hat{T}_i - T_o) u_1 \\ & - 15.98 \times 10^{-3} G_1 (\hat{T}_i - T_o) u_2 - 6.13 \times 10^{-7} u_3^2 - 1.27 \times 10^{-3} u_3 \\ & - 1.42 \times 10^{-3}. \end{aligned} \quad (5.21)$$

La ecuación anterior se presenta a manera de esquema en la Fig. 5.2.

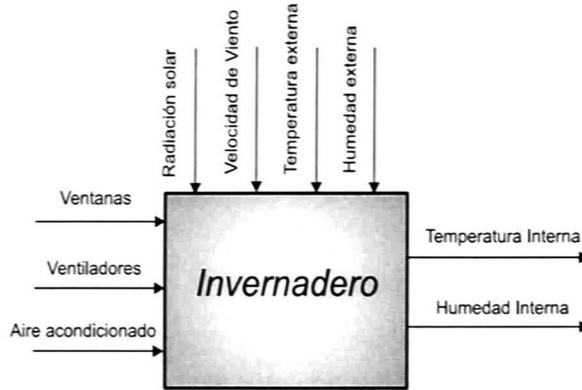


Figura 5.2: Diagrama a bloques del invernadero.

Al observar la ecuación (5.20), se ve claramente que existe un término cuadrático para la entrada  $u_3$ , por lo que se realiza una linealización en el rango de  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , rango en el cual el control operará. Así al tabular  $u_3$  contra  $\frac{Q_{ac}}{v_i\rho C_p}$  se tiene

$u_3$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\frac{Q_{ac}}{v_i\rho C_p}$
-25	-0.03
-20	-0.0237
-15	-0.0175
-10	-0.0112
-5	-0.0049
0	0.0014
5	0.0078
10	0.0142
15	0.0206
20	0.0271
25	0.0336

Tabla 5.3: Datos para linealizar  $u_3$ .

Así la linealización queda como

$$\frac{Q_{ac}}{v_i\rho C_p} = 1.273 \times 10^{-3}u_3 + 1.556 \times 10^{-3}, \quad (5.22)$$



y el modelo final para la temperatura interna del invernadero es

$$\begin{aligned} \frac{\hat{T}_i}{dt} = & 1.95 \times 10^{-4} \tau S_o - 1.95 \times 10^{-4} A_c (\hat{T}_i - T_o) - 42.68 \times 10^{-3} V_{int} G_0 (\hat{T}_i - T_o) u_1 \\ & - 15.98 \times 10^{-3} G_1 (\hat{T}_i - T_o) u_2 + 1.273 \times 10^{-3} u_3 + 1.556 \times 10^{-3}. \end{aligned} \quad (5.23)$$

## 5.4. Seguimiento de Trayectoria

Para controlar la temperatura interna del invernadero, no es suficiente con establecer la temperatura interna a un valor de consigna aleatorio. Por ello es necesario tomar en cuenta las consideraciones generales que necesita un cultivo dentro de un invernadero.

Muchas especies de plantas en invernaderos son de temperatura templada. Los principales requerimientos para el crecimiento de una planta se pueden definir como [30]

- Las plantas pueden morir por fríos extremos. Así la temperatura mínima debe estar por arriba de 0 °C. El riesgo de temperatura por debajo de 0 °C puede ser ignorado cuando la temperatura externa mínima exceda los 7 °C.
- El crecimiento, cosecha y calidad de las frutas y/o vegetales producidos en un invernadero son afectados cuando la temperatura está por debajo de 12 °C o por arriba de 30 °C [33].
- La temperatura media máxima para las plantas no debe ser mayor de 35-45 °C, por ejemplo, en el caso del cultivo de tomate la temperatura no debe superar los 35 °C [34].

De acuerdo a lo anterior, se propone un seguimiento de trayectoria para controlar la temperatura, el cual tiene la siguiente forma

$$10 \sin(0.000072t + 0.6) + 25 \text{ en } ^\circ\text{C}. \quad (5.24)$$

Esta trayectoria es ajustada en frecuencia y fase de tal forma que ésta se adapte a la medición realizada del 6 de Febrero al 10 de Febrero de 2013. Cabe destacar que existen muchas otras trayectorias, cada una adaptada para cada tipo de cosecha, e inclusive existen como conjuntos de trayectorias por ciclos de tiempo [35].

Para que el sistema siga la trayectoria propuesta en (5.24), definiremos a  $T_r$  como la ecuación de la trayectoria, y el error de seguimiento entre el sistema y la trayectoria como

$$e \triangleq \hat{T}_i - T_r. \quad (5.25)$$

entonces al calcular la derivada de (5.25) se tiene

$$\dot{e} = 1.95 \times 10^{-5} S_o - 1.27 \times 10^{-3} (\hat{T}_i - T_o) - (1.273 \times 10^{-3} u_3 + 1.556 \times 10^{-3}) - \dot{T}_r, \quad (5.26)$$

al igualar (5.26) a cero y despejar  $u_3$  de ésta, se tiene

$$u_3 = \frac{-1}{1.27 \times 10^{-3}} [-1.95 \times 10^{-5} S_o + 1.273 \times 10^{-3} (\hat{T}_i - T_o) + 1.556 \times 10^{-3} + \dot{T}_r + ke]. \quad (5.27)$$

Así la ecuación (5.27) es la ley de control por retroalimentación de estados [36]. Al llevar esta ley de control a simulación en Matlab™, se obtienen los resultados mostrados en la Fig. 5.3, en esta figura se aprecia la temperatura interna medida, la temperatura interna estimada sin actuadores y la trayectoria que ha seguido el sistema con la ley de control definida en (5.27).

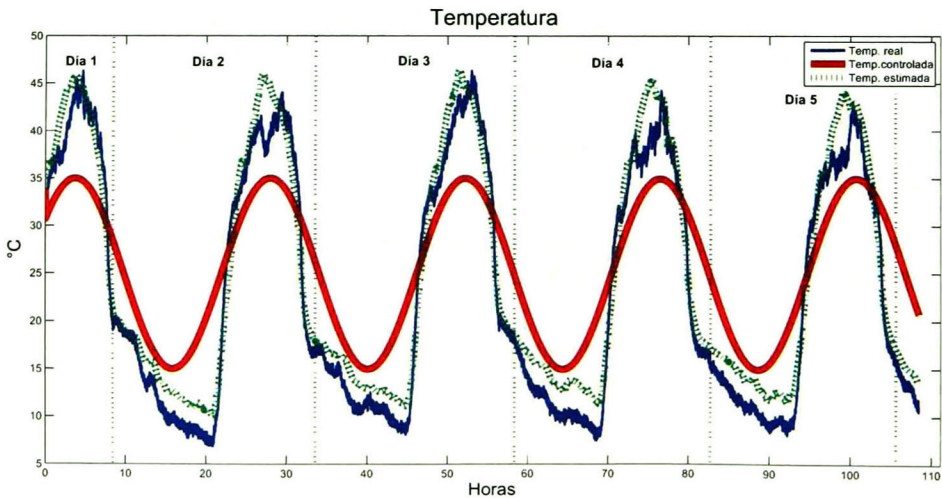


Figura 5.3: Temperatura interna medida (azul), temperatura interna estimada sin actuadores (verde) y trayectoria de control que sigue el sistema con el aire acondicionado (rojo).

