

Monitoreo y control climático de un invernadero a escala

ROSALES-VICELIS, José Eduardo & FITZ-RODRÍGUEZ, Efrén

J. Rosales & E. Fitz

Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo, km 38.5 carretera México-Texcoco. Chapingo, Estado de México, C.P. 56230, México.
efitzr@taurus.chapingo.mx

F. Pérez, D. Sepúlveda, R. Salazar, D. Sepúlveda (eds.) Ciencias Matemáticas aplicadas a la Agronomía. Handbook T-I.- ©ECORFAN, Texcoco de Mora, México, 2017.

Abstract

Climate control in greenhouses is based on the measurements of the main psychrometric properties of humid air, which are determined using psychrometric tables or charts. The psychrometric chart offers the user certainty to control the climatic conditions in a greenhouse through the air conditioning systems (ventilation, heating, humidification). Therefore, a 1:20 scale greenhouse was designed and built, and controlled through a graphical user interface (GUI). The user interface has a digital psychrometric chart that allows to represent the acquired data and characterize the properties of the air automatically, and then control the operation of the actuators. The scale greenhouse has actuators for natural ventilation (lateral and roof openings), forced ventilation (exhaust fans), radiant pipe heating and evaporative cooling with wet panel to control the microclimate. The purpose of this work is educational, so through the greenhouse at scale represent the climatic conditions and the different psychrometric processes that are developed inside a greenhouse.

6 Introducción

Las condiciones climáticas en un invernadero son primordiales para el desarrollo y crecimiento de los cultivos, ya que condicionan los procesos fisiológicos de respiración, transpiración y fotosíntesis. La eficiencia de la producción de plantas en invernaderos depende en gran medida de la adaptación de las condiciones climáticas óptimas a los cultivos para lograr un alto rendimiento a bajo costo, buena calidad y bajo impacto ambiental (Yang and Simbeye, 2013). Para controlar el microclima que se desarrolla al interior del invernadero se deben considerar diversos parámetros ambientales como radiación solar, temperatura y humedad del aire y concentración de CO₂. Sin embargo la temperatura y la humedad relativa del aire son los factores más importantes que condicionan los procesos fisiológicos de las plantas. A partir de la medición de estos dos parámetros ambientales, se pueden conocer las propiedades psicrométricas del aire húmedo, y el tener la capacidad de controlarlos permitiría el incremento en la calidad y rendimiento de los cultivos.

En los Países Bajos, las computadoras se utilizan para diferentes aplicaciones como el clima, la calefacción y el control de riego en invernadero, pero la aplicación más conocida es el control de clima (temperatura, humedad, CO₂, iluminación artificial) (Caponetto et al., 2000). Las computadoras son herramientas fundamentales para el control de la temperatura del aire y el contenido de humedad de un invernadero, ya que permiten el acondicionamiento del aire para garantizar el desarrollo y crecimiento de los cultivos. Hoy en día, los sistemas de control computarizados son el estándar para invernaderos modernos, con mejoras continuas a partir de los avances de tecnología. Las condiciones ambientales son controladas por sistemas de control electrónico, y puede funcionar manualmente y/o automáticamente (Yang and Simbeye, 2013). Los dispositivos de adquisición de datos (data loggers) de los sistemas de control, solamente, permiten adquirir y almacenar las mediciones de los sensores de variables climáticas. Sin embargo, estos datos deben ser analizados e interpretados para, posteriormente, implementar las respectivas estrategias de control climático.

Dada la problemática en la enseñanza de control climático de biosistemas, se diseñó y construyó un invernadero a escala instrumentado y con una interfaz gráfica de usuario (GUI) propia, la cual dispone de una carta psicrométrica digital que permite representar los datos adquiridos y caracterizar las propiedades del aire de manera automática, y posteriormente, controlar las condiciones climáticas del aire desde la GUI. Este planteamiento tiene como finalidad demostrar el funcionamiento de los sistemas para el control de clima, incluyendo: calefacción por tubería radiante, ventilación forzada, ventilación natural con ventanas laterales y cenitales y enfriamiento evaporativo con paneles húmedos de un invernadero a escala, utilizando la GUI como medio de interacción.

