



**UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN**

---

**CAMPUS LOMA BONITA**

**INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA EL POSICIONAMIENTO DE MALLA SOMBRA EN UN MODELO A ESCALA DE CÁMARA DE AMBIENTE CONTROLADO EN FUNCIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR**

Tesis profesional para obtener el título de  
**INGENIERO EN MECATRÓNICA**

Presenta:

**C. LUIS GONZALO REYES VELASCO**

Asesor de tesis:

**Dr. RAFAEL CASTILLO RINCÓN**

Co-Asesor de tesis:

**M.C. José Mercedes Pablo Altunar**

**LOMA BONITA, OAX.**

**ABRIL 2016**



**UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN**  
**CAMPUS LOMA BONITA**

**INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

LA PRESENTE TESIS TITULADA "IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA EL POSICIONAMIENTO DE MALLA SOMBRA EN UN MODEO A ESCALA DE CÁMARA DE AMBIENTE CONTROLADO EN FUNCIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR." PRESENTADA POR EL SUSTENTANTE DE LICENCIATURA C. LUIS GONZALO REYES VELASCO BAJO LA DIRECCION DEL DR. RAFAEL CASTILLO RINCÓN, HA SIDO REVISADA Y ACEPTADA POR EL COMITE EXAMINADOR PARA SER DEFENDIDA EN EL EXAMEN PROFESIONAL Y OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO EN MECATRÓNICA.

---

***M. en C. José Luis Nájera Sánchez.***  
Jefe de la carrera de Ingeniería en  
Mecatrónica.

---

***Dr. Rafael Castillo Rincón.***  
Asesor de tesis.

---

***M. en C. Esteban Chávez Conde.***  
Presidente.

---

***Dr. Álvaro Cabrera Amado.***  
Secretario.

---

***Dr. Rafael Castillo Rincón.***  
Vocal.

Loma Bonita, Oaxaca, Abril 2016



UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN

---

CAMPUS LOMA BONITA

INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL  
PARA EL POSICIONAMIENTO DE MALLA SOMBRA EN  
UN MODELO A ESCALA DE CÁMARA DE AMBIENTE  
CONTROLADO EN FUNCIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR**

Tesis que presenta el

**C. Luis Gonzalo Reyes Velasco**

Para obtener el título de Licenciatura en la especialidad de

**Ingeniería en Mecatrónica**

Asesor de Tesis:

**Dr. Rafael Castillo Rincón**

Co-Asesor de tesis:

**M.C. José Mercedes Pablo Altunar**

Loma Bonita, Oaxaca. Abril del 2016

# ***Dedicatoria***

*A mis padres Petra Velasco López y Santiago Reyes Hernández, por apoyarme para realizar mis metas durante todos estos años. A mis hermanos quienes también me brindaron su apoyo incondicional y sin todos ustedes este trabajo no habría sido posible.*

# *Agradecimientos*

Primeramente agradezco a dios por permitirme compartir este logro al lado de toda mi familia.

A mis padres y hermanos por apoyarme en todo momento para seguir adelante y haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida.

A mi compañero y amigo Alfredo por su apoyo en los buenos y malos momentos durante todo el tiempo que tengo de conocerlo.

A los profesores que participaron en mi formación académica. Gracias por sus consejos y dedicación.

A mi asesor de tesis, el Dr. Rafael Castillo Rincón por haberme dado la oportunidad de desarrollar este proyecto. Gracias por haberme guiado durante todo el desarrollo de la tesis.

A los profesores M.C. José Mercedes Pablo Altunar, M.C. Esteban Chávez Conde, Dr. Álvaro Cabrera Amado y el Dr. Francisco Gutiérrez Zainos. Por su tiempo para revisar mi trabajo de tesis y por sus consejos en todo momento.

## Resumen

En este trabajo se presenta la implementación de un sistema de control de lógica difusa para el posicionamiento de una malla sombra negra en un modelo a escala de cámara de ambiente controlado (CACO), en función de la radiación solar al interior. El desarrollo incluyó la construcción así como la instrumentación, calibración y puesta en marcha del equipo experimental.

La construcción consistió en un sistema tipo guía que permitió plegar y desplegar la malla sombra en la parte superior del sistema CACO a una altura recomendada de acuerdo con la revisión bibliográfica y en función con la radiación solar deseada al interior  $G_{T2}$ .

En la etapa de instrumentación se colocó un sensor de radiación solar en la sección A y B por separado, así como también se utilizó el sensor de radiación solar de la estación meteorológica de la Universidad del Papaloapan campus Loma Bonita; los dos primeros sensores permitieron monitorear y controlar la radiación solar al interior de la CACO a través del posicionamiento de la malla sombra, mientras que el tercero permitió comparar el efecto de la radiación solar a través de la malla sombra y el plástico de polivinilo con respecto al medio ambiente exterior. De igual forma se instalaron sensores de temperatura y humedad relativa (HMP60) en cada sección de la CACO con la finalidad de medir y registrar sus comportamientos.

La calibración consistió en recubrir con manguera plástica los cables que proporcionan la señal de los sensores de radiación solar, temperatura y humedad instalados al interior del modelo a escala, ya que al realizar una comparación con respecto a los sensores de temperatura y humedad del Extench Instrument RH520A se presentaron diferencias significativas conforme aumentaba la temperatura de los cables de los sensores. Por otro lado se ajustó el tiempo de retardo del sistema de control de lógica difusa logrando obtener un retardo de 2 segundos sin perturbar el sistema ante una respuesta rápida a los cambios existentes de radiación solar a lo largo del día.

Finalmente calibrado el sistema se llevaron a cabo pruebas experimentales en la CACO con y sin malla sombra, posteriormente con malla sombra controlada. La primera y segunda prueba se realizó el día 7 de Agosto y 18 de Septiembre del 2015, comprendida durante las 8:30 am hasta las 6:00 pm, mientras que la tercera prueba experimental se llevó a cabo a lo

largo de la semana del día 28 de Septiembre al 2 de Octubre del mismo año. De los resultados obtenidos se encontró que el uso de malla sombra en conjunto con el plástico de polivinilo reducen la radiación solar al interior en un 75%. Adicionalmente al controlar la radiación solar a través del pliegue y despliegue de la malla sombra, la radiación solar se mantuvo en un valor de referencia ( $191 \text{ W/m}^2$ ) con una incertidumbre de  $\pm 10 \text{ W/m}^2$ , logrando además una disminución de la temperatura promedio en  $5^\circ\text{C}$  y del 40% al 50% en la humedad relativa al interior de la CACO.

También, se encontró que el sistema de control tiene un mejor desempeño en los días parcialmente soleados que es cuando predomina la radiación solar difusa, mientras que para los días soleados el mejor control se presenta dos horas antes y después del medio día, que es cuando la radiación solar global predomina en la parte superior del modelo a escala, por lo que no es necesario orientar la CACO con respecto a la trayectoria aparente del sol.

## Abstract

This work presents the implementation of a system of diffuse logic control by the positioning of a black mesh shade on a scale model chamber of controlled environment (CACO), depending on the solar radiation of the interior. The development included the construction as well as the instrumentation, calibration and putting the experimental model into operation.

The construction of the model consisted of a type of guide system that allows the folding and unfolding of the mesh shade in the upper part of the CACO system to reach the recommended height according to the bibliographical review and in function with the solar radiation of the interior  $G_{T2}$ .

In the instrumentation stage a solar radiation sensor was placed in both section A and B, and a solar radiation sensor from the meteorological station of the University of the Papaloapan campus Loma Bonita was also used; the first two sensors allowed for the monitoring and control of solar radiation within the interior of the CACO over the positioning of the mesh shade, while the third allowed us to compare the effect solar radiation has over the mesh shade and that of the polyvinyl plastic shade with regards to the exterior environment. A temperature and relative humidity sensor (HMP60) of equal form as the first three sensors mentioned was installed in every section of the CACO with the purpose of measuring and registering its comportment.

The calibration consisted of covering the cables with plastic hose that proportion the signal of solar radiation, temperature and humidity sensors installed in the interior of the scale model, having realized a comparison between the sensors of temperature and humidity of the Extench Instrument RH520A significant differences were present during the course of the day increasing the temperature of the cable sensors. At the same time, the diffuse logic control system was set back managing to obtain a delay of 2 seconds without disturbing the system before a rapid response to the existing changes of solar radiation throughout the day.

Finally, after having calibrated the experimental system tests were carried out in the CACO with and without the controlled mesh shade. The first and second test was conducted on

August 7th and September 18th, 2015, taking place during the hours of 8:30 am and 6:00 pm; whereas the third experimental test was carried out throughout the week, from September 28th to October 2nd of the same year. Thru the results obtained after the testing it was found that the use of the mesh shade together with the plastic polyvinyl reduce solar radiation by 75%, Additionally, when solar radiation is controlled over the folding and unfolding of the mesh shade, the solar radiation maintained a value of reference (191 W/m<sup>2</sup>) with an uncertainty of  $\pm 10$  W/m<sup>2</sup>, achieving in addition a decrease of the average temperature by 5°C and a decrease of 40 % to 50 % in relative humidity within the interior of the CACO.

It was also found that the control system had a better performance on partially sunny days do to the fact that this is when diffuse solar radiation is most predominant, whereas on sunny days the best control appears two hours before and two hours after 12:00 noon, which is when solar radiation is most direct over the scale model and there is no need to orientate the CACO in respect to the apparent path of the Sun.

**Revisión of abstract by:** JEFA DEL CENTRO DE IDIOMAS, UNIVERSIDAD DEL PAPALOAPAN, CAMPUS LOMA BONITA, OAXACA.

Cheryl Lynn Gad.

# Índice

	Pág.
<b>Lista de Figuras.</b>	III
<b>Nomenclatura.</b>	V
	Pág.
<b>CAPÍTULO 1. Introducción.</b>	1
1.1 Generalidades.....	2
1.2 Revisión bibliográfica.....	6
1.2.1 Aplicación de mallas sombra.....	6
1.2.2 Control de mallas sombra.....	8
1.2.3 Sistemas de control empleados.....	9
1.2.4 Conclusión de la revisión bibliográfica.....	11
1.3 Objetivos.....	11
1.3.1 Objetivo general.....	11
1.3.2 Objetivos particulares.....	12
1.4 Estructura de la tesis.....	12
<b>CAPÍTULO 2. Modelos de estudio.</b>	<b>13</b>
2.1 Modelo físico.....	14
2.2 Modelo de control.....	16
2.2.1 Controlador difuso.....	18
2.3 Modelo experimental.....	21
<b>CAPÍTULO 3. Equipo experimental.</b>	<b>23</b>
3.1 Diseño del experimento.....	24
3.2 Construcción del sistema de apertura y cierre de malla sombra.....	28
3.2.1 Construcción de la estructura.....	29
3.2.2 Construcción de la base para adaptación de rodamientos y motores....	30
3.2.3 Instalación de la malla en el sistema móvil.....	31

3.2.4 Construcción de las guías.....	32
3.2.5 Construcción del eje para contrapeso.....	32
3.3 Instrumentación del equipo experimental.....	33
3.3.1 Implementación de piranómetro.....	34
3.3.2 Estación meteorológica.....	35
3.3.3 Implementación de interruptor electromecánico.....	36
3.3.4 Sensores de temperatura y humedad relativa.....	37
3.3.5 Implementación de motores.....	37
3.3.6 Etapa de potencia.....	38
3.3.7 Tarjetas de adquisición y control.....	39
3.4 Calibración y puesta en operación del equipo experimental.....	40
<b>CAPÍTULO 4. Resultados experimentales.</b>	<b>42</b>
4.1 Pruebas del comportamiento de la radiación solar al interior de la CACO con y sin malla sombra.....	43
4.1.1 Pruebas del comportamiento de la radiación solar al interior de la CACO con y sin malla sombra.....	43
4.1.2 Pruebas del comportamiento de la radiación solar al interior de la CACO con malla sombra controlada .....	45
4.1.3 Pruebas del comportamiento de la radiación solar con malla sombra controlada para una semana.....	47
<b>CAPÍTULO 5. Conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.</b>	<b>51</b>
5.1 Conclusiones.....	52
5.2 Recomendaciones para trabajos futuros.....	52
<b>Bibliografía.....</b>	<b>54</b>
<b>Apéndice A. Algoritmo de control.....</b>	<b>57</b>
<b>Apéndice B. Diagrama de Conexión.....</b>	<b>65</b>

## Lista de Figuras

	<b>Descripción</b>	<b>Página</b>
<i>Figura 2.1</i>	<i>Modelo físico de la cámara de ambiente controlado sin malla sombra.</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2.2</i>	<i>Modelo de cámara de ambiente controlado con cubierta malla sombra.</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2.3</i>	<i>Diagrama a bloques del sistema de control.</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2.4</i>	<i>Secciones definidas en la CACO.</i>	<i>17</i>
<i>Figura 2.5</i>	<i>Diagrama a bloques de controlador difuso.</i>	<i>19</i>
<i>Figura 2.6</i>	<i>Proceso de Fusificación.</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2.7</i>	<i>Proceso de defusificación.</i>	<i>20</i>
<i>Figura 3.1</i>	<i>Equipo experimental.</i>	<i>24</i>
<i>Figura 3.2</i>	<i>Metodología para medir y registrar la <math>G_{EXT}</math>, <math>G_{T1}</math>, <math>G_{T2}</math> y la activación de canales digitales en la tarjeta NI 9472.</i>	<i>25</i>
<i>Figura 3.3</i>	<i>Metodología para el control de la <math>G_{T2}</math> al interior de la CACO a través de Arduino mega y NI cRIO 9014.</i>	<i>27</i>
<i>Figura 3.4</i>	<i>Estructura extra ensamblada en el modelo a escala.</i>	<i>30</i>
<i>Figura 3.5</i>	<i>Base para soporte de motores y rodamientos.</i>	<i>30</i>
<i>Figura 3.6</i>	<i>Rodamientos a utilizar.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3.7</i>	<i>Cubierta para la protección de motores y engranes.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3.8</i>	<i>Eje propuesto para la implementación de malla sombra.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3.9</i>	<i>Construcción final de la guía para el desplazamiento de la malla sombra.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 3.10</i>	<i>Ensamble final de la estructura en el modelo a escala de CACO.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3.11</i>	<i>Piranómetro de radiación solar global a) QMS101 b) KIPP &amp; ZONEN.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 3.12</i>	<i>Vista superior de la CACO con las secciones definidas.</i>	<i>35</i>
<i>Figura 3.13</i>	<i>Estación meteorológica de la Universidad del Papaloapan.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 3.14</i>	<i>Representación del funcionamiento del interruptor electromecánico.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 3.15</i>	<i>Sensor de temperatura HMP60.</i>	<i>37</i>