En la Fig. 5.4 se muestra la señal de control, mientras que en la Fig. 5.5 se muestra el error de seguimiento.

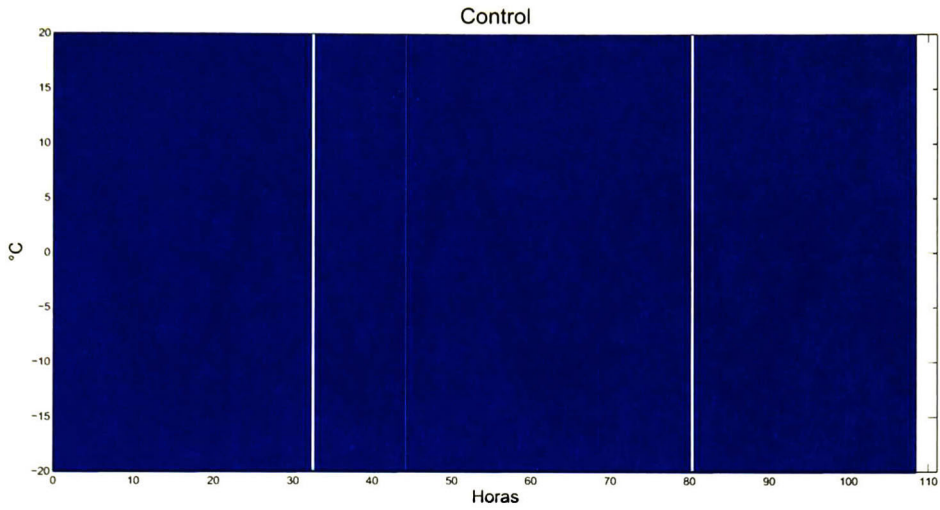


Figura 5.4: Señal de control con retroalimentación de estados.

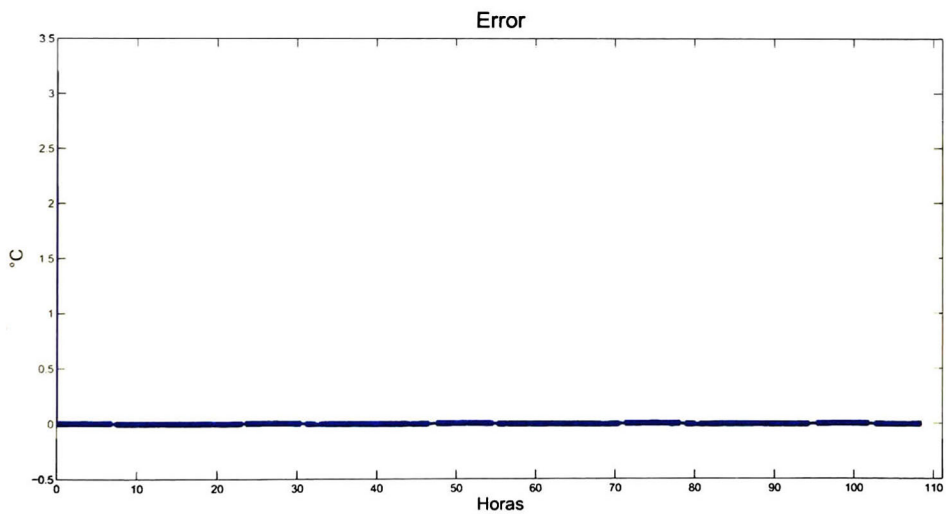


Figura 5.5: Error de seguimiento con retroalimentación de estados.

En la Fig. 5.6 se muestra como el sistema alcanza en un intervalo muy pequeño de tiempo la trayectoria deseada.

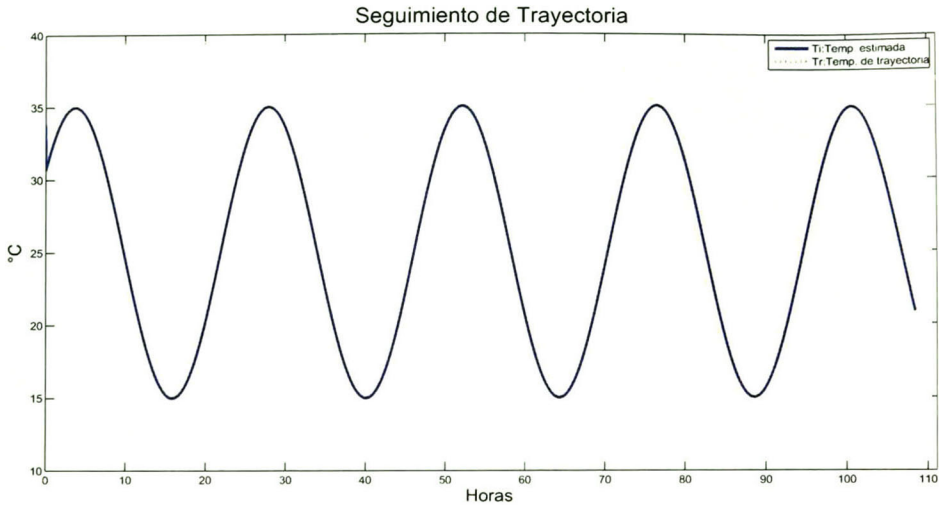


Figura 5.6: Seguimiento de trayectoria con retroalimentación de estados.

En la Fig. 5.4 se aprecia una conmutación de la señal de control muy rápida, esta frecuencia de conmutación no es deseable ya que puede dañar gravemente los actuadores, por esta razón se presenta una solución a este problema.

Para resolver dicho problema que provoca la ley de control anterior, se propone un control basado en modos deslizantes con la siguiente superficie

$$u_3 = k_1 e + k_2 \tanh(e), \quad (5.28)$$

donde  $e$  es el error de seguimiento definido en (5.25).

A la ecuación (5.28) se le conoce como superficie pseudodeslizante [37], dado que la función signo se aproxima con una función sigmoideal y a su vez puede aproximarse por la función tangente hiperbólica. Al llevar esta ley de control a simulación se obtienen los resultados mostrados en la Fig. 5.7, en esta figura se aprecia la temperatura interna medida, la temperatura interna estimada y la trayectoria que ha seguido el sistema con la ley de control definida en (5.28).

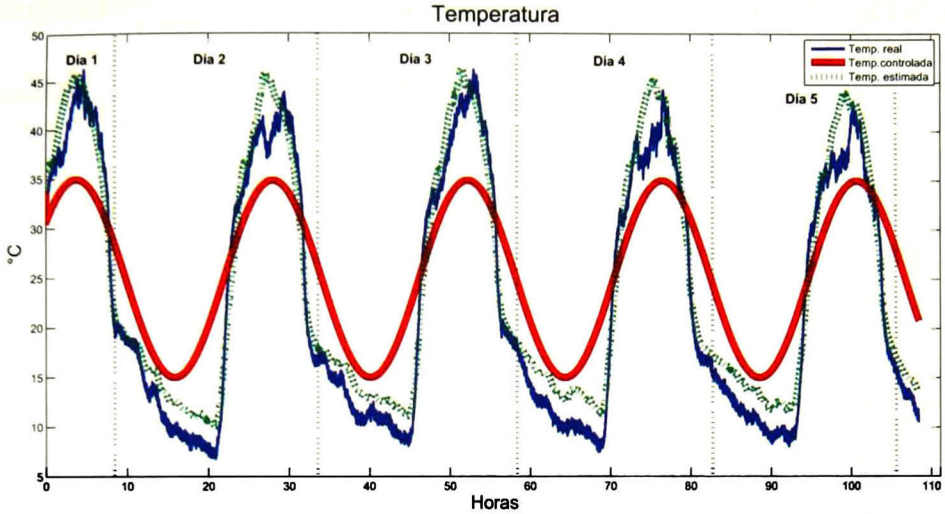


Figura 5.7: Temperatura interna medida (azul), temperatura interna estimada sin actuadores (verde) y trayectoria de control que sigue el sistema con el aire acondicionado (rojo).