6.1 Materiales y métodos

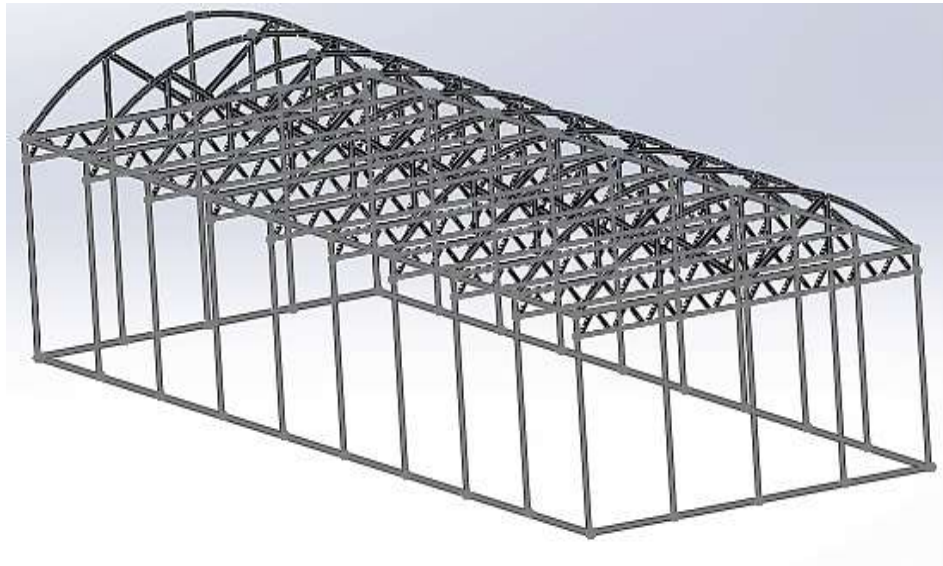
6.1.1 El trabajo de investigación realizado se desarrolló en las siguientes etapas:

- 1) Diseño y construcción de un invernadero a escala.

La primera fase de este trabajo comprendió el diseño y construcción del invernadero a escala, tomando como base al Invernadero Energéticamente Neutral, instalado en el Modulo Demostrativo de Energías Alternativas del Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola en la Universidad Autónoma Chapingo. La escala que se consideró fue 1:20. Se instalaron los sistemas de ventilación natural y forzada, calefacción y humidificación. Así mismo, se colocaron 3 sensores de temperatura y humedad relativa (DTH22), al interior y exterior del invernadero a escala.

En base a las dimensiones del invernadero y considerando la escala, se realizó el dibujo técnico (3D) del invernadero en SOLIDWORKS (Figura 6). El dibujo técnico permitió obtener los planos correspondientes para dimensionar y habilitar los elementos estructurales del invernadero (se utilizó redondo sólido de 3/16 de pulgada y solera de 1/2 pulgada). Utilizando soldadura por arco eléctrico (GMAW) se unieron los componentes estructurales. Sobre las paredes laterales se fijó el plástico de polietileno, malla antiáfidos y paredes de policarbonato, previamente dimensionados. Después del plástico, se colocaron los sistemas de ventilación (natural y forzada), calefacción y humidificación.