<i>Figura 3.16</i>	<i>Adaptación de motores a los ejes de malla sombra.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 3.17</i>	<i>Modulo de potencia L298N con sus conexiones.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 3.18</i>	<i>Sistema CompactRIO.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 3.19</i>	<i>Arduino Mega 2560.</i>	<i>40</i>
<i>Figura 4.1</i>	<i>Comportamiento de la radiación solar (<math>G_{T2}</math>) al interior de la CACO con y sin malla sombra.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 4.2</i>	<i>Comportamiento de la temperatura al interior de la CACO con y sin malla sombra.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 4.3</i>	<i>Comportamiento de la radiación solar del día 18 de Septiembre.</i>	<i>46</i>
<i>Figura 4.4</i>	<i>Comportamiento de la temperatura al interior de la CACO del día 10 de Septiembre.</i>	<i>47</i>
<i>Figura 4.5</i>	<i>Mediciones de radiación solar del día 28 de Septiembre al 2 de Octubre.</i>	<i>48</i>
<i>Figura 4.6</i>	<i>Mediciones de temperatura del día 28 de Septiembre al 2 de Octubre.</i>	<i>49</i>
<i>Figura 4.7</i>	<i>Mediciones de la humedad relativa para el día 28 de Septiembre al 2 de Octubre.</i>	<i>50</i>
<i>Figura A.1</i>	<i>Diagrama de control desarrollado en el software LabVIEW para censar y monitorear la radiación solar, temperatura y humedad relativa al interior del modelo a escala.</i>	<i>63</i>
<i>Figura A.2</i>	<i>Visualizador desarrollado en el software LabVIEW para monitorear las variables climatológicas, así como la señal de salida para el control de la malla sombra.</i>	<i>64</i>
<i>Figura B.1</i>	<i>Diagrama de conexión entre la Arduino Mega 2560, con el modulo L298 para el control de los motores, así como también el censado de los interruptores electromecánicos y las condiciones de control recibidas del sistema NI cRIO 9014. Dicha conexión y simulación se realizo en el software Proteus 8 Profesional con la librería Simulino V.3.</i>	<i>66</i>
<i>Figura B.2</i>	<i>Diagrama esquemático del sistema NI cRIO 9014 con las tarjetas utilizadas para la conexión de los sensores HMP60 y piranómetro, así como la comunicación con la Arduino Mega a través de los canales digitales.</i>	<i>67</i>

## Nomenclatura

<b>VARIABLES</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>UNIDADES</b>
A <sub>X</sub>	Área superior del objeto de estudio	Cm
CA	Canal analógica	Adimensional
CACO	Cámara de ambiente controlado	Adimensional
CCW	Sentido de giro anti horario	Adimensional
CD	Corriente directa	A
CW	Sentido de giro horario	Adimensional
G	Radiación solar	W/m <sup>2</sup>
H.R	Humedad relativa	%
HIGH	Alto	V
LOW	Bajo	GND
OUT	Canal de salida digital	Adimensional
PWM	Modulación por ancho de pulso	Adimensional
Q	Energía térmica	J
LS	Interruptor electromecánico	Adimensional
T	Temperatura	°C

### Subíndice

<i>abs</i>	Solar absorbida en la componente
<i>AE</i>	Del aire ambiente
<i>CIN</i>	Diferencia de temperatura entre el aire interior y el exterior.
<i>E</i>	Al exterior
<i>EXT</i>	Solar exterior
<i>IN</i>	Al interior del aire.
<i>RF</i>	Solar de referencia
<i>R</i>	Solar reflejada
<i>T</i>	Solar al interior

# Capítulo 1

## Introducción.

En este capítulo se presentan las generalidades, así como también la revisión bibliográfica a cerca de los tipos y aplicaciones de malla sombra en la agricultura protegida, las técnicas de control utilizadas para reducir el efecto de la radiación solar al interior de invernaderos ó cámaras de ambiente controlado, y por último los tipos de control (PID y Lógica difusa) comúnmente implementados en sistemas invernadero y cámaras de ambiente controlado para controlar las variables climatológicas. Finalmente se presenta la conclusión de la revisión bibliográfica, los objetivos del trabajo y una descripción de la estructura de la tesis.

## 1.1 Generalidades

En los últimos años, el variante clima que afecta a las diferentes regiones, no sólo de nuestro estado ni del país, sino en gran parte del mundo es principalmente a consecuencia de un constante cambio climático. Dentro de los parámetros meteorológicos más significativos que caracterizan el clima están, la temperatura, la humedad relativa y la radiación solar. Siendo esta última el factor más importante en la vida de nuestro planeta. Esta radiación influye en el funcionamiento de los ecosistemas terrestres y acuáticos tanto a través del control de procesos fotobiológicos (fotosíntesis, fotoperíodo, fototropismos, etc.) como por medio de su acción sobre otros factores ambientales (temperatura, humedad, etc.) y ciclos naturales (ciclos diarios, anuales, hídricos, etc.) que finalmente inciden en la distribución de los organismos. La radiación que llega a la Tierra abarca una amplia gama del espectro electromagnético y aproximadamente el 40% de ella es la que conocemos como luz o radiación visible. Esta comprende longitudes de onda que van de los 400 a los 700 nm, rango que abarca los colores violeta, azul, verde, amarillo, naranja y rojo. Este tipo de luz es la denominada radiación fotosintéticamente activa o PAR (sigla derivada del inglés: photosynthetic active radiation) y es la que comúnmente utilizan los vegetales en el proceso de la fotosíntesis (Carrasco, 2009).

Uno de los sectores en los que más influye este cambio climático es la Agricultura. Cultivos como los hortícolas y ornamentales han experimentado una tendencia cada vez más marcada hacia la obtención de una producción anticipada o fuera de estación, que en ocasiones difiere de aquellas en las que tradicionalmente dichos productos se cultivan a campo abierto. Esta tendencia ha dado pie a la necesidad de utilizar diversas herramientas, materiales y estructuras en la producción de los cultivos con la finalidad de obtener altos rendimientos con productos de mejor calidad. A esta actividad se le conoce como **AGRICULTURA PROTEGIDA**.

La agricultura protegida es aquella que se realiza bajo estructuras construidas con la finalidad de reducir los efectos que el medio ambiente impone para desarrollo de las plantas cultivadas. Es por ello que a través de varios años pero sobre todo en las últimas décadas se han desarrollado diversos tipos de estructuras para la protección de los cultivos y que

recrean las condiciones ambientales óptimas para su desarrollo, de acuerdo a los requerimientos climáticos de cada especie y en concordancia con los factores climáticos de cada región.

Conceptos que engloban la tecnificación del campo y términos como agricultura protegida, cultivos protegidos, agricultura intensiva, invernaderos, casa sombra, plasticultura, cámaras de ambiente controlado, entre otros, son ya de uso frecuente en el medio agronómico para hacer referencia a estas nuevas tecnologías (Bastida, 2004).

Una de estas tecnologías es el empleo de malla sombra, en las denominadas casa sombra, este tipo de estructura protege al cultivo de las plagas al impedir su acceso directo, protegerlo del granizo, pero principalmente está diseñada para proteger al cultivo de la intensa radiación solar (Ortiz, 2009).

Por otro lado están los invernaderos, los cuales son estructuras cerradas por una envolvente de materiales traslucidos dentro del cual es posible obtener condiciones de microclima por efecto invernadero, y con ello cultivar plantas fuera de estación donde el clima principalmente es frío y seco (Pérez y De Paúl, 2007).

Mientras que, las cámaras de ambiente controlado son los recintos diseñados para crear de forma artificial las condiciones ambientales necesarias para que se lleven a cabo algunas funciones de los seres vivos, como son la micro propagación, el crecimiento de plantas, semillas, frutos entre muchas otras funciones (Álvarez *et al.*, 2007). Además, se utilizan también, como simuladores de ambiente, envejecimiento acelerado, control de calidad, investigación de materiales y sistemas, estudio de estabilidad de productos, acondicionamiento húmedo y análisis de comportamiento de especies animales y vegetales, entre otros. Estas cámaras son diseñadas bajo ciertos estándares que difieren en cuanto al tipo de aplicación, volumen que manejan, al tipo de fuente de luz, al tipo de radiación que utilizan, a los tiempos de exposición, a la cantidad de radiación, a los tipos de muestras y a los sensores que utilizan, entre muchas otras características. De esta manera se logran obtener resultados confiables y exactos para una aplicación específica (Cardona *et al.*, 2013).

Es importante destacar que el implemento de tecnología actual y eficiente está ampliando las ventanas de producción agrícola en el mundo. Esta tecnologías incluye los denominados invernaderos híbridos, que consisten en invernaderos cubiertos con mallas y techos de plástico retráctiles que pueden destaparse provisionalmente mediante mecanismos manuales o automáticos, dejando la malla como protección para evitar el ingreso de insectos. Estos techos de plástico se vuelven a recorrer para cubrir el invernadero, cuando hay riesgo de lluvia o en noches frías (Huerta, 2012).

Otras de las tecnologías que se están utilizando en sistemas de invernadero y de cámaras de ambiente controlado es el control de la radiación solar mediante el posicionamiento de las mallas de sombreo, el principal objetivo de estas mallas es limitar los excesos de radiación solar para amortiguar los efectos de temperatura al interior de dichos sistemas y en el cultivo. Con este tipo de control se busca disminuir tanto la radiación infrarroja como la fotosintéticamente activa correspondiente al espectro visible; Por otro lado, el sombreamiento permanente de un invernadero o cámaras de ambiente controlado permite atenuar los picos de temperaturas máximas, pero también pueden ser causal de una disminución en la producción debido a que el rendimiento potencial de un cultivo disminuye por la pérdida relativa de luz solar (Bouzo et al., 2005).

Por lo que el uso de estrategias de control en las mallas de sombreo en la agricultura se han venido aplicando para permitir un mejor control de los niveles de radiación de acuerdo a los requisitos específicos de diversas plantas en las distintas fases de desarrollo, y de las distintas estaciones en diferentes regiones climáticas. Debido a esto existen diferentes tipos de mallas de sombreo a las que se puede aplicar un tipo de control automático de acuerdo a los niveles permisibles de radiación solar de cada producto agrícola (Zari, 2006).

La horticultura bajo invernadero es quizás, la actividad agrícola en la que se va implantando con mayor rapidez la informática y el control automático. En la búsqueda continua de aumentar la rentabilidad, bien sea a través de un mayor rendimiento de los cultivos o bien buscando un aprovechamiento más eficiente de la energía empleada, la aplicación de un control más eficiente es cada vez más deseable en la climatización de invernaderos (P.F. Martínez, *et al*, 2009).

Dentro de los sistemas clásicos de control, el más difundido es el Proporcional-Integral-Derivativo (PID). En este tipo de control la sección proporcional reacciona de acuerdo al error actual del sistema; el valor integral genera su salida de acuerdo a la suma del error en el tiempo y la acción derivativa determina la acción con base en la tasa de cambio temporal del error. El sistema PID es ampliamente utilizado en sistemas de control de temperatura, humedad y velocidad de motores, entre otros (García y Palacio, 2010).

Sin embargo existen otras formas de control que pueden ser aplicadas a sistemas como la Cámara de Ambiente Controlado. Tal es el caso de la lógica difusa. Ésta es una forma de lógica multivariada que se basa en el razonamiento difuso. En contraste con la lógica digital en la cual las variables tienen únicamente los valores uno y cero las variables en lógica difusa pueden adoptar cualquier valor entre estos dos valores extremos. Este intervalo amplio de valores le proporciona a las variables difusas la posibilidad de tener grados de pertenencia, porcentajes de verdad o permite calificar una afirmación en una escala más amplia con valores fijos como falso o verdadero. Por esta razón la lógica difusa se adapta mucho mejor al mundo en el cual vivimos, pues permite interpretar expresiones de la vida cotidiana como “es muy claro”, “está muy caliente” o “hace mucho frío” (García y Palacio, 2010).

Actualmente en la Universidad del Papaloapan se está desarrollando un proyecto de una cámara de ambiente controlado para exteriores a cargo del Dr. Castillo. En este proyecto una de las variables más importantes a controlar es la radiación solar al interior ya que se utiliza una malla sombra de forma estática y no se tiene implementado un control sobre ella, por lo que se presenta la oportunidad de poder aplicar los conocimientos adquiridos durante la carrera como ingeniero en Macatrónica para llevar a cabo mi trabajo de tesis referente a la implementación de una estrategia de control para el posicionamiento de una malla sombra aplicado en un modelo a escala de cámara de ambiente controlado.

## 1.2 Revisión bibliográfica

Los trabajos aquí citados comprenden los estudios obtenidos con base a los tipos de mallas sombra utilizada en la horticultura y la importancia del control de la radiación solar al interior de los sistemas de cámaras de ambiente controlado e invernaderos.