En la Fig. 5.8 se muestra la señal de control, la cual como se puede observar una señal más suave y por tanto menos dañina para los actuadores que la ley de control anterior.

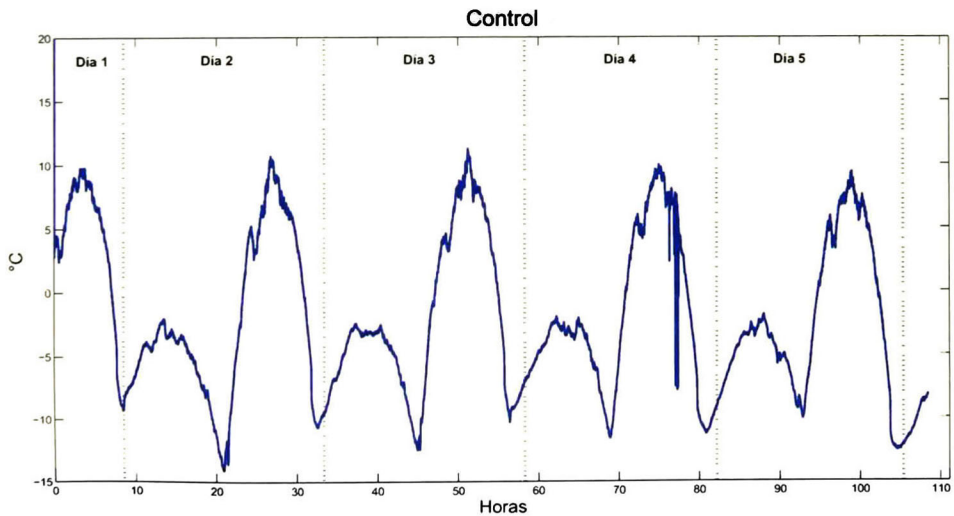


Figura 5.8: Señal de control con modos deslizantes.

En la Fig. 5.9 se muestra el error de seguimiento.

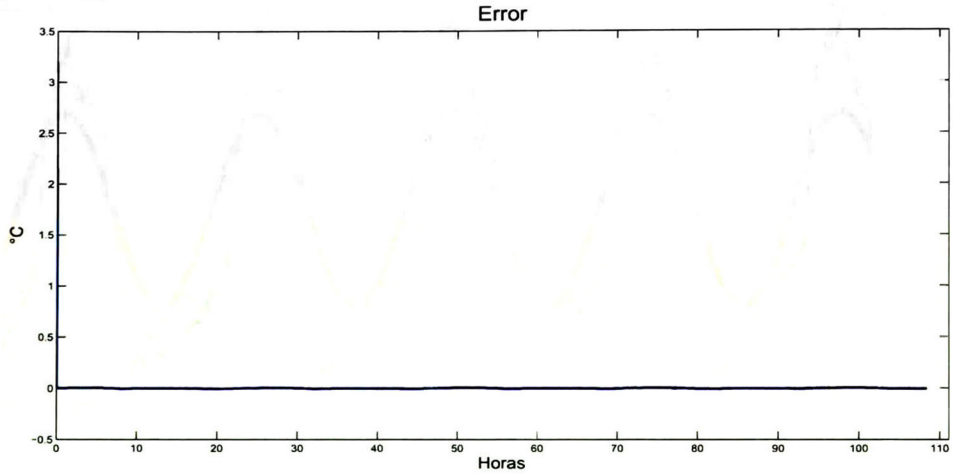


Figura 5.9: Error de seguimiento con modos deslizantes.

Y en la Fig. 5.10 se muestra como el sistema alcanza en un intervalo muy pequeño de tiempo la trayectoria deseada.

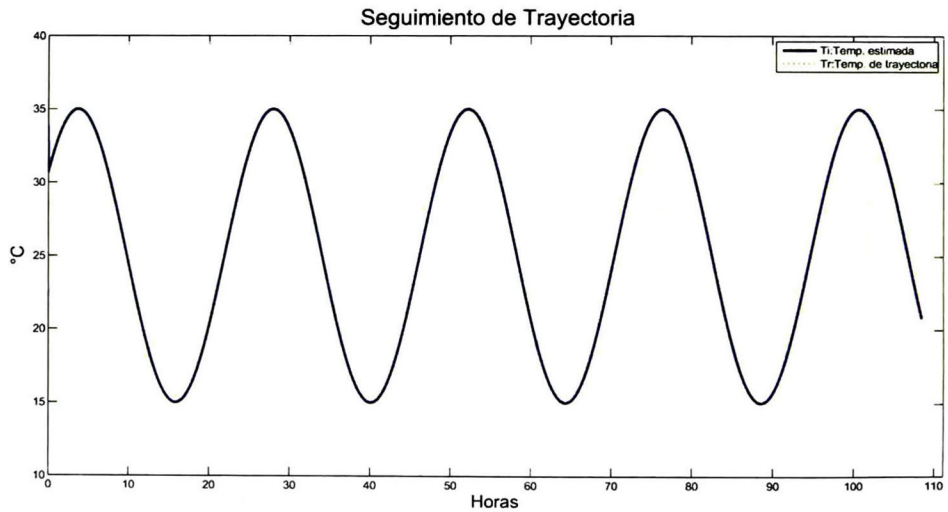


Figura 5.10: Seguimiento de trayectoria con modos deslizantes.

Se puede apreciar en las Figuras 5.4 y 5.8 diferencias notables con distintas leyes de control, la ley definida en (5.27) se le puede atribuir el nombre de *ley de control invasiva*, ya que ocasiona daño a los actuadores del prototipo debido a las conmutaciones bruscas y rápidas. mientras que la ley definida en (5.28) es una ley de control más adecuada a las necesidades del invernadero, ya que la mayoría de los actuadores se activan por medio de relevadores electromecánicos y éstos no pueden reaccionar a velocidades muy rápidas.

## Capítulo 6

# Conclusiones

En este trabajo se obtuvo un modelo que describe la física del prototipo de invernadero construido en CINVESTAV, Unidad Guadalajara. A este respecto cabe señalar que el modelado de un invernadero, en general es una tarea muy complicada debido a la gran cantidad de variables, parámetros y constantes que presenta este tipo de sistemas. En el presente trabajo se partió de un modelo existente en la literatura y se adaptó al prototipo bajo estudio.