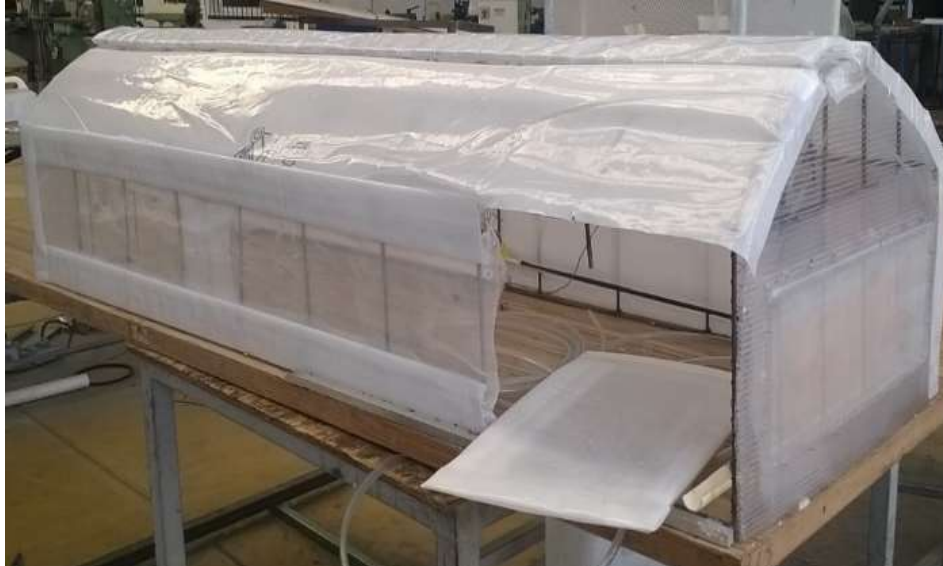
Figura 6 Modelo 3D de la estructura del invernadero en SOLIDWORKS®



El sistema de ventilación natural se implementó utilizando 4 moto-reductores de plástico con una relación 1:100 (tres para las ventanas laterales y uno para la ventana cenital). Para el sistema de ventilación forzada se utilizaron 3 ventiladores pequeños (de 5 V). Se instaló un sistema de calefacción por tubería radiante utilizando manguera de plástico de 1/4 de pulgada, la cual fue distribuida en el interior del invernadero. El agua caliente que circula por la manguera se calentó utilizando una resistencia eléctrica y se hizo circular utilizando una bomba de agua que permite un flujo de 1200 L/h. El sistema de humidificación se instaló utilizando una estructura de aluminio y una porción de tela porosa para simular un panel húmedo. Para humedecer el panel húmedo se utilizó una bomba de agua que permite un flujo de 230 L/h.

Después de instalar los sistemas de control climático, se colocó la cubierta de polietileno para cubrir el techo del invernadero y se estableció la ventana cenital utilizando plástico de polietileno y malla antiáfidos en la ventila cenital. Posteriormente, se instalaron sensores de temperatura y humedad relativa (DTH22) en el invernadero (dos al interior y uno al exterior). Finalmente, se colocó la puerta del invernadero para finalizar la construcción del invernadero a escala (Figura 6.1).

Figura 6.1 Invernadero a escala



2) Carta psicrométrica digital.

La carta psicrométrica digital se programó en el ambiente de desarrollo de MATLAB®, con la finalidad de incorporarla a la GUI del sistema. La carta psicrométrica se utiliza para un determinado rango de temperatura del aire y para una presión atmosférica predeterminada. Las propiedades psicrométricas se determinaron con las ecuaciones que definen las principales propiedades psicrométricas del aire húmedo (ASHRAE, 2001):

1. Presión de vapor a saturación (e_s), en Pa.

$$\ln(e_s) = \frac{C_1}{T} + C_2 + C_3T + C_4T^2 + C_5T^3 + C_6T^4 + C_7 \ln T; \quad -100^\circ\text{C} < T < 0^\circ\text{C} \quad (6)$$

$$\ln(e_s) = \frac{C_8}{T} + C_9 + C_{10}T + C_{11}T^2 + C_{12}T^3 + C_{13} \ln T; \quad 0^\circ\text{C} \leq T < 200^\circ\text{C} \quad (6.1)$$

Donde:

T Temperatura del aire, en K

C_i Coeficientes de regresión (Tabla 1).