### 1.2.1 Aplicación de mallas sombra

Wener (1999), menciona que en Israel, el pimiento se cultiva en el exterior, bajo invernadero, bajo casa sombra o combinando los tres, pero en climas cálidos y secos se está utilizando la malla sombra cada vez más porque protege la planta (hoja y fruto) de una fuerte radiación solar directa y disminuye las altas temperaturas, eliminando así la quemadura de frutos, además protege contra daños por heladas, viento, arena e insectos, y reduce las amplitudes de temperatura diurnas-nocturnas, teniendo como resultado una planta más vigorosa con un fruto de mayor calidad y mayores rendimientos. Normalmente se trata de una estructura de techo plano de por lo menos tres metros de altura, que puede ser temporal o permanente, que además, no tiene problema de alineación.

Mavi y Tupper (2004) clasifican la manera como las plantas perciben la radiación solar en tres diferentes formas: la intensidad lumínica que es la cantidad de energía radiante por unidad y unidad de tiempo, la calidad de luz que es la distribución espectral de la radiación y las horas luz por día que se refiere al fotoperiodo.

En Israel, Tanny *et al.*, (2008) construyeron invernaderos recubiertos con malla sombra de 2 x 3m. Durante el día (8:00 -16:00 h) la temperatura medida cerca de las plantas fue tres grados superior respecto a la temperatura externa, mientras en la noche el invernadero presentó una temperatura similar a la externa.

Díaz, (2012) presenta el efecto de la radiación en respuesta al rendimiento y calidad en policultivo bajo condiciones de invernadero. El área de estudio se ubica en el Campus Amazcala de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro. El sistema de estudio consta con dos naves de 9 m de ancho por 24 m de largo de estructura metálica cubierta con plástico de polietileno donde se instalaron 3 habitáculos dentro del

invernadero cubiertos con malla sombra de diferentes aperturas de 35%, 50% y 80% de color negro. Además se instalaron 3 sensores de radiación solar, marca Spectrum. El experimento fue llevado a cabo con cuatro niveles diferentes de radiación de 20%, 50%, 65% y 100% de radiación con tres repeticiones. En cuanto al rendimiento y calidad de las plantas se considero la altura, el diámetro, el número de nodos, en donde se hicieron 12 mediciones semanales utilizando un flexómetro. Los resultados de altura y número de nodos muestran que el mayor desarrollo se obtuvo al 65% y 100% de radiación, mientras que el diámetro fue mayor en el tratamiento de 100% de radiación. Por otro lado en el tratamiento al 20 % de radiación todas las variables analizadas fueron menores.

Juárez et al., (2011) encontraron que las mallas sombras también se usan en los invernaderos para disminuir la luminosidad colocadas por encima de la cubierta de plástico con el propósito de proporcionar sombra y disminuir la cantidad de energía luminosa que penetra al interior, en este caso se requiere de una estructura de 30 a 40 cm por encima del plástico. Cuando se coloca debajo de la cubierta de plástico, disminuye la luminosidad pero aumenta la temperatura, ya que la energía retenida se transforma en calor que la malla irradia al interior del invernadero.

Ayala-Tafoya *et al.*, (2012) evaluó la fotoselectividad de mallas: aluminada, gris, perla, azul y roja además de la negra convencional, con 30% de sombra a través de la radiación total que transmitieron. El objetivo del trabajo fue determinar cómo influye la malla sombra sobre la cantidad y calidad de la radiación solar y el efecto de cada malla sobre la temperatura y humedad relativa del aire. La investigación se realizó en el campo experimental de la facultad de agronomía de la universidad autónoma de Sinaloa, con una densidad de 22,200 plantas por hectáreas. El estudio se llevó a cabo bajo el diseño al azar con cuatro repeticiones. Utilizando cuatro camas de 10 m de largo como parcela experimental, las mallas se colocaron 3 m sobre el nivel del suelo antes del trasplante. Se realizaron mediciones del espectro de transmisión de radiación solar, en la banda de 350 a 1050 nm (RT) a intervalos de 1 nm, por medio de un espectrorradiómetro portátil (FieldSpec Pro®VNIR, ASD Inc.). Todas las mediciones fueron realizadas durante condiciones de cielo despejado entre 12:00 y 13:00 h (hora local) a intervalos de 3 min, en

el centro de cada una de las mallas sombra. En el centro del área de influencia de cada una de las mallas se instaló un termohigrómetro USB/Almacenador de datos (Twilight, S.A. de C.V.) programado para registrar temperatura y humedad relativa del aire cada 30 min. Obteniendo como resultado que las mallas de colores alteraron la cantidad y calidad de la radiación solar que captaron las plantas, mientras que la negras son las mejor para bloquear la radiación incidente. Estas no influyen significativamente en la temperatura del aire, pero las cromáticas incrementaron la humedad relativa máxima.

### 1.2.2 Control de mallas sombra

En España, P.F. Martínez, *et al*, (2002) publicaron que el uso de las mallas de sombreo fijo es relativamente difundido en los invernaderos durante la época de máxima radiación solar del año. El empleo de dichas mallas en el interior de un invernadero no disminuye la entrada de energía solar, lo único que se consigue es reducir la tasa de fotosíntesis por disminución de la luz. Además esta malla al interceptar la radiación solar, adsorbe una parte de ella y se convierte en un nuevo radiador de calor hacia el ambiente. Por otro lado, encontraron que el rendimiento de las mallas de sombreo mejoran significativamente si se colocan en el exterior del invernadero sobre la cubierta pues de esta manera se impide realmente la entrada de una parte de la radiación solar. Lo ideal es añadir a todo esto la posibilidad de plegar y desplegar la malla automáticamente en función del nivel de luz que llega a las plantas.

En China, Zhang (2006) colocó mallas negras y plateadas en invernaderos con alturas de 3.5 m y ancho variable entre 6 y 8 m. Al comparar el microclima entre ambas mallas de 9:00 a 16:00, la diferencia en la temperatura del suelo en invernaderos techados fue de 3 – 5 °C y de 2 – 6 °C en el aire.

Leite, (2005) plantea la instalación de una malla negra para disminuir la radiación y bajar la temperatura diurna. Resaltando que al ser un material negro no se logra disminuir mucho la temperatura, pero cuando se coloca dicha malla negra arriba del plástico con una distancia de 40 cm, se crea un diferencial térmico que ayuda más a disminuir la temperatura. El

inconveniente de este sistema además del costo, es que no se puede mover de manera automática y es necesario retirar la malla sombra cuando el nivel de luz es menor que el ideal para las plantas. Para mover la pantalla de manera que se pueda utilizar solamente cuando hay exceso de radiación lo más fácil y menos costoso es emplear un sistema móvil. Así se disminuye la carga térmica radiante y efectivamente se reduce la temperatura de 14% hasta 28% dependiendo de las condiciones del clima local, de la ventilación y del porcentaje de superficie cubierta utilizada.

### 1.2.3 Sistemas de control empleados

Carrillo *et al.*, (2008) propusieron la automatización de un invernadero a través de las variables temperatura y humedad relativa mediante la regulación de dos extractores, calefactor, y del ventilador de la pared húmeda. Para el control del invernadero se utilizó un controlador lógico programable (PLC), sensores de temperatura y humedad, etapas de acondicionamiento de señal y etapas de potencia. El control estuvo a cargo de la lógica difusa ya que puede adoptar distintas categorías para cada una de las variables a controlar, y facilita su programación con respecto al control PID. Como conclusiones obtuvieron un sistema de control de bajo costo y sencillo, logrando un ahorro energético y eficiencia.

Munera, (2012) desarrollo un sistema para el monitoreo y control de las variables climáticas al interior de un invernadero, permitiendo generar condiciones necesarias para el correcto desarrollo del cultivo, controlando la temperatura, la iluminación, el riego automático, la humedad y la ventilación según parámetros definidos por el operario. Fue utilizado un PLC como controlador principal del sistema, integrando los diferentes dispositivos actuadores del sistema y los sensores. Mediante el lenguaje de programación gráfico LabVIEW™ 2011, se monitoreo y superviso de forma remota el sistema de control ambiental. La comunicación entre el PLC (siglas del inglés *Programmable Logic Controller*); y la aplicación se implemento bajo el estándar de comunicación serial RS232. Copyright © 2012 UPB. El sistema de adquisición de datos permite obtener lecturas continuas de las variables climáticas dentro de un invernadero a escala.

Pérez y De Paul (2007) presentan la simulación y control climático en el interior de un invernadero, teniendo como propósito o finalidad hallar un modelo matemático que se ajuste a las condiciones del invernadero. Restringida solo al control y regulación de parámetros interiores de humedad y radiación solar, basado en la apertura y cierre de una ventana superior en el invernadero. Para la obtención del modelo se utilizaron algunos parámetros de acuerdo a la zona geográfica en la que se encuentra el invernadero, posteriormente se llevo como primer aproximación a una ecuación de primer orden con retraso en el tiempo. Aplicando el método Ziegler-Nichols, y una vez obtenido los resultados de la simulación se diseña el control (P, PI, PID) para el sistema propuesto. Concluyendo que el modelo simulado se ajusta y cumple con los parámetros de aproximación a un invernadero real.

González y Calderón, (2008) presentan un sistema de automatización que lleva a cabo el control climático de un invernadero, implementando un sistema de control distribuido basado en un autómata programable (PLC) (siglas del inglés *Programmable Logic Controller*); de la serie SIMATIC S7-300 de Siemens™, conectado a un conjunto de sensores y actuadores a través del bus de campo PROFIBUS y mediante un software de monitorización y control (SCADA) que permite la supervisión del comportamiento del invernadero. Concluyendo que las herramientas de control tanto de comunicación y supervisión satisfacen las exigencias impuestas por el usuario y facilitan el manejo del invernadero.

Morales, (2013) presenta el estudio y desarrollo de la robótica en la agricultura en Holanda. Tales como maquinas que caminen a pie con la mayor apariencia humana de tal manera que puedan emplearse en actividades que necesiten desplazamiento, como la aplicación de productos fitosanitarias y monitoreo de cultivos. Otro proyecto es el desarrollo de un brazo y mano con dos grados de libertad actuados por un solo motor de baja potencia, con sistema de detección y control de fuerza controlado por un sensor pudiendo ser utilizado en la cosecha o clasificación de fruta u hortalizas. También se está desarrollando un tractor para trabajar en la producción de cultivos hortícolas en extensivo, que funcione de manera autónoma y sin dañar los cultivos, mediante la programación de GPS. De igual manera se

desarrolla una maquina que al pasar sobre las hileras de plantación detecte las plantas y malas hierbas por medio de la reflectancia espectral, y aplique el producto para su control por medio de microaspersión o la retirada de manera mecánica. Siendo estos algunos de muchos estudios que pretenden que la robótica pueda llegar a ser una herramienta fundamental para hacer uso eficiente de los recursos empleados, además de los costes de producción y disminución de los contaminantes.

#### **1.2.4 Conclusión de la revisión bibliográfica**

En la revisión bibliografía se encontró la importancia que tiene hoy en día el uso y tipo de mallas sombra como medio de protección para la radiación solar, por otro lado se describe el tipo de instalación en los sistemas a fin, siendo estas: al interior de la estructura, al exterior de misma o bien al exterior elevada a una cierta altura sobre la superficie. Además se encontró que existen diferentes herramientas empleadas para llevar a cabo la automatización y control en sistemas de invernaderos y cámara de ambiente controlado en función de las principales variables climatológicas, permiten la mejora en calidad y cantidad de plantas y frutos; Por lo que podemos concluir que la malla sombra negra es la más utilizada debido al menor costo y mejores resultados con respecto a las demás, también la instalación de la malla al exterior elevada a una altura del plástico envolvente del invernadero resulta ser la más eficiente para el control de la radiación y temperatura al interior. Mientras que en la parte de los sistemas de control la lógica difusa es la técnica de control más utilizada debido a su sencillez de implementación y a la eficiencia en cuanto a su aplicación a la hora de programar en las distintos hardware.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo general.**

Implementar un sistema de control para el posicionamiento de una malla sombra en la parte superior de un modelo a escala de cámara de ambiente controlado, de tal manera que se despliegue y pliegue en función de la radiación solar al interior.

### 1.3.2 Objetivos particulares.

- Construir un sistema estructural mecánico tipo guía para plegar y desplegar la malla sombra en el modelo a escala de cámara de ambiente controlado.
- Establecer una estrategia de control que permita el posicionamiento de la malla sombra de forma sencilla y eficiente de acuerdo a las condiciones de operación del modelo a escala.
- Realizar pruebas de funcionalidad y eficiencia operativa del sistema de control implementado.
- Instrumentar el modelo a escala a través de los sensores de temperatura y humedad, así como los interruptores electromecánicos.
- Adaptar los motores a los ejes de la malla sombra a través de engranes con una relación 1:1.
- Instrumentar la estación meteorológica de la Universidad del Papaloapan para poder enviar la señal censada al sistema NI cRIO 9014.

### 1.4 Estructura de la tesis

En el capítulo 1 se presentan las generalidades y la revisión bibliográfica acerca del tema de estudio, así como un breve resumen de la información citada, concluyendo con los objetivos de este trabajo. En el capítulo 2 se presentan los modelos para la implementación de control en una malla sombra, los modelos descritos son: modelo físico, modelo de control y por último el modelo de experimental. En el capítulo 3 se presenta la construcción e instrumentación de la cámara de ambiente controlado, además de la metodología para el control de la radiación solar, para finalizar con la calibración y puesta a punto del equipo experimental. En el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos de las diferentes pruebas realizadas. En el capítulo 5 se dan a conocer las conclusiones así como las recomendaciones a trabajos futuros.