Para lograr este objetivo, se detectaron los parámetros del modelo cuyos valores no fue posible obtener en tablas o por mediciones en el prototipo. Estos valores fueron determinados mediante el uso del algoritmo de *optimización por enjambre de partícula* en dos etapas, en la primera etapa se determinaron los parámetros relacionados con la estructura del prototipo, y en la segunda aquellos relacionados con los actuadores del prototipo.

La metodología del PSO permitió identificar los parámetros en cuestión, con una garantía de que sus valores pueden estar más cerca de un mínimo global, respecto a los que entregan los métodos de identificación clásicos como: mínimos cuadrados, gradiente, etc., donde los valores encontrados pueden corresponder a la obtención de un mínimo local del criterio.

De igual forma los resultados que se obtuvieron al validar el modelo identificado con datos reales en un período de cinco días fueron bastantes buenos, mostrando la efectividad del modelo obtenido así como de los parámetros encontrados en las etapas de optimización.

También se realizó un análisis termodinámico, el cual dió base para mostrar que en el invernadero sin plantas, es insuficiente la ventilación por ventanas y ventiladores para enfriar el invernadero y por esta razón se propuso emplear un aire acondicionado como actuador para regular la temperatura. De esta forma se diseñaron dos leyes de control, la primera basada en retroalimentación de estados y la segunda basada en modos deslizantes, ambas probadas en simulación, debido a que el invernadero bajo estudio, no cuenta con un sistema de aire acondicionado: la primera se presentó de forma convencional proporcionando buena regulación, pero presentando una ley de control de alta frecuencia que es impráctica en un invernadero, por presentar dinámicas lentas y actuadores igualmente con dinámicas lentas.



La segunda se diseñó en base a una superficie pseudodeslizante mostrando buena regulación, pero esta vez la señal de control es más suave y adecuada para el funcionamiento de los actuadores. También este análisis proporcionó la energía aproximada necesaria para controlar la temperatura del invernadero, la cual evidentemente se reduciría si se contase con un cultivo dentro del prototipo, ya que un cultivo crea un microclima y modifica todas las variables del invernadero.

## 6.1. Trabajo futuro

Como trabajo futuro se propone

- Probar la metodología propuesta de identificación en algún otro invernadero con el fin de determinar la precisión de ésta.

Adquirir datos en diferentes estaciones del año con el fin de seguir validando el modelo.

Agregar un cultivo tanto al invernadero como al modelo (en forma de balance de masa y energía), para posteriormente adaptarlos con la metodología propuesta en este trabajo.

- Considerar la humedad más a detalle en el modelo propuesto en este trabajo.
- Considerar la concentración de  $CO_2$  del invernadero.
- Calcular la energía necesaria para proponer e instalar actuadores capaces de permitir la aplicación de sistemas de control en el invernadero.

# Bibliografía

- [1] M. A. Boles and Y. A. Cengel, *Thermodynamics. An Engineering Approach*. McGraw-Hill., 2010.
- [2] “Página del sensor temperatura-humedad,” [www.tecpel.net/TRH-301\\_302\\_303.html](http://www.tecpel.net/TRH-301_302_303.html).
- [3] “Página del sensor viento,” [www.globalw.com/products/we550.html](http://www.globalw.com/products/we550.html).
- [4] “Página del sensor de radiación solar,” [www.globalw.com/products/we300.html](http://www.globalw.com/products/we300.html).
- [5] “Página del encoder,” [www.autonics.com/upload/data/E50S\\_E50SP\\_EN\\_EP\\_KE\\_09\\_0140A\\_120402.pdf](http://www.autonics.com/upload/data/E50S_E50SP_EN_EP_KE_09_0140A_120402.pdf).
- [6] “Página de fuente abb,” [www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/b20d7fe6fa02f4fec1257a4d002c4c27/\\$file/2CDC114060D0201.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot209.nsf/veritydisplay/b20d7fe6fa02f4fec1257a4d002c4c27/$file/2CDC114060D0201.pdf).
- [7] “Página de fuente legrand,” [www.legrand.com.mx/inter/liblocal/Control%20y%20Alimentacion.pdf](http://www.legrand.com.mx/inter/liblocal/Control%20y%20Alimentacion.pdf).
- [8] G. van Straten, G. van Willigenburg, E. van Henten, and R. van Ooteghem, *Optimal Control of Greenhouse Cultivation*. CRC Press., 2011.
- [9] “Norma mexicana nmx-e-255-cncp-2008,” [www.amci.org.mx/nmx-e-255-cncp-08.php](http://www.amci.org.mx/nmx-e-255-cncp-08.php).
- [10] K. R. Manohar and C. Igathinathane, *Greenhouse technology and management*. BS Publications, 2007.
- [11] X. Blasco, M. Martínez, J. M. Herrero, C. Ramos, and J. Sanchis, “Model-based predictive control of greenhouse climate for reducing energy and water consumption,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 55, pp. 49–70, 2007.
- [12] R. C. Miranda, E. V. Ramos, R. del R. P. Vera, and G. H. Ruiz, “Analysis and simulation of a greenhouse physical model under weather conditions of the central region of mexico,” *Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal*, vol. 41, pp. 317–335, 2007.

- [13] R. J. C. van Ooteghem, "Optimal control design for a solar greenhouse," Ph.D. dissertation, Wageningen University, 2007.
- [14] F. O. R. Palacios and C. E. C. Badillo, *Identifying a greenhouse climate model by using subspace methods*. Ingeniería e investigación., 2010, vol. 30.
- [15] H. U. Frausto, J. G. Pieters, and J. M. Deltour, *Modelling Greenhouse Temperature by means of Auto Regressive Models*. Elsevier Science. Biosystems Engineering., 2003, vol. 84.
- [16] J. P. Coelho, P. B. M. Oliveira, and J. B. Cunha, *Greenhouse air temperature predictive control using the particle swarm optimisation algorithm*. Elsevier Science. Computers and electronics in agriculture., 2005, vol. 49.
- [17] R. Salazar, I. López, and A. Rojano, "A neural network model to control greenhouse environment," *Sixth Mexican International Conference on Artificial Intelligence*, pp. 311–318, 2008.
- [18] M. R. Yousefi, S. Hasanzadeh, H. Mirinejad, and M. Ghasemian, "A hybrid neuro-fuzzy approach for greenhouse climate modeling," *Intelligent Systems (IS), 2010 5th IEEE International Conference*, pp. 212–217, 2010.
- [19] J. L. T. M. del Campo, "Modelado de la temperatura y humedad relativa de un invernadero por medio de redes de petri fluidificadas," Master's thesis, Cinvestav, Unidad Guadalajara., 2012.
- [20] C. Yang and D. Simon, "A new particle swarm optimization technique," *Proceedings of the 18th International Conference on systems Engineering*, 2005.
- [21] R. Eberhart and J. Kennedy, "A new optimizer using particle swarm theory," *Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science*, pp. 39–43, 1995.
- [22] K. E. Parsopoulos and M. N. Vrahatis, *Particle Swarm Optimization and Intelligence. Advances and Applications*. Information Science Reference., 2010.
- [23] A. Trabelsi, F. Lafont, M. Kamoun, and G. Enea, "Fuzzy identification of a greenhouse," *Applied Soft Computing* 7, pp. 1092–1101, 2007.
- [24] R. C. Miranda, G. H. Ruiz, and J. J. G. Escalante, "Modelación física de un invernadero para el desarrollo de un sistema de control climático." *Naturaleza y Desarrollo. Vol. 1 Núm. 2*, pp. 16–24, 2003.
- [25] A. M. Abdel-Ghany and T. Kozai, "Dynamic modeling of the environment in a naturally ventilated, fog-cooled greenhouse," *Renewable Energy* 31, pp. 1521–1539, 2006.