Tabla 6 Coeficientes para la Ecuación 6 y 6.1

Coeficientes para la Ecuación 6	Coeficientes para la Ecuación 6.1
$C_1 = -5.6745359 \text{ E}+00$	$C_8 = -5.8002206 \text{ E}+03$
$C_2 = +6.3925247 \text{ E}+00$	$C_9 = +1.3914993 \text{ E}+00$
$C_3 = -9.6778430 \text{ E}-03$	$C_{10} = -4.8640239 \text{ E}-02$
$C_4 = +6.2215701 \text{ E}-07$	$C_{11} = +4.1764768 \text{ E}-05$
$C_5 = +2.0747825 \text{ E}-09$	$C_{12} = -1.4452093 \text{ E}-09$
$C_6 = -9.4840240 \text{ E}-13$	$C_{13} = +6.5459673 \text{ E}+00$
$C_7 = +4.1635019 \text{ E}+00$	

2. Presión de vapor (e_a) en Pa.

$$e_a = e_s * \frac{HR}{100} \quad (6.2)$$

Donde:

HR Humedad relativa del aire (%)

3. Razón de humedad (W_a) en $\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{aire}}$.

$$W_a = 0.622 \frac{e_a}{P_b - e_a} \quad (6.3)$$

Donde:

P_b Presión atmosférica, en Pa.

4. Razón de humedad a saturación (W_s) en $\text{g}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{aire}}$

$$W_s = 0.622 \frac{e_s}{P_b - e_s} \quad (6.4)$$

5. Volumen específico (VE).

$$VE = \frac{Ra * T_a (1 + 1.6078 * W_a)}{P_b} \quad (6.5)$$

Donde:

Ra Constante de gas para aire seco, (287.055 J/kg·K)

6. Temperatura del punto de rocío (t_d).

$$t_d = C_{14} + C_{15}\alpha + C_{16}\alpha^2 + C_{17}\alpha^3 + C_{18}(e_a)^{0.1984} \quad 0^\circ\text{C} < T_a < 93^\circ\text{C} \quad (6.6)$$

$$t_d = 6.09 + 12.608\alpha + 0.4959\alpha^2 \quad 0^\circ\text{C} > T_a \quad (6.7)$$

Donde:

$$\begin{aligned}\alpha &= \ln(e_a) \\ C_{14} &= 6.54 \\ C_{15} &= 14.526 \\ C_{16} &= 0.7389 \\ C_{17} &= 0.09486 \\ C_{18} &= 0.4569\end{aligned}$$

7. Entalpia (h).

$$h = 1.006 * T_a + W_a(2501 + 1.805 * T_a) \quad (6.9)$$

8. Temperatura de bulbo húmedo (T_{BH}).

Para el cálculo de esta temperatura se tiene que realizar una interpolación teniendo como base la Ecuación 6.9.

$$W_a = \frac{(2501 - 2.381 * T_{BH}) * W_s^* - 1.006 * (T_a - T_{BH})}{2501 + 1.805 * T_a - 4.186 * T_{BH}} \quad (6.9)$$

Donde:

W_s^* Razón de humedad a saturación de la temperatura de bulbo húmedo.