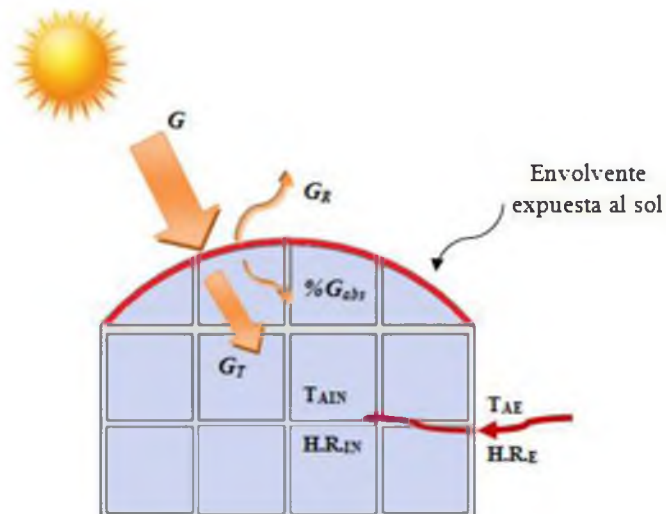
# Capítulo 2

## Modelos de Estudio.

En este capítulo se presenta el Modelo Físico, el Modelo de Control y el Modelo Experimental para la implementación de un control en el posicionamiento de una malla sombra en una cámara de ambiente controlado a escala como función de la radiación solar. En el modelo físico se describe el efecto de la radiación solar al interior de una cámara de ambiente controlado. En el modelo de control se describen las estrategias para controlar la radiación solar al interior de la CACO (cámara de ambiente controlado) con respecto a un valor de referencia, y en el modelo experimental se describe una metodología que permite implementar el control en el modelo a escala de cámara de ambiente controlado.

**2.1 Modelo físico**

En la Figura 2.1 se presenta el modelo físico de la cámara de ambiente controlado a escala. Como se observa, parte de la componente de la envolvente que se expone directamente al sol es translúcida y el resto de la envolvente está expuesta a las condiciones ambientales como son la temperatura del aire ambiente  $T_{AE}$  y la humedad relativa al exterior  $H.R.E$ . En la Figura 2.1, también se muestra que cuando incide la radiación solar  $G$  sobre la componente translúcida, parte de esta energía se refleja al medio ambiente  $G_R$ , otra parte se transmite hacia el interior de la cámara debido a las propiedades ópticas de la superficie translúcida  $G_T$ , y el resto de la radiación se absorbe en la misma componente  $G_{abs}$ , donde cierto porcentaje de esta misma radiación absorbida se transfiere hacia el interior de la CACO  $\%G_{abs}$ . Por lo que la energía solar transmitida y un porcentaje de la energía absorbida incrementan la energía térmica en forma de calor al interior, provocando un aumento en la temperatura del aire  $T_{IN}$  y un descenso en la humedad relativa  $HR_{IN}$ . Por otra parte, también en la Figura 2.1 se muestra que existe otro incremento de energía térmica debido a la diferencia de temperaturas entre el aire interior y exterior de la edificación  $Q_{CIN}$ .

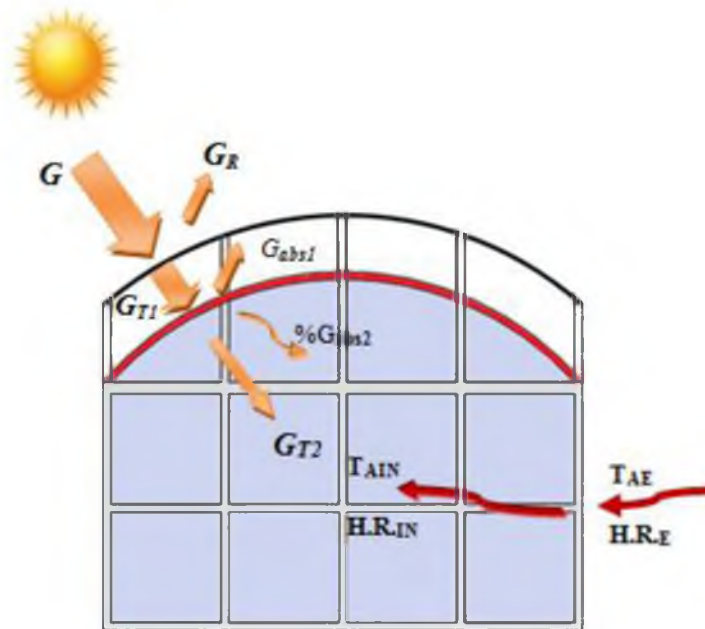


**Figura 2.1:** Modelo físico de la cámara de ambiente controlado sin malla sombra.

Por lo que la energía total que pasa a través de la componente y que entra al interior de la cámara está dada por la contribución solar ( $G_T + \%G_{abs}$ ) y por la contribución debida a la

diferencia de temperaturas del aire en cada lado de la componente  $Q_{CIN}$ . De las dos formas de energía, la contribución por energía solar es la que mayormente influye al incremento de la energía total del sistema. Sin embargo, debido a que el propósito de esta cámara de ambiente controlado es la de optimizar el crecimiento tanto de algún fruto o semilla en específico, para ambas necesidades se requieren de la energía solar debido a su fotoperiodo, por tal razón la radiación no puede ser eliminada por completo, sino que se debe de controlar el paso de ésta a través de un medio activo.

En la Figura 2.2 se presenta el modelo físico de la cámara de ambiente controlado a escala donde se implementa el uso de una malla sombra en la parte superior de la envoltente traslúcida como elemento activo. Como se observa en la Figura, ahora la radiación solar llega primeramente a la malla sombra y debido a sus propiedades ópticas de transmisividad, reflectividad y absostancia, la energía solar se atenuara en cierto porcentaje.



**Figura 2.2:** Modelo de cámara de ambiente controlado con cubierta malla sombra.

De igual manera, en la Figura 2.2 se observa que al incidir la radiación solar  $G$  sobre la malla sombra, parte de esta es transmitida  $G_{T1}$ , un porcentaje es absorbida por la misma malla sombra  $G_{abs1}$ , mientras que el resto de la energía es reflejado hacia el exterior  $G_R$ . De

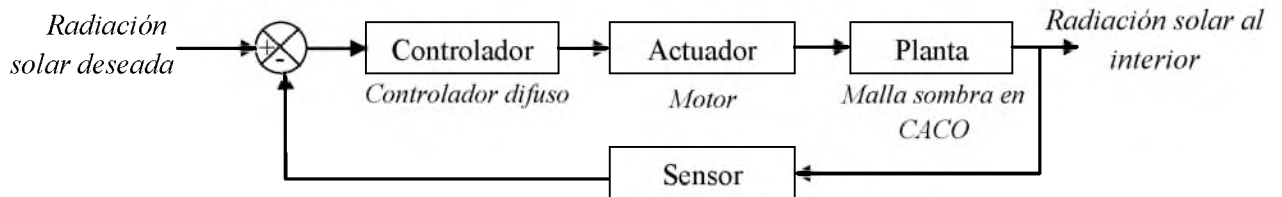
la radiación solar  $G_{T1}$  que se transmitió a través de la malla sombra, parte se retransmite  $G_{T2}$  hacia el interior de la CACO debido a las propiedades ópticas de la superficie traslucida del plástico, otra parte se refleja al medio ambiente  $G_{R2}$ , mientras que el resto es absorbida en la misma componente  $G_{abs2}$  y al mismo tiempo se retransmite un porcentaje  $\%G_{abs2}$  al interior de la CACO. Por lo que ahora la contribución de energía solar al interior del caco con malla sombra está constituida por la  $G_{T2}$  y él  $\%G_{abs2}$ .

De las dos contribuciones de energías solar, la energía solar  $G_{T2}$  es la que más contribuye al incremento de energía térmica en el interior de la CACO, por lo que controlar el paso de esta, por medio del posicionamiento activo de la malla sombra permitirá optimizar los niveles de radiación solar en valores deseados por una referencia o por una necesidad del fruto o semilla en la cual se busca optimizar su crecimiento y desarrollo.

## 2.2 Modelo de control.

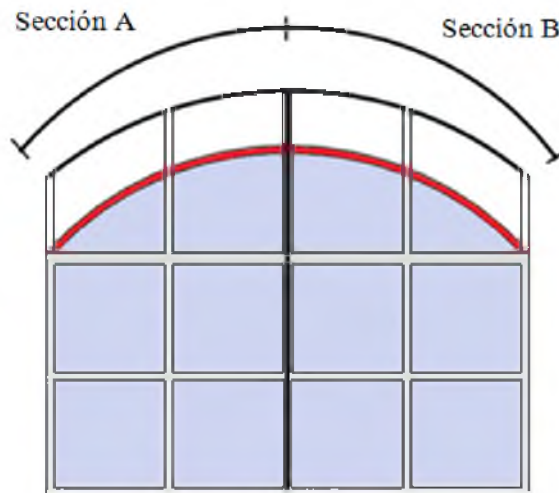
En virtud de que a lo largo del año y además durante el transcurso de cada día; la radiación solar presenta niveles máximos y mínimos, esta es considerada como una variable meteorológica intermitente lo cual puede afectar el rendimiento para ciertos cultivos, tal como el caso del tomate que necesita una radiación solar promedio de  $191 \text{ W/m}^2$  para obtener mejores rendimiento en cuanto a crecimiento y producción (Ayala *et al.*, 2011). En este caso, el no utilizar un sistema malla sombra permitiría que la radiación solar promedio que recibiría dicho cultivo sea excesiva en la mayor parte del tiempo, mientras que al emplear un malla sombra de manera estática permitiría que la radiación solar promedio sea mínima. En ambas situaciones resulta que la calidad tanto de la planta como del fruto no es la deseable. Es por ello que para ayudar a lograr una mejor optimización en la producción de alguna planta o fruto lo recomendable sería utilizar un sistema malla sombra móvil el cual se despliegue cuando el nivel de radiación solar este por debajo de la referencia deseada, mientras que se pliegue cuando el nivel de radiación solar sea mayor a lo recomendado por la referencia. Por lo que es necesario implementar un control que permita mantener lo más cercano a la radiación solar dentro del valor referencia deseada de acuerdo a cada cultivo.

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, en la Figura 2.3 se presenta el diagrama a bloques de un control propuesto para este tipo de trabajo, donde el controlador está basado en la lógica difusa, mientras que los actuadores encargados de plegar y desplegar la malla sombra serán los moto reductores de CD (siglas del inglés *Direct Current*), la parte de los sensores corresponderá a los Piranómetro y los interruptores electromecánicos (LS). Finalmente la planta corresponderá a la Cámara de ambiente controlado (CACO) sobre la cual se instalaran los actuadores y sensores para llevar a cabo la estrategia de control.



**Figura 2.3:** Diagrama a bloques del sistema de control.

Con la implementación del sistema de control propuesto en la Figura 2.3 se lograría posicionar de manera gradual y automática una malla sombra; por lo que en este trabajo de tesis se implemento este sistema de control para el posicionamiento de una malla sombra en un modelo a escala de una cámara de ambiente controlado. Esta implementación se caracteriza por dividir en dos secciones A y B a dicha cámara (ver Figura 2.4) utilizando control de forma independiente respectivamente.



**Figura 2.4:** Secciones definidas en la CACO.

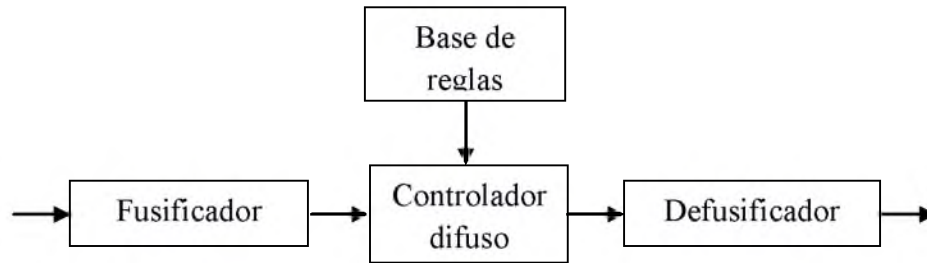
Este sistema de control propuesto funciona de la siguiente forma: cuando la radiación solar  $G_{T2}$  se mida por medio de un sensor de radiación solar, esta se comparara con un valor de referencia  $G_{RF}$ , y a partir de la diferencia entre el valor medido  $G_{T2}$  y el valor deseado  $G_{RF}$ , se aplicara un control para el pliegue y despliegue gradual de la malla sombra en intervalos de tiempo en los cuales no se cumpla la condición principal en la sección  $A$  o  $B$  de la cámara.

Para lograr lo anteriormente expuesto, existen diversos tipos de esquemas de control que se utilizan para el posicionamiento de algún elemento mecánico ya sea de manera simple a través de controles básicos tales como ON/OFF y lógica difusa o bien a través de sistemas más complejos con una mayor precisión, tales como compensadores en adelanto, atraso o control PID. Siendo el ON/OFF y lógica difusa los más empleados, de acuerdo a la simplicidad que estos presentan y debido a que se adaptan más al mundo en el que vivimos es decir un mundo de decisiones. Además de que la lógica difusa busca dar una respuesta a los problemas donde la toma de decisiones es más parecida a la forma del razonamiento de los seres humanos. No obstante, de acuerdo a la simplicidad que la lógica difusa ofrece con respecto a los demás controles, otra ventaja es cuando se utilizan motores con moto reductor ya que al des energizar dichos motores, estos ofrecen un gran torque y un auto frenado cuando se llega a la posición deseada, además de que permiten una respuesta lineal a la salida, por lo que difícilmente se observaran sobre impulsos. Es por ello que para el control de la radiación solar haremos uso de la lógica difusa como herramienta de control y de motores de CD con motoreductor como elementos activos de control.

### 2.2.1 Controlador Difuso

Un controlador difuso utiliza leyes de control consistentes en reglas lógicas IF...THEN en conjunto con funciones de pertenencia difusas para controlar un proceso y minimizar el error. Un controlador difuso es básicamente una lógica multievaluada que permite valores intermedios para poder definir evaluaciones convencionales como sí/no, verdadero/falso, negro/blanco, etc. Las nociones como "más bien caliente" o "poco frío" pueden formularse matemáticamente y ser procesados por computadoras. Dicha lógica se compone de cuatro

elementos; el fusificador, el defusificador, el control difuso y la base de reglas (ver Figura 2.5).