- [26] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*. Prentice Hall., 1998.
- [27] A. Hasni, R. Taibi, B. Draoui, and T. Boulard, "Optimization of greenhouse climate model parameters using particle swarm optimization and genetic algorithms," *Energy Procedia* 6, pp. 371–380, 2011.
- [28] A. Hasni, B. Draoui, M. Latfaoui, and T. Boulard, "Identification of natural ventilation parameters in a greenhouse with continuous roof vents, using a pso and gas," *Sensors and Transducers Journal*, vol. 119, pp. 182–192, 2010.
- [29] W. L. McCabe, J. C. Smith, and P. Harriot, *Unit Operations of Chemical Engineering*. McGraw-Hill., 2005.
- [30] C. von Zabeltitz, *Integrated Greenhouse Systems for Mild Climates. Climate Conditions, Design, Construction, Maintenance, Climate Control*. Springer, 2011.
- [31] J. A. O. Barrón, "Modelado y control de clima en un túnel para cultivo de champiñones," Master's thesis, Cinvestav, Unidad Guadalajara., 2000.
- [32] F. W. Sears and G. L. Salinger, *Termodinámica, teoría cinética y termodinámica estadística*. Editorial Reverté, S. A., 1978.
- [33] C. N. Hernández, "Greenhouse technological packages for high quality production," *Acta Hortic*, pp. 761:285–297, 2007.
- [34] H. Verlodt, "Climate and vegetable management under greenhouse conditions. in: Greenhouse vegetable production and protection in albania,' *Proceedings of FAO workshop in Tirana*, pp. 9–11, 1999.
- [35] X. Qian and X. Jiang, "Design of temperature and humidity control system of imitation natural biological growth," *International Symposium on Computer Network and Multimedia Technology*, 2009.
- [36] H. K. Khalil, *Nonlinear Systems*. Prentice Hall, 1996.
- [37] L. E. G. Jiménez, "Control robusto de manipuladores robóticos por modos deslizantes anidados e integrales," Master's thesis, Cinvestav, Unidad Guadalajara., 2007.
- [38] "National instruments tarjeta usb-6229," <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/203482>.
- [39] "Smithsonian meteorological tables." 1893.

## Apéndice A

# Apendices

### A.1. Sensores

Descripción general de los sensores usados para la adquisición de datos en el invernadero. Al pie de cada figura se encuentra la referencia exacta para consultar la hoja de datos del fabricante para cada sensor.

Sensor de Temperatura y Humedad	
Modelo	LBTRH-25300 Tipo W
Rango de medición	0-100 % RH y 0-100 °C
Salida	0-1VDC, 0-5VDC, 0-10VDC ó 1-5VDC
Alimentación	12-40VDC

Tabla A.1: Características del sensor de temperatura-humedad. Ver [2] para consultar hoja de datos.

Sensor de $CO_2$	
Modelo	TSM-CO2-S100-V/A-20
Rango de medición	0-2,0000 ppm
Salida	0-10VDC/2-10VDC, 0-5VDC/1-5VDC, 0-20mA/4-20mA
Alimentación	24VDC

Tabla A.2: Características del sensor de  $CO_2$ .

<b>Sensor de viento</b>	
Modelo	WE550-Y
Rango de medición	0-50 m/s
Salida	4-20mA
Alimentación	10-36VDC

Tabla A.3: Características del sensor de viento. Ver [3] para consultar hoja de datos.

<b>Sensor de radiación solar</b>	
Modelo	WE300
Rango de medición	0-3000 $W/m^2$
Salida	4-20mA
Alimentación	10-36VDC

Tabla A.4: Características del sensor de radiación solar. Ver [4] para consultar hoja de datos.

<b>Encoder tipo incremental</b>	
Modelo	E50S Series
Resolución	5000 pulsos por revolución
Salida	5VDC
Alimentación	5VDC/24VDC

Tabla A.5: Características del encoder. Ver [5] para consultar hoja de datos.

## A.2. Prototipo

Esquemas generales de la instrumentación del invernadero, aquí se muestran los diagramas de los gabinetes que se encuentran tanto en la caseta de control como en el invernadero, también se anexa un diagrama de general de cableado entre la caseta y el invernadero.

TABLERO CASETA

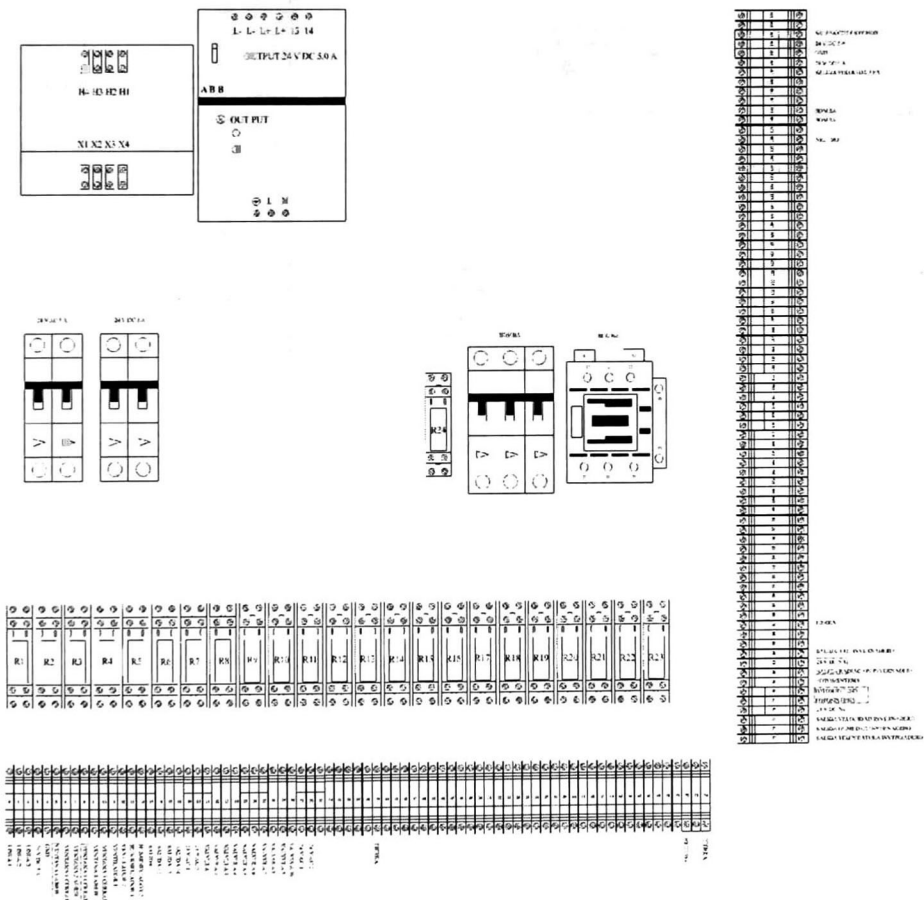


Figura A.1: Esquema de Gabinete de Caseta.