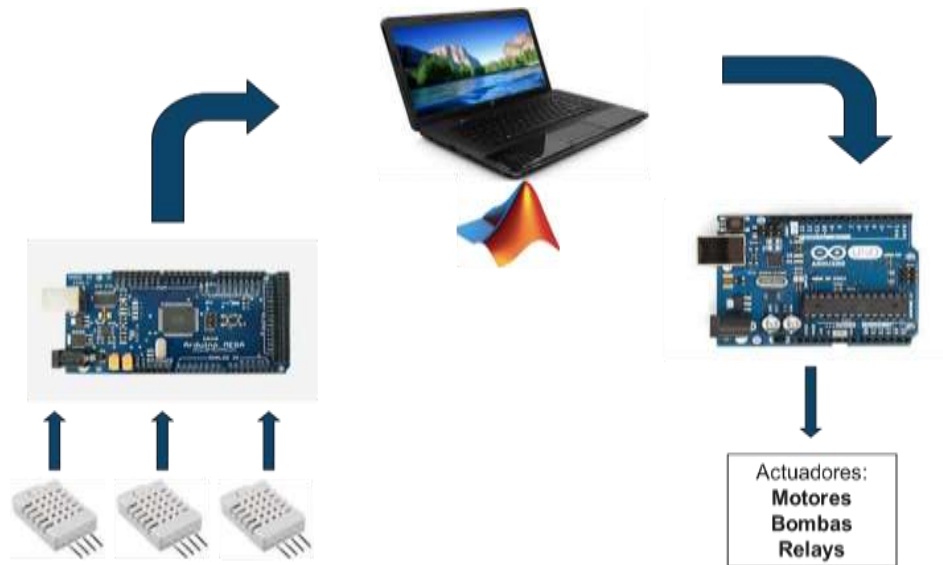
T_{BH} Temperatura de bulbo húmedo.

3) Comunicación MATLAB – Arduino.

La tercera fase consistió en realizar una comunicación entre la interfaz desarrollada en MATLAB® y el microcontrolador Arduino, para controlar los sistemas del invernadero desde la GUI. Para implementar la comunicación se utilizaron dos placas de Arduino conectados a la computadora portátil (Figura 6.2), una placa MEGA utilizada para adquirir las mediciones de los sensores DHT22 (Figura 6.4) y una placa UNO para controlar los actuadores del invernadero (Figura 6.3).

Los 3 sensores DHT22 se conectaron a los pines digitales de la placa Mega. Esta placa se conectó a la computadora portátil por medio de un cable USB. A través del cable USB, la placa Mega envía la información de los sensores al ambiente de desarrollo de MATLAB®, a través de una comunicación por puerto serial. En esta comunicación la placa Arduino imprime los valores en el monitor o puerto serial; después, el software abre dicho puerto serial, lee y guarda estos valores.

Figura 6.2 Diagrama de funcionamiento de la comunicación Matlab-Arduino



La información que recibe el software es enviada a la carta psicrométrica digital, en donde se grafican, en línea, dichos valores. Los datos de los sensores graficados en la carta psicrométrica permiten caracterizar las condiciones climáticas del invernadero, y posteriormente, implementar estrategias de control a través de los actuadores, manipulados desde la interfaz gráfica.

Para poder controlar los actuadores desde la interfaz, primeramente se cargó un programa específico a la placa UNO. El algoritmo implementado en la placa permite controlar la placa desde la GUI desarrollada en MATLAB®. Posteriormente, se instaló una paquetería en MATLAB®. Finalmente, se programaron los botones en la GUI para controlar los actuadores conectados a la placa UNO, utilizando las funciones de MATLAB® designadas para esta interfaz.

Los actuadores utilizados en los sistemas de calefacción, ventilación y humidificación se controlaron con una placa Shield Relay 2.0 compatible con Arduino (Figura 6.3). Esta placa se instaló sobre la placa UNO y se conectaron diferentes actuadores a las terminales correspondientes de la placa shield. Esta placa contiene cuatro relevadores por lo cual se pueden controlar 4 diferentes actuadores, dos bombas de agua, resistencia eléctrica y el conjunto de ventiladores.

Los motorreductores utilizados para accionar las ventilas se controlaron con un driver DRV8833. Este controlador permite abrir y cerrar la ventilas del invernadero, al cambiar el sentido de giro de los moto-reductores.