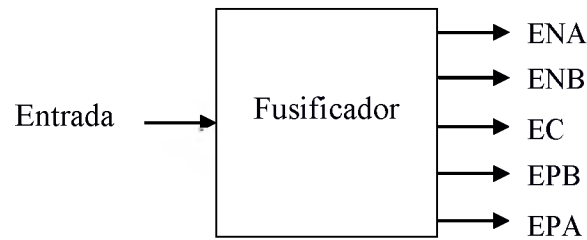
**Figura 2.5:** Diagrama a bloques de controlador difuso.

De la Figura 2.5, la parte más importante consiste en el controlador difuso el cual es un conjunto de reglas, que reflejan la base de conocimiento y la estructura al razonamiento a la solución del problema. Una regla difusa típica puede estar compuesto como:

IF A es A1 AND B es B1 OR C es C1 THEN U es U1

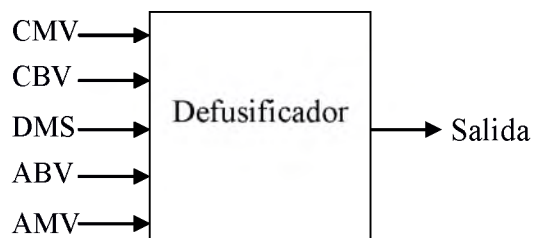
*Base de reglas:* es el bloque encargado de proporcionar la información necesaria para el funcionamiento del modulo de fuzzificación de defuzzificación y define la semántica de cada variable lingüística. Se interpreta la lista de reglas en la base de reglas como "Si premisa-1 a continuación, consecuente-1" o "Si premisa-2 a continuación, consecuente-2", o así sucesivamente).

*Fusificador:* es el proceso de asignar valores de membrecía o pertenencia a un valor numérico de entrada para cada una de las etiquetas difusas que forman la variable lingüística. Por ejemplo, la variable lingüística “control de la posición de la malla sombra en el modelo a escala de CACO” puede tomar lo valores de error de acuerdo a la entrada, (ver Figura 2.6) tales como “Error negativo alto”, “Error negativo bajo”, “Error cero”, “Error positivo baja” y “Error positivo alto”; para el caso de estudio la entrada al fusificador es un valor de radiación solar preciso, y la salida estará formada por los valores de verdad de cada una de las etiquetas mencionadas.



**Figura 2.6:** Proceso de fusificación.

*Defusificador:* Como la entrada del proceso de defuzzificación es un conjunto difuso ver Figura 2.7, este se encarga que salida sea un número real simple, es decir, convierte la salida difusa en un valor nítido [1].



**Figura 2.7:** Proceso de defusificación.

Para la implementación del controlador difuso se establecieron las siguientes variables lingüísticas en función al error obtenido de acuerdo a la radiación solar a la entrada.

Si el error es:

**ENA: Error negativo alto**      **ENB: Error negativo bajo**

**EC: Error en cero**

**EPA: Error positivo alto**      **EPB: Error positivo bajo**

Posteriormente en función al error, la salida de control propuestas para la CACO son las siguientes:

**CMV: Cerrar a mediana velocidad**      **CBV: Cerrar a baja velocidad**

**DMS: Detener malla sombra**

**AMV: Abrir a mediana velocidad** **ABV: Abrir a baja velocidad**

Reglas de control:

**Si el error es ENA entonces el control es CMV**

**Si el error es ENB entonces el control es CBV**

**Si el error es EC entonces el control es DMS**

**Si el error es EPA entonces el control es AMV**

**Si el error es EPB entonces el control es ABV**

### **2.3 Modelo experimental**

En esta sección se describe como se realizará la toma de decisiones para implementar el control de la posición de una malla sombra con el fin de mantener el nivel de la radiación solar global al interior de la CACO.

Con base a la radiación solar deseada, de acuerdo al espécimen de estudio y a la radiación global censada, el experimento tendrá un monitoreo cada segundo a través del sensor de radiación solar global y el sistema de adquisición de datos, después se realizará un promedio cada 4 segundos de la variable radiación solar para que posteriormente a través de un programa de lógica difusa se evalúe si el error se encuentra dentro de los valores de **ENA, ENB, EC, EPA o EPB.**

Al tomar una decisión de las cinco posibles, el programa activará una señal digital del adquisitor de datos, la cual será recibida en otra tarjeta de control que también será programada para que al recibir una de las cinco señales digitales, esta canalice la señal hacia un puerto de salida digital y convierta el pulso digital en una forma de control para el arranque a una cierta velocidad o para el paro de un motor de CD, ya que este motor actuará como elemento activo para plegar o desplegar la malla sombra. Al tomar una decisión, dependerá si la malla sombra se plegara a velocidad baja, media, o no se plegara, y también si esta se desplegara a velocidad baja, media o no se desplegara.

En el caso extremo en ausencia de radiación solar o con excesiva radiación solar y el motor de CD ya no deba plegarse o desplegarse la malla sombra según sea el caso, entonces se enviará una señal digital a través de interruptores electromecánico que desactivaran los motores de CD en caso de llegar al límite de la operatividad de la malla. Estos pulsos digitales los adquirirá la segunda tarjeta para que internamente con su programación desactivara los motores de CD, aun cuando la señal de control digital del primer sistema de adquisición de datos, indique lo contrario. Todo el sistema de control propuesto se ejecutara en tiempo real y durante el tiempo que opere dicho sistema no importara si es de día, de noche o cualquier día del año.

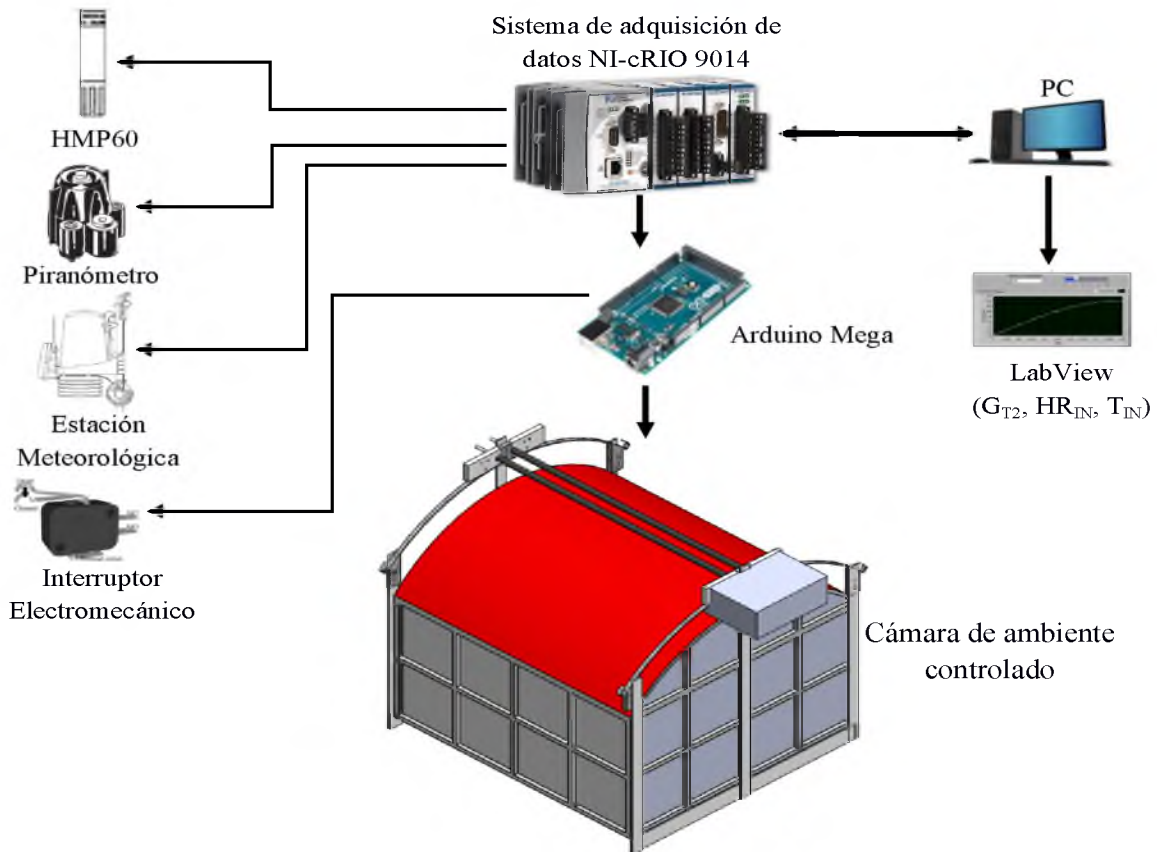
# Capítulo 3

## Equipo experimental

En este capítulo se presenta el diseño del experimento, la construcción de la estructura móvil para la implementación de la malla sombra en el modelo a escala, así como la instrumentación e instalación de actuadores y sensores. También, se presenta la calibración y puesta en operación del sistema de control propuesto.

### 3.1 Diseño del experimento

En la Figura 3.1 se muestra el sistema de adquisición y control para el posicionamiento de una malla sombra en el modelo a escala de CACO, donde al centro en la parte inferior de la figura se presenta la CACO, en la parte izquierda se presentan los sensores de temperatura, así como también los sensores de radiación solar (QMS101 ( $G_{T1}$ ) y KIPP & ZONEN ( $G_{T2}$ )), de igual manera se muestra la estación meteorológica, y finalmente los interruptores electromecánicos (LS), instalados al principio y final sobre las guías de la malla sombra; mientras que en la parte central superior se presenta el sistema de adquisición de datos, y la tarjeta controladora, posteriormente a la izquierda se presenta una PC donde se visualizara toda la información de las variables medidas experimentalmente a través del software LabVIEW™.

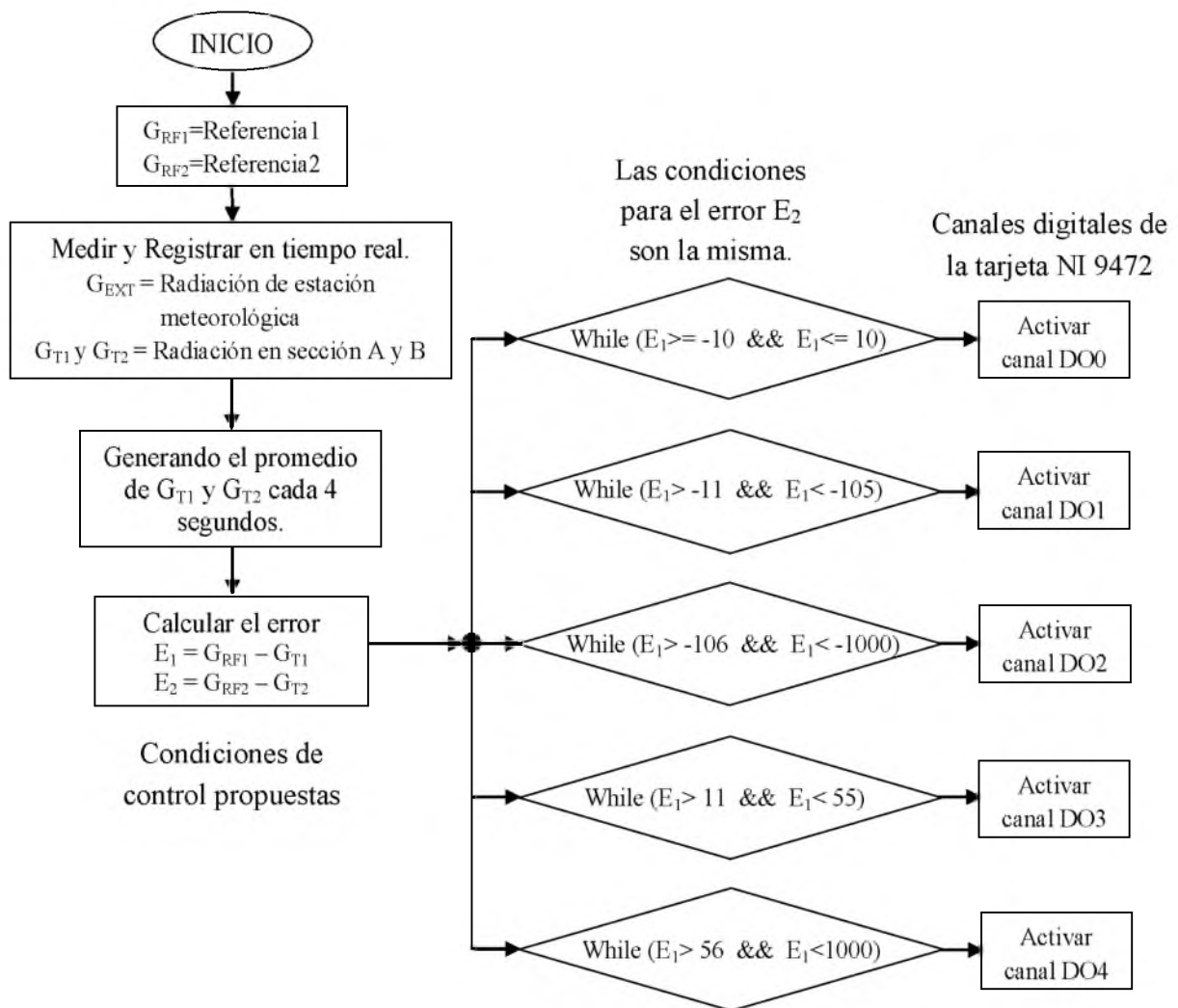


**Figura 3.1:** Equipo experimental.

Como se definió en el capítulo II, el control de la malla sombra se realizará en dos secciones de la CACO definidas como sección A y la sección B.