GABINETE 1

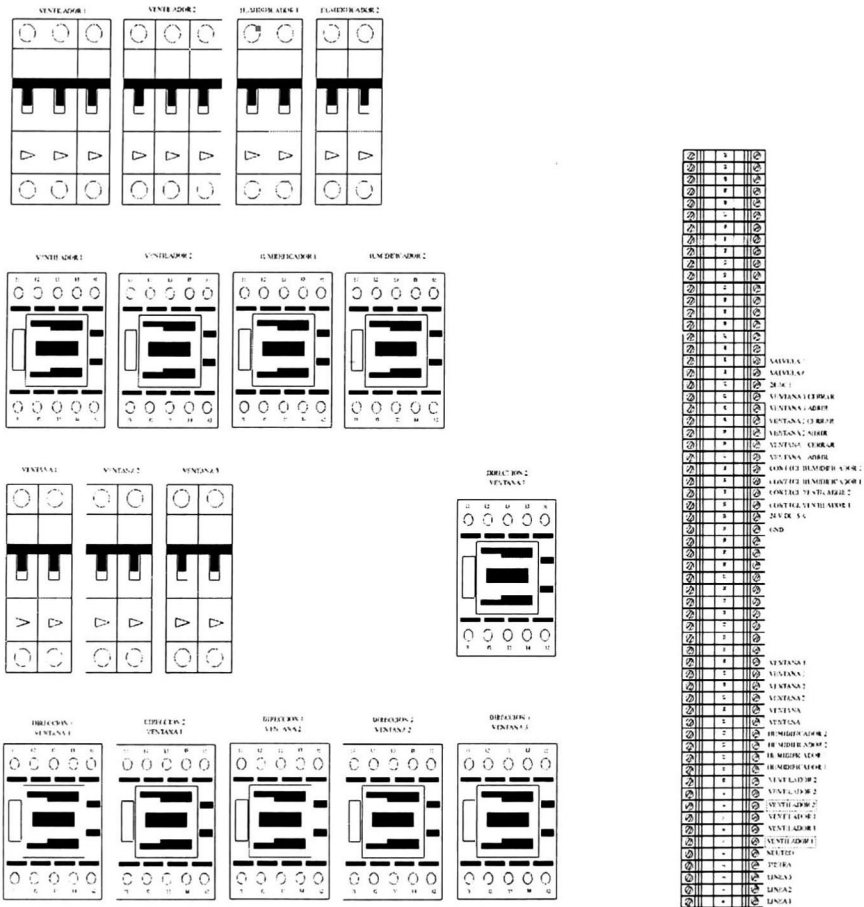
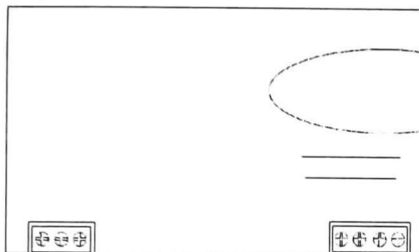


Figura A.2: Esquema de Gabinete 1 de Invernadero.



## A.2. PROTOTIPO

GABINETE 2



1	1	1	1
2	1	1	1
3	1	1	1
4	1	1	1
5	1	1	1
6	1	1	1
7	1	1	1
8	1	1	1
9	1	1	1
10	1	1	1
11	1	1	1
12	1	1	1
13	1	1	1
14	1	1	1
15	1	1	1
16	1	1	1
17	1	1	1
18	1	1	1
19	1	1	1
20	1	1	1
21	1	1	1
22	1	1	1
23	1	1	1
24	1	1	1
25	1	1	1
26	1	1	1
27	1	1	1
28	1	1	1
29	1	1	1
30	1	1	1
31	1	1	1
32	1	1	1
33	1	1	1
34	1	1	1
35	1	1	1
36	1	1	1
37	1	1	1
38	1	1	1
39	1	1	1
40	1	1	1
41	1	1	1
42	1	1	1
43	1	1	1
44	1	1	1
45	1	1	1
46	1	1	1
47	1	1	1
48	1	1	1
49	1	1	1
50	1	1	1
51	1	1	1
52	1	1	1
53	1	1	1
54	1	1	1
55	1	1	1
56	1	1	1
57	1	1	1
58	1	1	1
59	1	1	1
60	1	1	1
61	1	1	1
62	1	1	1
63	1	1	1
64	1	1	1
65	1	1	1
66	1	1	1
67	1	1	1
68	1	1	1
69	1	1	1
70	1	1	1
71	1	1	1
72	1	1	1
73	1	1	1
74	1	1	1
75	1	1	1
76	1	1	1
77	1	1	1
78	1	1	1
79	1	1	1
80	1	1	1
81	1	1	1
82	1	1	1
83	1	1	1
84	1	1	1
85	1	1	1
86	1	1	1
87	1	1	1
88	1	1	1
89	1	1	1
90	1	1	1
91	1	1	1
92	1	1	1
93	1	1	1
94	1	1	1
95	1	1	1
96	1	1	1
97	1	1	1
98	1	1	1
99	1	1	1
100	1	1	1

Figura A.3: Esquema de Gabinete 2 de Invernadero.

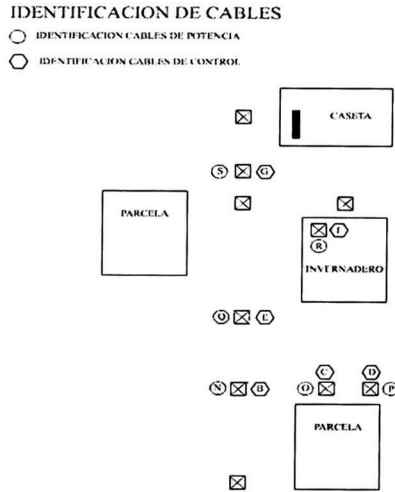


Figura A.4: Identificación de Cables.

IDENTIFICACION DE VALVULAS

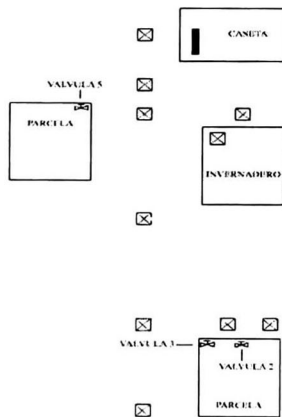


Figura A.5: Identificación de Válvulas.

### A.3. Diagrama de conexiones

Diagrama general de las conexiones entre el panel principal que está dentro de la caseta de control y la tarjeta de adquisición de datos.