Figura 6.3 Diagrama de conexiones para la placa Arduino UNO

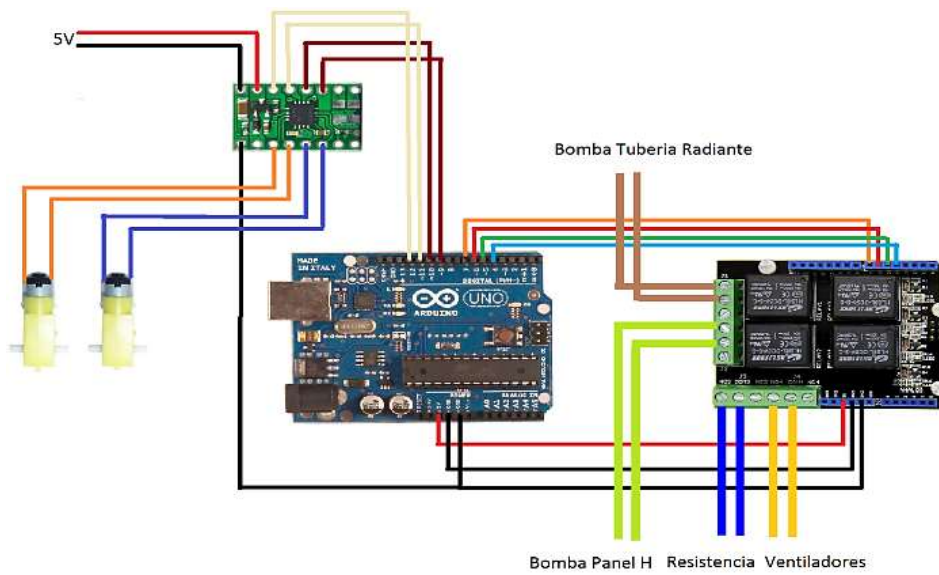
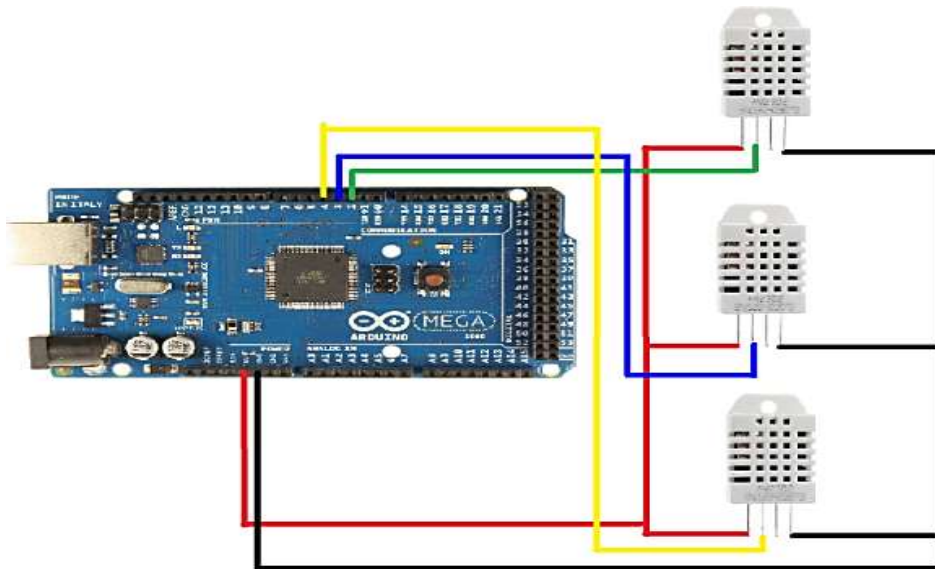


Figura 6.4 Diagrama de conexiones para la placa Arduino MEGA



Dos sensores de temperatura y humedad relativa se instalaron de manera estratégica para monitorear la temperatura al interior del invernadero (un sensor se instaló cercano al sistema de humidificación y otro sensor se colocó próximo al conjunto de ventiladores). El tercer sensor se colocó al exterior del invernadero para conocer las condiciones climáticas del medio exterior y para comparar dichas condiciones con las condiciones del interior.

Los componentes electrónicos utilizados para controlar los actuadores y establecer la comunicación entre MATLAB® y Arduino se posicionaron al exterior del invernadero (Figura 6.5), con la finalidad de facilitar las conexiones entre las placas Arduino y la computadora portátil.