Para realizar el control de la posición de la malla sombra sobre la sección A o B, primeramente se construyo un sistema mecánico que permite colocar la malla sombra en la parte superior de la CACO y además un sistema guía que dirige la malla para que se plegara o se desplegara de acuerdo a las órdenes de control.

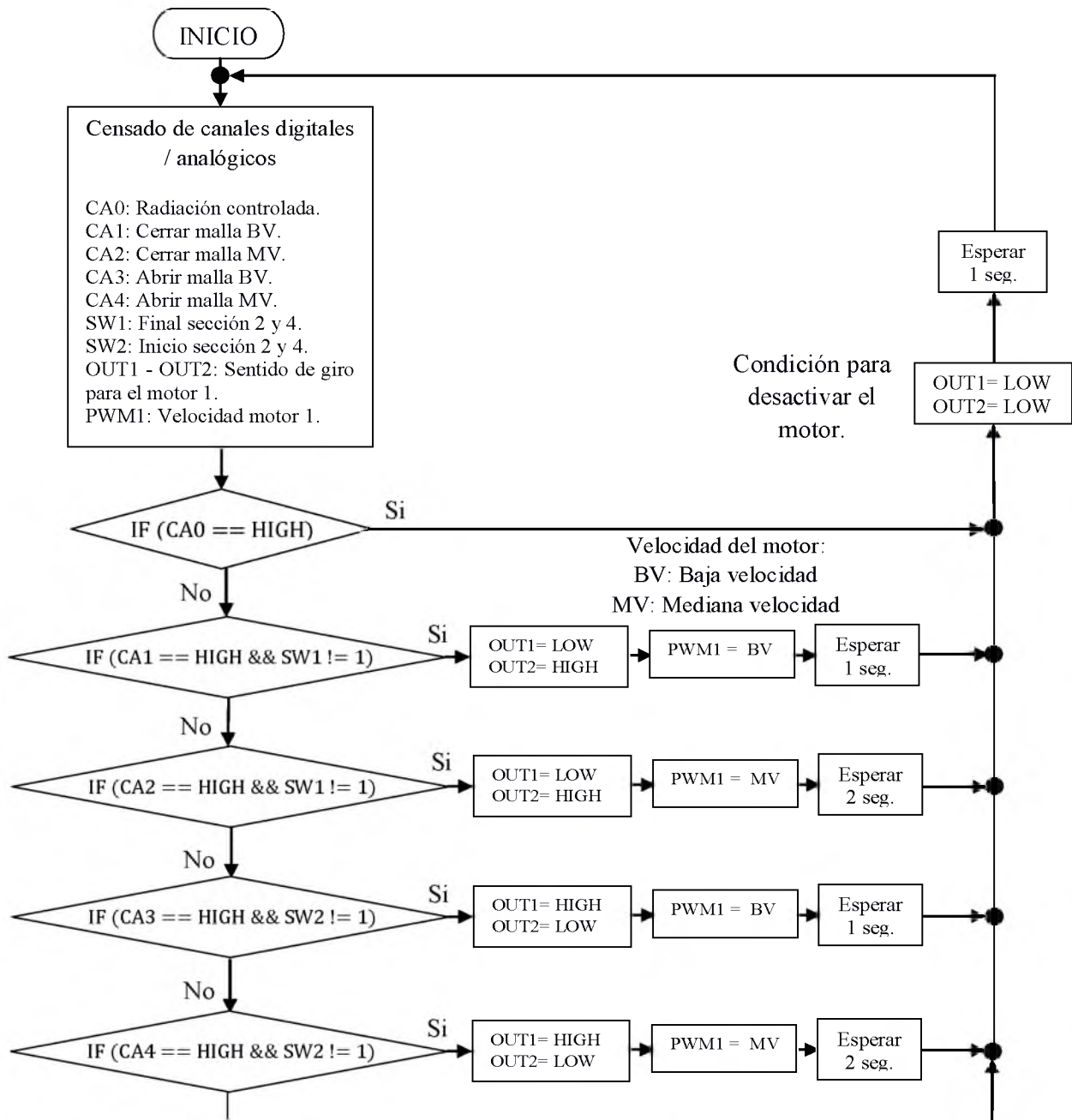
En la Figura 3.2 se muestra la metodología de control implementada para posicionar la malla sombra en la cámara de ambiente controlado.



**Figura 3.2:** Metodología para medir y registrar la  $G_{EXT}$ ,  $G_{T1}$ ,  $G_{T2}$  y la activación de canales digitales en la tarjeta NI 9472.

La Figura 3.2 muestra el diagrama de flujo propuesto para el control de la malla sombra en la cámara de ambiente controlado. El diagrama inicia al establecer las condiciones de radiación solar aceptable para cada sección de la CACO. Posteriormente el sistema de adquisición (NI cRIO 9014) iniciará un programa en la plataforma LabVIEW™ para adquirir la radiación solar cada segundo y también calcular el promedio de esta en cada cuatro segundos, así como también el error (Ver Apéndice A).

Posteriormente se compara al termino de dos segundos si el error esta dentro de los intervalos permisibles. Estos intervalos son (Error  $\pm 10\%$ , Error  $-11\%$  a  $-105\%$ , Error  $106\%$  a  $1000\%$  y Error  $11\%$  a  $55\%$ , Error  $56\%$  a  $1000\%$ ), Si alguna de las condiciones anteriores se cumple se activará un canal digital (DO0 a DO4) del modulo NI 9472, dicho canal permanecerá activo hasta después de 4 segundo y se ejecute nuevamente la comparación, la señal digital de salida será recibida por otra tarjeta llamada Arduino mega 2560, en dicha tarjeta se auto ejecuta otro programa con el cual se controla la velocidad de los motores de CD. En la Figura 3.3 se muestra la metodología para controlar la velocidad de los motores de CD (ver Apéndice A).



**Figura 3.3:** Metodología para el control de la  $G_{T2}$  al interior de la CACO a través de Arduino mega y NI cRIO 9014.

La metodología que se presenta en la Figura 3.3 muestra que el diagrama inicia al censar todas las variables especificadas tales como: los interruptores electromecánicos (SW1 ó SW2), los canales analógicos para cada señal proveniente del NI cRIO-9014 a través del modulo NI 9472 (CA0-CA4), y las salidas para el control de motores (OUT1 ó OUT2). Una vez censado dichos canales digitales y analógicos. Se comparan uno a uno en el orden

establecido a través de la condición IF, en caso que la condiciones (IF (CA1 ó CA2 ó CA3 ó CA4) == HIGH) y además la condición (SW1!=1 ó SW2!=1) también se cumpla se activan las salidas digitales para el control y velocidad del motor ya sea para plegar o desplegar la malla sombra a baja o mediana velocidad. Después de cada ciclo IF, se ejecuta un temporizador de 1 segundo y se repite la secuencia de los pasos establecidos. En el caso de que solo la condición IF (CA0 == HIGH) se cumpla significa que el error es cero o está dentro del intervalo del error establecido ( $\pm 10W/m^2$ ) por lo que se mantienen los motores apagados y se espera un tiempo de 1 segundo, y se repiten las instrucciones.

### **3.2 Construcción del sistema de apertura y cierre de malla sombra**

Como punto de partida para la construcción de la estructura móvil, se determino cual era la necesidad principal de acuerdo con el modelo a escala con que se cuenta para las pruebas en condiciones al exterior. Por lo que se propusieron los siguientes puntos.

- Construcción de una estructura para el soporte de todo el sistema a desarrollar.
- Construcción de una base que sopórtelos ejes y motores.
- Controlar en dos secciones la radiación solar al interior del modelo a escala.
- La implementación de un eje en el cual se enrollara la malla sombra.
- El desplazamiento de la malla por contrapeso.

De las referencias bibliográficas citadas al inicio de este trabajo se obtuvo información donde se sugiere que la instalación de la malla sombra se realice considerando una altura de aproximadamente de 30 a 40 cm, con respecto a la superficie envolvente del techado de un invernadero real. Todo esto con la finalidad de aumentar la transferencia de calor entre la malla sombra y la envolvente del techo. Por lo que en este trabajo se propuso la implementación de guías para mantener la altura recomendad de acuerdo a la proporción de la escala indicada en un modelo real.

### 3.2.1 Construcción de la estructura

Debido a que el modelo a escala con que se cuenta está construido en su mayoría por madera, era necesario construir una estructura extra que permitiera la implementación y adaptación de los motores, los ejes que sostienen la malla, las guías, etc.

La estructura está constituida por 5 piezas, todas manufacturadas en solera de 1 y 1/2 pulgada con dimensiones de acuerdo a las necesidades requeridas y a las recomendaciones citadas, todas ranuradas de tal manera que permitan la instalación y desinstalación fácilmente a través de tornillos.

Dichas piezas están constituidas por la base principal la cual está manufacturada de solera de 1/2 pulgada, perforada en ambos extremos para poderla sujetar de la base del modelo a escala, de igual forma esta perforada en el centro para poder sujetar la barra central. Posteriormente se tienen las barras laterales construidas en solera de 1 pulgada con una longitud de 40 cm, perforada en ambos extremos para sujetarse de un lado por la base de la cámara y por el otro extremo de la barra horizontal, además de sostener las guías para el deslizamiento de la malla sombra.

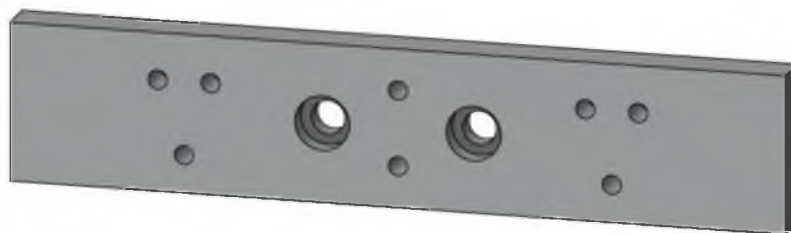
También se manufacturo en solera de 1 pulgada la barra central con una longitud de 60cm, perforada en ambos extremos para poder sujetarse de la barra base y en el centro por la barra horizontal, mientras que por el extremo superior se atornillara la base donde se sujetaran los motores, ejes y guías. Una vez ensamblada todas las piezas en el modelo a escala de cámara de ambiente controlado, esta queda de la siguiente manera tal como se muestra en la Figura 3.4.



**Figura 3.4:** Estructura extra ensamblada en el modelo a escala.

### **3.2.2 Construcción de la base para adaptación de rodamientos y motores.**

Como parte de la estructura para el pliegue y despliegue de la malla sombra, se construyó una base para la adaptación de rodamientos (ver Figura 3.5) de tal manera que permita el movimiento angular de los ejes. Reduciendo de esta manera la fricción de los ejes móviles. Además en dicha base se instalarán los motores, los cuales serán los encargados de proporcionar por medio de engranes el torque necesario para controlar la posición deseada en función de la radiación al interior.



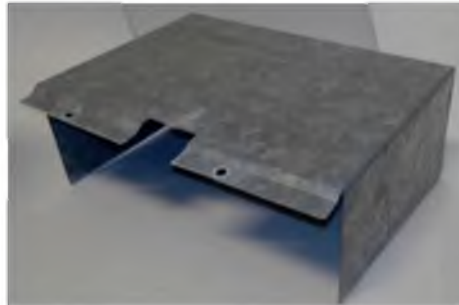
**Figura 3.5:** Base para soporte de motores y rodamientos.

La base propuesta de manera experimental será manufacturada en madera ya que se puede, trabajar de forma más fácil y con herramientas más accesibles. Mientras que los rodamientos a utilizar serán los del tipo 696ZZ (ver Figura 3.6).



**Figura 3.6:** Rodamientos a utilizar.

Adicionalmente a la construcción de la base, se construyó de lámina galvanizada una cubierta para la protección de los motores y engranes, contra el agua y rayos solares. Dicha cubierta fue perforada para poder sujetarse a través de tornillos a la base que sostiene los motores y rodamientos (ver Figura 3.7).



**Figura 3.7:** Cubierta para la protección de motores y engranes.

### 3.2.3 Instalación de la malla en el sistema móvil

La instalación de la malla sombra se llevo a cabo mediante la implementación de una varilla redonda de  $\frac{1}{2}$  pulgada, como se muestra en la Figura 3.8.

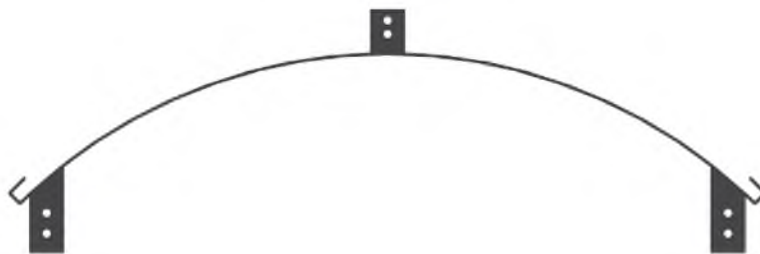


**Figura 3.8:** Eje propuesto para la implementación de malla sombra.

La longitud de 60 y 50 mm se desbastaron a 0.6 mm de acuerdo al diámetro interno del rodamiento a utilizar. Los 635 mm se dividieron en 7 secciones sobre las cuales se hicieron las perforaciones, posteriormente se cortó un tramo de lámina delgada de 2x63 cm de ancho y largo respectivamente, la cual se perforo de la misma forma que la varilla. Una vez maquinadas las dos piezas, estas se unieron con la malla sombra y se ajustaron con tornillos, de tal manera que al girar la varilla se enrollara la malla sombra de manera uniforme.