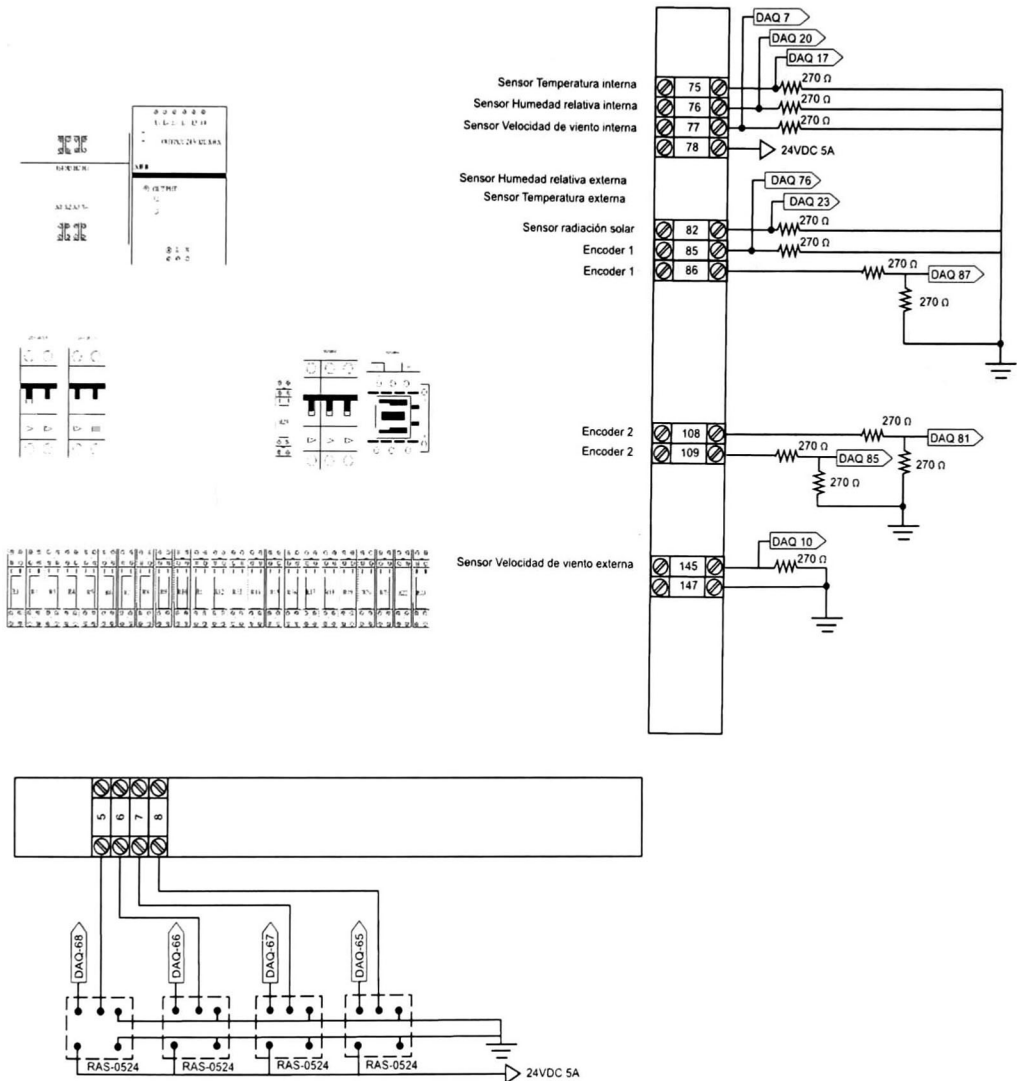


Figura A.6: Diagrama de conexiones entre el Gabinete de Caseta y la tarjeta de adquisición de datos. Diagrama general.

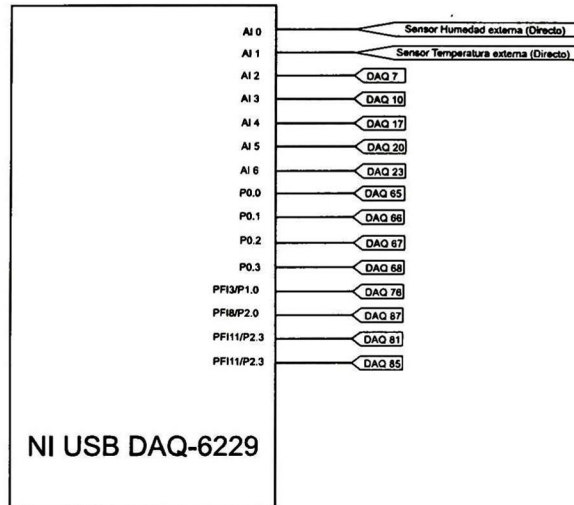


Figura A.7: Diagrama de conexiones entre el Gabinete de Caseta y la tarjeta de adquisición de datos. Diagrama de tarjeta de adquisición.

## A.4. Fuentes

Descripción general de las distintas fuentes de voltaje usadas en la instrumentación del invernadero.

**Fuente de voltaje ABB CP-E 24/5.0.** Fuente de alimentación de primer modo conmutado.

Características principales

- Salida de voltaje a 24 VDC.
- Salida de voltaje ajustable vía potenciómetro.
- Salida de corriente a 5 A.
- Salida de potencia de 120 W.
- Rango de salida de 115/230V AC.
- Eficiencia de 86 %.
- Baja potencia de disipación.
- Enfriamiento por convección.
- Temperatura de operación de -35 a 70 °C.
- Fusible integrado.

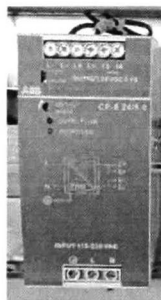


Figura A.8: Fuente ABB CP-E 24/5.0. Más información en [6].

**Fuente de voltaje Legrand 466 25.** Fuente de alimentación conmutada.

Características principales

- Alimentación conmutada, estabilizada para autómatas programables industriales y sus periféricos.
- Aislamiento galvánico de 4000 V.
- Salida de voltaje de 24 V.
- Salida de corriente de 20 A.
- Eficiencia de 89 %.

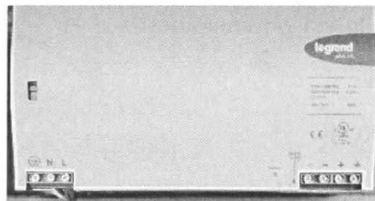


Figura A.9: Fuente Legrand 466 25. Más información en [7].

## A.5. Tarjeta de adquisición de datos

Descripción general de la tarjeta de adquisición de datos usada en el invernadero. En la Fig. A.10 se muestra la tarjeta de adquisición de datos.



Figura A.10: Tarjeta de adquisición de datos NI USB DAQ-6229.

Las características de esta tarjeta son (Ver [38] para más detalles)

<b>General</b>	
Modelo	NI USB DAQ-6229
Tipos de Medida	Codificadores de cuadratura, Voltaje
<b>Entrada Analógica</b>	
Canales	32, 16
Canales de una sola terminal	32
Canales Diferenciales	16
Resolución	16 bits
Velocidad de Muestreo	250kS/s
Máx. Voltaje de Entrada Analógica	10V
Rango de Voltaje Máximo	-10V- 10V
<b>Salida Analógica</b>	
Canales	4
Resolución	16 bit
Máx. Voltaje de Entrada Analógica	10V
Rango de Voltaje Máximo	-10V- 10V
<b>E/S Digital</b>	
Canales Bidireccionales	48
Canales de Entrada Únicamente	0
Canales de Salida Únicamente	0
Temporización	Software, Hardware
Máximo Rango de Tiempo	1MHz
Niveles Lógicos	TTL
<b>Contadores/Temporizadores</b>	
Número de Contadores/Temporizadores	2
Rango Máximo	0V 5V
Frec. Máxima de la Fuente	80MHz
Resolución	32 bits



## A.6. Programa de adquisición de datos

Programa realizado en Labview 8.5.1 para adquirir señales en el invernadero.