Figura 6.5 Invernadero a escala con las conexiones electrónicas



4) Interfaz gráfica de usuario (GUI).

Los datos provenientes de los sensores DHT22 se visualizaron en una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI, por sus siglas en inglés). La GUI, que se implementó en el ambiente de desarrollo MATLAB®, permite caracterizar las condiciones climáticas al interior del invernadero, a través de la carta psicrométrica digital que se anexó a la GUI. Se programaron botones en la GUI que permiten establecer la comunicación para la adquisición de las mediciones de los sensores.

De manera automática, las mediciones se grafican en la carta psicrométrica digital, lo que permite analizar las mediciones en el gráfico psicrométrico, y establecer las estrategias correspondientes para controlar las condiciones climáticas del invernadero.

Para establecer el control se programaron botones que permiten activar y desactivar los actuadores de los sistemas de calefacción, ventilación y humidificación en el invernadero.

La etapa inicial del diseño de la GUI consistió en elaborar una versión preliminar (Figura 6.6). La finalidad de esta versión consistió en evaluar la carta psicrométrica digital de manera manual, es decir el usuario introduce dos parámetros psicrométricos (Temperatura de Bulbo Seco y Humedad Relativa) en la tabla que corresponde a “ESTADOS”, posteriormente, la interfaz calcula las propiedades psicrométricas del aire y las grafica en la carta psicrométrica. Esta versión preliminar permite evaluar el déficit de presión vapor (DPV o VPD por sus siglas en inglés) de manera manual.

Se logró la manipulación de los actuadores de los diferentes sistemas de control climático (moto-reductores, bombas de agua, ventiladores y resistencia eléctrica) desde MATLAB® y en línea, es decir se pudo controlar estos actuadores de manera manual. Dicho control también se puede realizar en Arduino, pero se tienen que implementar interruptores para las señales de accionamiento, lo cual aumenta costos y la necesidad de utilizar más pines en la placa de Arduino.

La carta psicrométrica digital representa las propiedades psicrométricas del aire, de manera automática, a partir de las mediciones de los sensores de temperatura y humedad relativa. Esto permite visualizar los procesos psicrométricos que se desarrollan al interior del invernadero, y establecer estrategias para controlar el clima.

Para mejorar el presente trabajo de investigación se recomiendan las siguientes acciones:

- Sellar herméticamente el invernadero para que se desarrollen, de manera adecuada, los procesos psicrométricos correspondientes en el modo de ventilación forzada.
- Implementar una bomba de agua con un caudal o flujo de agua menor a 230 L/h, esto con la finalidad de que el panel húmedo construido obtenga un flujo menor y el agua se distribuya, de mejor forma, a lo largo del panel.
- Instalar un sensor de temperatura en el depósito de agua correspondiente al sistema de calefacción, esto con la finalidad de controlar la temperatura del agua que circula por la tubería radiante.
- Utilizar otro material, diferente al plástico, para el sistema de calefacción por tubería radiante, ya que la manguera de plástico no soporta altas temperaturas.
- Realizar la comunicación MATLAB-Arduino con una sola placa, esto con la finalidad de reducir costos.
- Incorporar botones en la GUI para implementar un control automático.
- Instalar un sensor infrarrojo que permita obtener la temperatura foliar de una planta, y a partir de esto obtener el valor del déficit de presión de vapor (DPV).

6.3 Referencias

ASHRAE (2001). *Psychrometrics*. In "ASHRAE Handbook: Fundamentals".

Caponetto, R., Fortuna, L., Nunnari, G., Occhipinti, L., and Xibilia, M. G. (2000). *Soft computing for greenhouse climate control*. IEEE Transactions on Fuzzy Systems **8**, 753-760.

Yang, S.-f., and Simbeye, D. S. (2013). *Computerized Greenhouse Environmental Monitoring and Control System Based on LabWindows/CVI*. JOURNAL OF COMPUTERS **8**, 399.