### 3.2.4 Construcción de las guías.

La construcción de las guías se realizo a base de lámina galvanizada. Se cortaron rectángulos de 67 cm de largo por 2 de ancho, posteriormente se construyeron los soportes que sostendrían las guías y al mismo tiempo permitirían que se desplegara la malla sombra de acuerdo a la forma del techo de la CACO a la altura recomendada, ver Figura 3.9. Dichos soportes fueron unidos mediante soldadura, remachados y perforados para poder sujetarse a la estructura adicional construida.

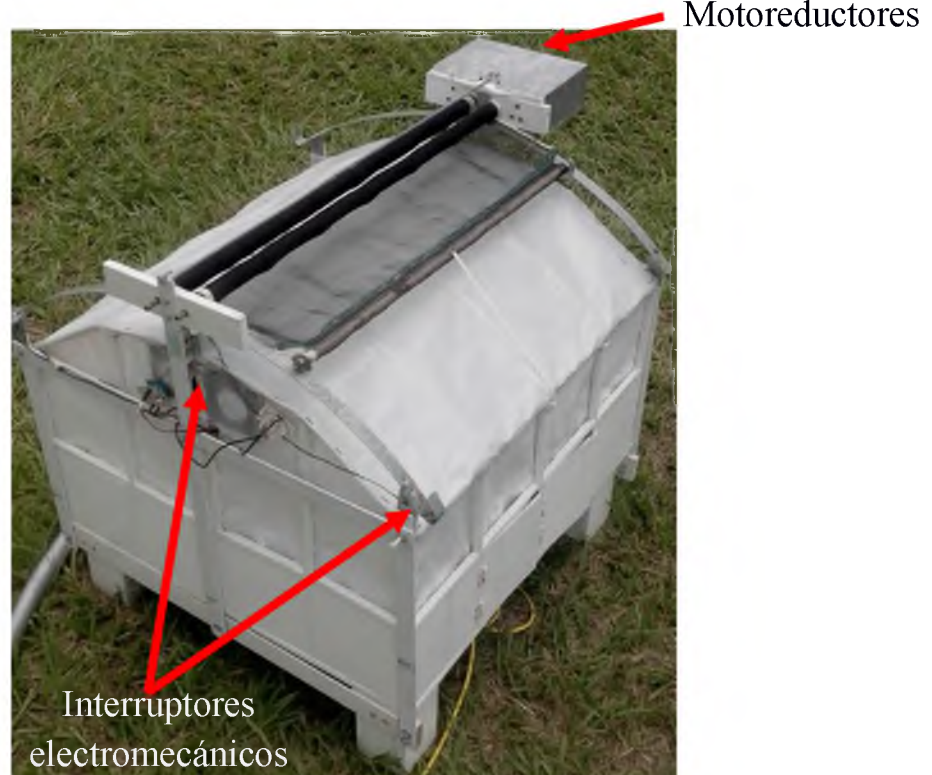


**Figura 3.9:** Construcción final de la guía para el desplazamiento de la malla sombra.

### 3.2.5 Construcción del eje para contrapeso.

Con la finalidad de que la malla sombra se plegara y desplegara uniformemente por las guías con forme el motor gire, se utilizo como contrapeso una varilla redonda de ½ pulgada, desbastada a 0.6 mm en cada extremo para la instalación de rodamientos, de tal manera que permita el libre deslizamiento.

Una vez terminada la construcción de todas las piezas anteriormente mencionadas se procedió a instalarlas en el modelo a escala, y el resultado final es lo que se muestra en la Figura 3.10.



**Figura 3.10:** Ensamble final de la estructura en el modelo a escala de CACO.

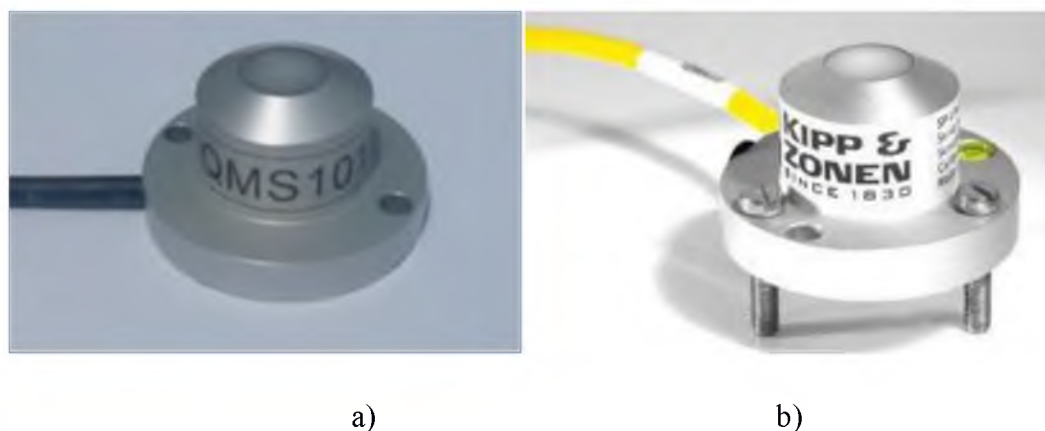
### 3.3 Instrumentación del equipo experimental.

En esta sección se presenta la instrumentación que se implementó en el modelo a escala de cámara de ambiente controlado. La instrumentación comprende la instalación de dos piranómetros al interior de la CACO, un tercer piranómetro de la estación meteorológica con la finalidad de monitorear la radiación solar al medio ambiente para poder comparar la radiación solar al interior del sistema con respecto a la exterior, además de la instalación de los actuadores mecánicos como son motores de CD con moto-reductor e interruptores electromecánicos. Adicionalmente se presenta la implementación de sensores de temperatura y humedad relativa al interior de la CACO. También se utilizó un sistema de adquisición y monitoreo de las variables anteriormente mencionadas (radiación solar,

temperatura y humedad relativa), una tarjeta de control y una tarjeta para la etapa de potencia.

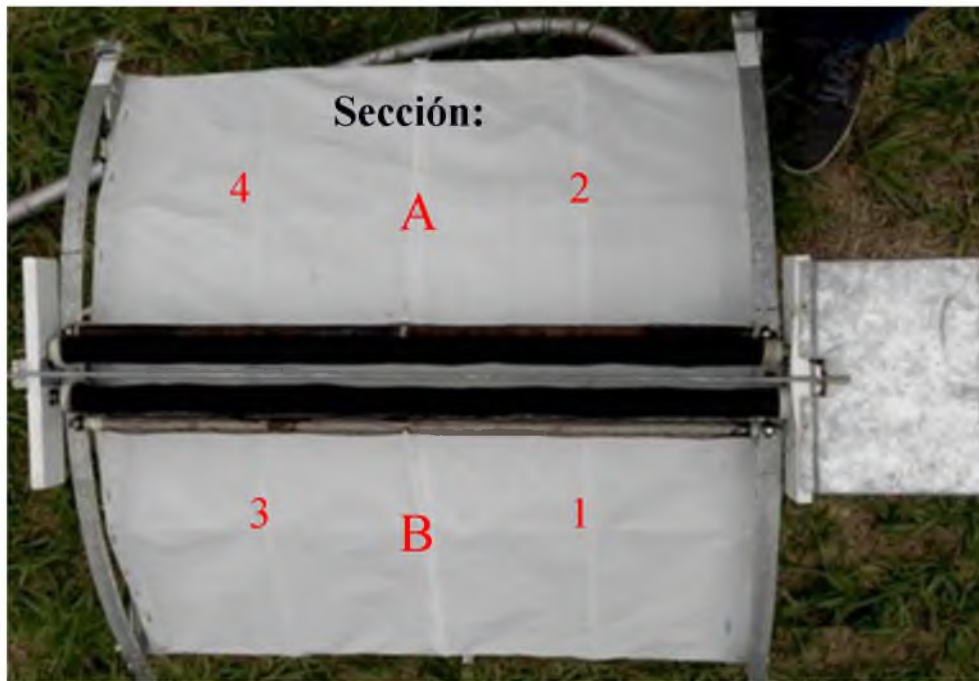
### 3.3.1 Implementación de piranómetro.

La importancia de la implementación del sensor piranómetro, es la de conocer los niveles de radiación solar al interior del modelo a escala, así como el monitoreo y control de la misma variables a través del posicionamiento de la malla sombra, todo ello estará a cargo del piranómetro modelo QMS101 y el KIPP and ZONEN (ver Figura 3.11).



**Figura 3.11:** Piranómetro de radiación solar global a) QMS101 b) KIPP & ZONEN.

Dichos piranómetro tiene una sensibilidad de  $60 \mu\text{V}/\text{W}/\text{m}^2$ , un tiempo de respuesta menor a 500ns fue instalado en el centro de una de las dos secciones de cada extremo tal como se muestra en la Figura 3.12. De tal manera que permita monitorear y controlar la incidencia de la radiación en las dos secciones por separado (sección 1 y 3 VS sección 2 y 4).



**Figura 3.12:** Vista superior de la CACO con las secciones definidas.

### 3.3.2 Estación meteorológica.

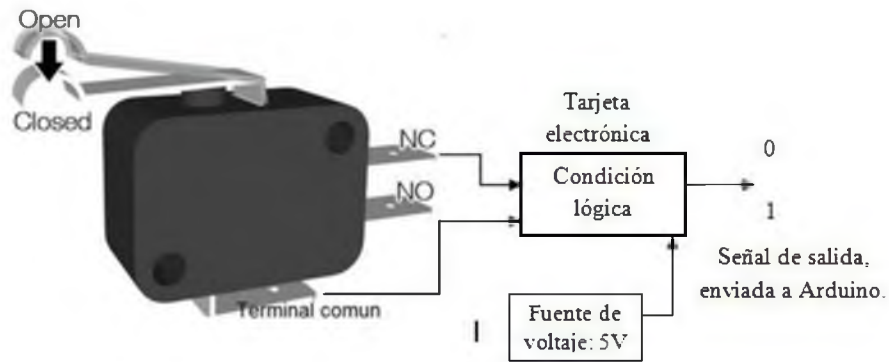
La variable radiación solar al exterior se monitorea utilizando el piranómetro de la estación meteorológica de la UNPA campus Loma Bonita (ver Figura 3.13). Para ello se tuvo que acondicionar dicha estación meteorológica, debido a que presenta daños en la tarjeta de comunicación, y por otro lado la señal proveniente del piranómetro era necesario enviarla al sistema de adquisición de datos NI cRIO-9014 para poder monitorear todas las señales a través del software LabVIEW™.



**Figura 3.13:** Estación meteorológica de la Universidad del Papaloapan.

### **3.3.3 Implementación de interruptor electromecánico.**

El inicio y fin del pliegue y despliegue de la malla sombra estará a cargo de los interruptores electromagnético en la condición normalmente abierto. Estos interruptores fueron colocados en ambos extremos de cada sección de la guía que dirige el contrapeso de la malla sombra, de tal manera que no permitan que el motor gire cuando la malla está completamente recogida o de igual manera cuando esté totalmente extendida a pesar de que la radiación solar al interior de la CACO no sea la deseada. Para ello se desarrollo una tarjeta electrónica que proporcione una señal de 0V, cuando este el interruptor se encuentre en el modo abierto, mientras que cuando pase al estado cerrado la señal sea de 5V (ver Figura 3.14).



**Figura 3.14:** Representación del funcionamiento del interruptor electromecánico.

### 3.3.4 Sensores de temperatura y humedad relativa.

Como trabajo adicional, se instaló en el centro de cada sección de la CACO un sensor HMP60 (ver Figura 3.15) para poder medir y monitorear el comportamiento de la temperatura y humedad relativa, de acuerdo al experimento que se llevo a cabo, tal como CACO con o sin malla sombra y CACO con malla sombra controlada. Dicho sensor tienen un rango de medición de  $-40$  a  $+60^{\circ}\text{C}$  con un error de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ . Mientras que en la humedad relativa el rango de medida está de 0 a 100 %HR con un error de  $\pm 3\% \text{HR}$ .



**Figura 3.15:** Sensor de temperatura HMP60.

### 3.3.5 Implementación de motores.

La parte encargada de plegar y desplegar la malla sobre, estará a cargo de los motores de CD marca POLOLU con una caja de engranajes a una relación de 131:1, dichos motores serán sujetados a través de una pieza construida en aluminio. En ambos motores se colocará

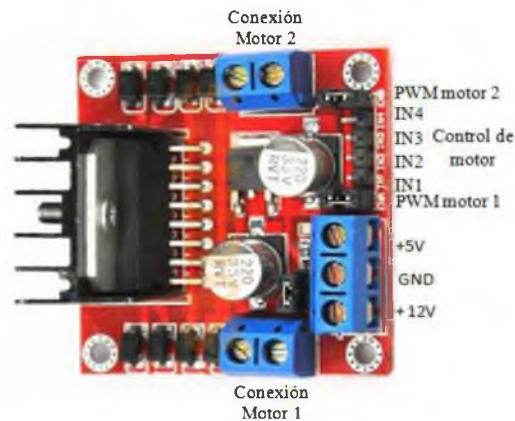
un engrane acoplado a su eje de igual manera se instalara un engrane al eje donde se enrollará la malla sombra con una relación 1:1 tal como se muestra en la Figura 3.16.



**Figura 3.16:** Adaptación de motores a los ejes de malla sombra.

### 3.3.6 Etapa de potencia.

De acuerdo a las especificaciones, en cuanto la máxima corriente que pueden proporcionar los canales digitales de la tarjeta Arduino Mega 2560, No es posible el funcionamiento y control de motores, a través de la misma. Es por ello que para poder controlar el sentido de giro y velocidad de estos, se utilizo el modulo L298N (ver Figura 3.17), el cual permite el control de dos motores de CD con una corriente constante de 2A y 5A pico. El sentido de giro y velocidad se realiza a través de dos señales digitales (0 1 para el giro horario (CW) (Siglas del inglés *Clock Wise*) ó 1 0 para el giro anti horario (CCW) (Siglas del inglés *Counter Clock Wise*)) y una señal PWM, provenientes de la tarjeta Arduino Mega, que previamente fueron designadas para cada motor a controlar.