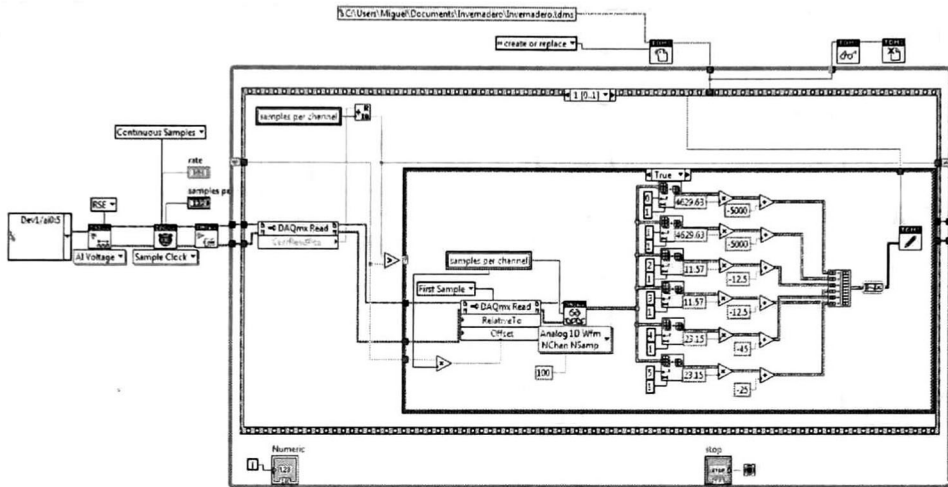


Figura A.11: Programa de adquisición de datos en Labview 8.5.1.

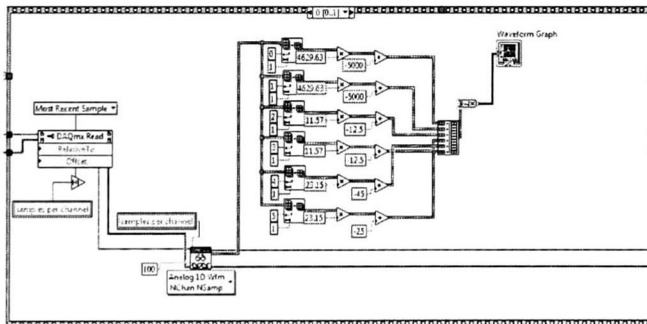


Figura A.12: Programa de adquisición de datos en Labview 8.5.1.

## A.7. Programa para cortinas

Programa realizado en Labview 8.5.1 para controlar las ventanas del invernadero.

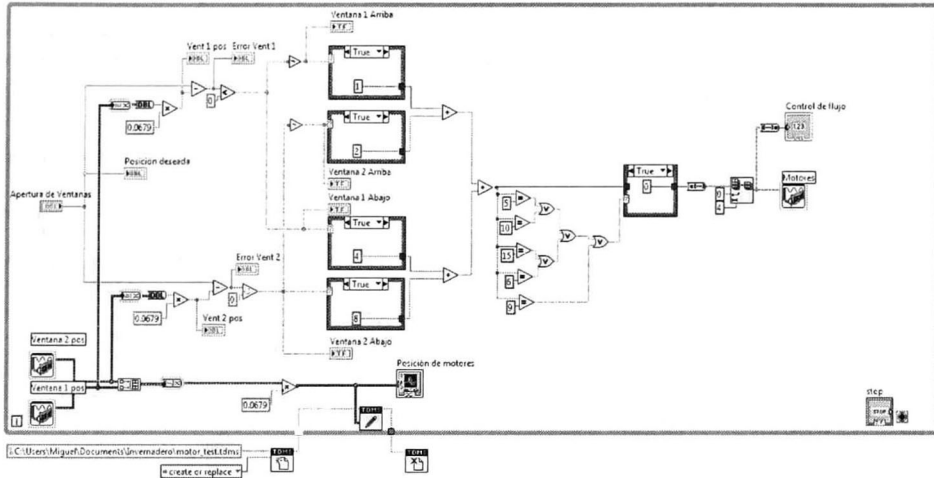


Figura A.13: Programa para cortinas en Labview 8.5.1.

## A.8. Conversión de Humedad Relativa a Humedad Absoluta

La humedad absoluta es la relación entre la masa de vapor de agua y el volumen ocupado por una mezcla de vapor de agua y aire seco [29]. Para convertir la humedad relativa a humedad absoluta se usan las siguientes ecuaciones

$$H_a = \frac{216 \times P_v}{T}.$$

donde  $H_a$  es la humedad absoluta en  $kg_{H_2O}/kg_{aireseco}$ ,  $P_v$  es la presión de vapor en  $Pa$ ,  $T$  es la temperatura del aire en  $^{\circ}C$ . La humedad relativa se expresa como

$$H_R = \frac{P_v \times 100}{P_{vs}}, \quad (A.1)$$

donde  $H_R$  es la humedad relativa expresada en porcentaje y  $P_{vs}$  es la presión de vapor de saturación expresada en  $Pa$ , la cual está expresada como

$$P_{vs} = c_{s1} e^{\frac{c_{s2}(T-T_0)}{c_{s3}+(T-T_0)}},$$

donde  $T_0 = 0^{\circ}C$ ,  $T$  es la temperatura del objeto en  $^{\circ}C$ , y los coeficientes se toman de [39] y son

$$c_{s1} = 610.78$$

$$c_{s2} = 17.08$$

$$c_{s3} = 234.18$$

## A.9. Obtención de la función lineal para la humedad de saturación

La humedad de saturación es la cantidad máxima de gramos de vapor de agua que puede contener  $1m^3$  de aire a una temperatura dada. La Tabla A.6 presenta las humedades de saturación del aire para diferentes temperaturas.

Temperatura ( °C)	Humedad de saturación ( $gr/kg_{aireseco}$ )
0	3.8
5	5.5
10	7.5
15	10.5
20	14.8
25	20
30	27.4

Tabla A.6: Datos de humedad de saturación.

Al linealizar los datos, tenemos la expresión en  $kg/kg_{aireseco}$

$$H_{acl} = 0.000765u_3 + 0.001311 \quad (A.2)$$

donde  $u_3$  es la entrada del sistema y corresponde a la columna de temperatura de la Tabla A.6.



# CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL I.P.N. UNIDAD GUADALAJARA

El Jurado designado por la Unidad Guadalajara del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional aprobó la tesis

Identificación y control de temperatura de un invernadero

del (la) C.

Edgar CRUZ VALERIANO

el día 30 de Agosto de 2013.

Dra. Ofelia Begovich Mendoza  
Investigador CINVESTAV 3B  
CINVESTAV Unidad Guadalajara

Dr. José Javier Ruíz León  
Investigador CINVESTAV 3B  
CINVESTAV Unidad Guadalajara

Dr. Arturo del Sagrado Corazón  
Sánchez Carmona  
Investigador CINVESTAV 3B  
CINVESTAV Unidad Guadalajara

Dr. Mario Angel Siller González  
Pico  
Investigador CINVESTAV 2C  
CINVESTAV Unidad Guadalajara



CINVESTAV - IPN  
Biblioteca Central



SSIT0012007