**Figura 3.17:** Módulo de potencia L298N con sus conexiones.

### 3.3.7 Tarjetas de adquisición y control.

Con la finalidad de poder visualizar, monitorear y guardar los datos de las mediciones de la radiación solar, se utilizó un sistema de adquisición de datos Compact RIO-9014. Dicho sistema permite sensar y controlar diversos sensores y actuadores en tiempo real a través de los diferentes módulos de salida y/o entrada digitales y analógicas, en conjunto con el software LabVIEW™. Es por ello que a través del módulo NI 9219 con canales analógicos declarados como entradas, nos permite sensar señales en el orden de los  $\mu\text{V}$  proveniente de los piranómetro, de igual manera permitirá sensar y monitorear la temperatura de las secciones al interior de la CACO a través del módulo NI9205 y por último permitirá ejecutar las acciones del control propuesto a través de sus módulos de salidas digitales NI9472. Dicho sistema se muestra en la Figura 3.15 en conjunto con los módulos mencionados.



**Figura 3.18:** Sistema CompactRIO.

Debido a que la configuración del sistema CompactRIO con el que se cuenta, no permite realizar el control de la velocidad de los motores de CD, para ello se enlazo la tarjeta Arduino Mega 2560 (ver Figura 3.19) con el sistema CompactRIO, de tal forma que las señales de control digital que salen del CompactRIO son recibidas a través de canales analógicos en la tarjeta Arduino Mega 2560. Mediante esta operación se logro controlar el sentido de giro y velocidad de dos motores de CD a través de dos canales digitales y un canal con salida PWM proveniente de la tarjeta Arduino Mega 2560. Por otro lado esta tarjeta nos permite sensar la señal proveniente de los interruptores electromecánicos a través de los canales digitales establecidos como entrada con esta operación se asegura que la operatividad de los motores de CD esta dentro del intervalo de trabajo permisible para este sistema de control.



**Figura 3.19:** Arduino Mega 2560.

En el Apéndice B se presenta el diagrama esquemático de conexión con los sensores y componentes electrónicos para el hardware NI cRIO 9014 así como también para la Arduino mega.

### **3.4 Calibración y puesta en operación del equipo experimental**

En virtud de que los piranómetro son sensores que proporcionan una señal de voltaje en el orden de micro volts por cada  $W/m^2$ , fue necesario la implementación del sistema NI cRIO-9014 para llevar a cabo el monitoreo de dicha señal, por lo que al realizar el monitoreo y

control directamente con la tarjeta Arduino Mega 2560, se presentaron medidas erróneas aun utilizando un amplificador de instrumentación.

Otro de los puntos importantes antes de llevar a cabo las pruebas experimentales, consistió en recubrir con manguera plástica los cables que proporcionan la señal de temperatura y humedad proveniente de los sensores instalados al interior del modelo a escala de CACO, Ya que al realizar mediciones para comparar en tiempo real la humedad y temperatura al interior de la CACO mediante otro sensor de humedad y temperatura (Extech Instruments RH520A) Se presento una diferencia significativa en dicha comparación debido al incremento de la temperatura en los cables que transmiten las señales de los sensores por la intensidad de los rayos solares.

Por último, ya que se tuvo funcionando el sistema por completo, solo se ajusto el tiempo de retardo, con la finalidad de obtener una respuesta lo más rápida posible a los cambios existentes en la intensidad de radiación solar, sin llegar a perturbar el sistema. Logrando obtener un tiempo de retardo de 2 segundos entre cada actualización del sistema NI cRIO-9014, y un tiempo de retardo de 2 Seg en la tarjeta Arduino Mega 2560 para ejecutar la sentencia de control, y de esta manera controlar el pliegue y despliegue de la malla sombra para obtener la referencia deseada al interior de la CACO ante cualquier cambio en la radiación solar al exterior.

# Capítulo 4

## Resultados experimentales

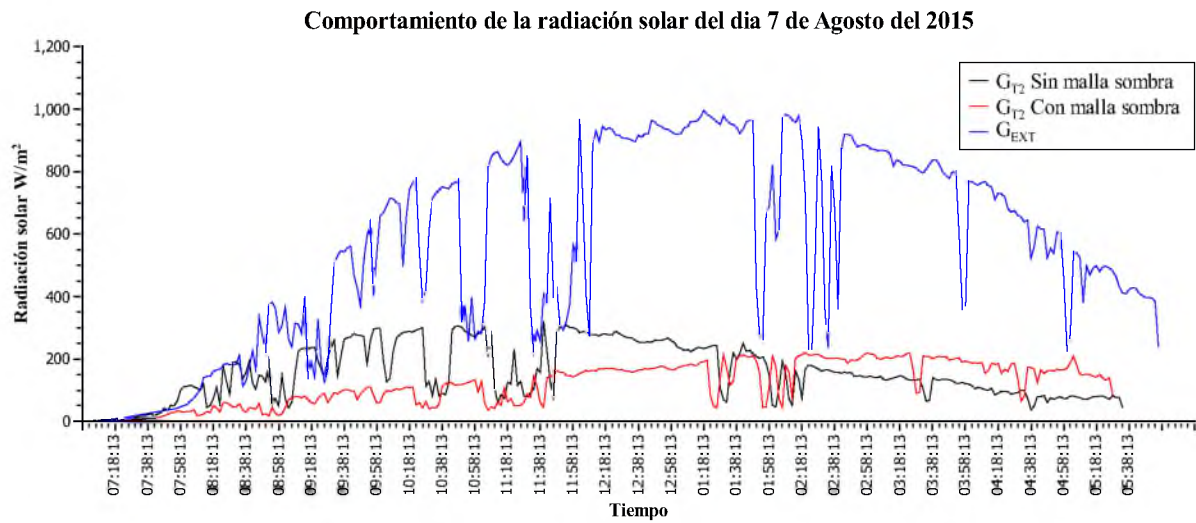
En este capítulo se presentan los resultados experimentales del comportamiento de la radiación solar al interior del modelo a escala de la CACO, sin malla sombra, con malla sombra de manera estática y con malla sombra controlada de acuerdo a una referencia. Adicionalmente se presenta el comportamiento de la temperatura y la humedad al interior de la CACO.

#### **4.1 Pruebas del comportamiento de la radiación solar al interior de la CACO con y sin malla sombra.**

En esta etapa experimental se llevaron a cabo las pruebas del comportamiento de la radiación solar al interior de la CACO orientada en la posición norte sur. Para dichas pruebas experimentales se utilizaron tres piranómetro, de los cuales dos se instalaron al interior de la CACO el QMS101 instalado en la sección A (submódulos 2 y 4), y el Kipp and Zonen instalado en la sección B (submódulos 1 y 3). El tercer piranómetro utilizado fue el de la estación meteorológica de la universidad del Papaloapan, con la finalidad de poder sensar la radiación solar a lo largo del día. Todos los datos de radiación solar fueron sensados cada 2 minutos por el sistema CompactRIO NI cRIO-9014 de NATIONAL INSTRUMENTS en conjunto con el software LabVIEW™.

##### **4.1.1 Pruebas del comportamiento de la radiación solar al interior de la CACO con y sin malla sombra.**

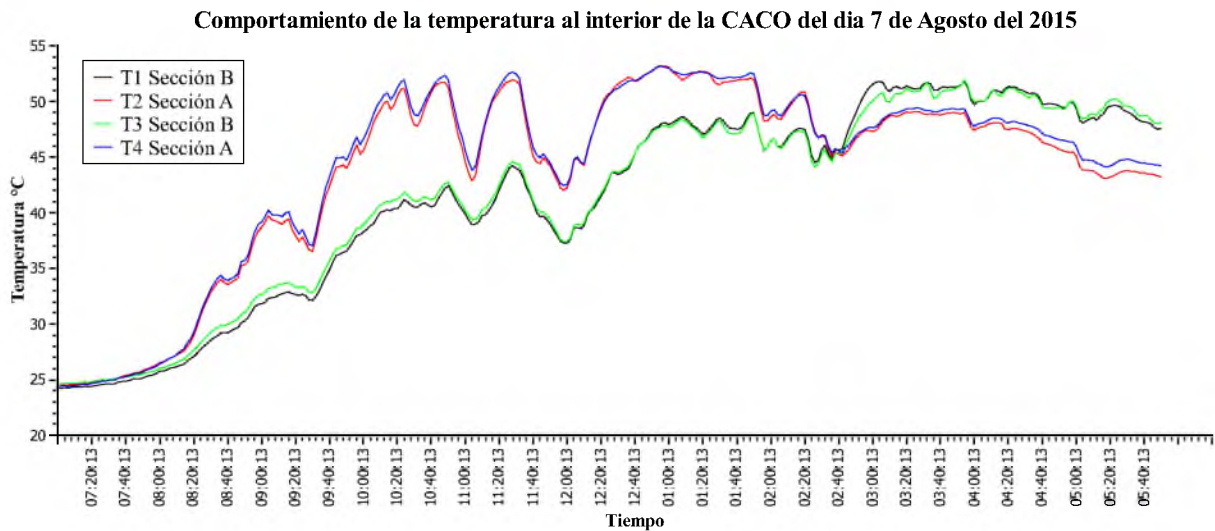
La primera prueba se realizó el día 7 de agosto del 2015 con cielo completamente soleado y con la sección A (Submódulos 2 y 4) sin malla sombra y sección B (submódulos 1 y 3) con malla sombra de manera estática (sin control). En la Figura 4.1 se muestra la grafica del comportamiento de la radiación solar ( $G_{T2}$ ) al interior de la CACO a lo largo del día. En dicha grafica se observa que los máximos picos de radiación global exterior sobrepasan los  $800 \text{ W/m}^2$  en el medio día solar, mientras que la radiación promedio durante el día fue de  $560 \text{ W/m}^2$ . Por otro lado la radiación solar al interior de la CACO sin malla sombra (sección A submódulos 2 y 4) reportó una máxima de  $300 \text{ W/m}^2$ , mientras que las secciones que tenían malla sombra negra estática (sección B submódulos 1 y 3) registraron una radiación de  $200 \text{ W/m}^2$ . Lo anterior demuestra que existe una reducción significativa de radiación solar del 75% al utilizar malla sombra negra en conjunto con el plástico de polivinilo.



**Figura 4.1:** Comportamiento de la radiación solar ( $G_{T2}$ ) al interior de la CACO con y sin malla sombra.

De igual manera en la Figura 4.1 se puede observar que en el lapso de tiempo de las 1:00 pm a 3:00 pm ambos piranómetro registraron la misma cantidad de radiación solar al interior de la CACO, posteriormente a ese lapso tiempo el piranómetro de la sección con malla sombra registra mayor radiación solar al interior, esto es debido a que en ese lapso de tiempo los rayos solares inciden mayormente de manera perpendicular a las paredes laterales de la CACO (traslucidas) y no al techo donde se colocó la malla sombra por lo que no se pudo limitar el paso de radiación solar al interior.

Este mismo efecto se ve reflejado en el comportamiento de la temperatura al interior, tal como se muestra en la Figura 4.2. Donde se observa que la temperatura en las secciones con malla sombra (sección B submodulos 1 y 3) registraron una temperatura promedio de  $40^{\circ}C$ , mientras que las sección sin malla sombra (sección A submodulos 2 y 4) registraron un promedio de  $45^{\circ}C$ , esto demuestra que el uso de malla sombra además de reducir la radiación solar en un 75% también tiene un efecto directo en la disminución de la temperatura promedio en  $5^{\circ}C$ .



**Figura 4.2:** Comportamiento de la temperatura al interior de la CACO con y sin malla sombra.

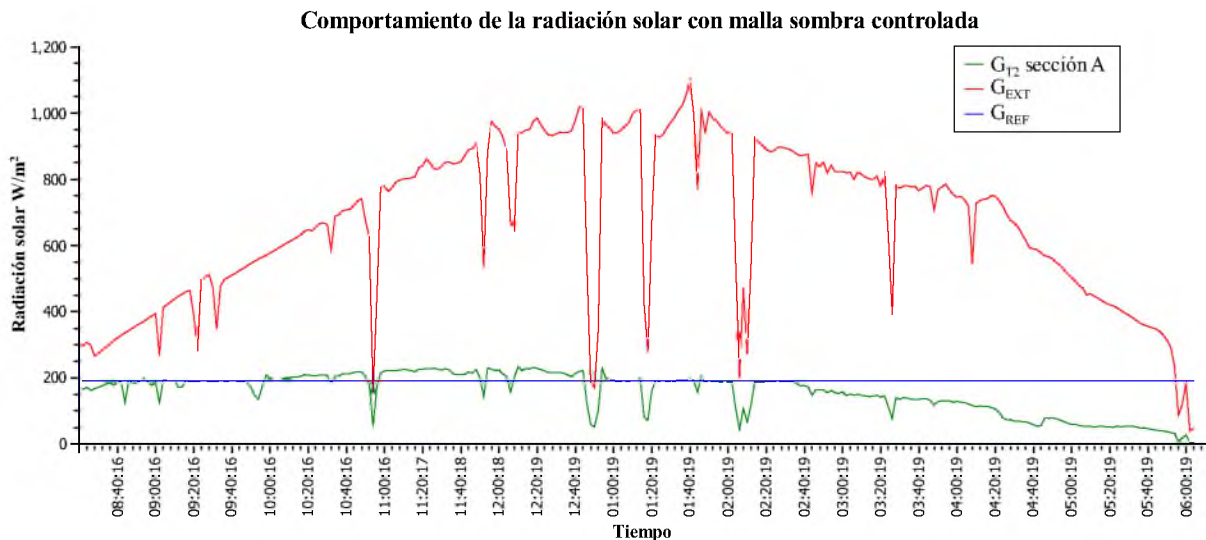
#### 4.1.2 Pruebas del comportamiento de la radiación solar al interior de la CACO con malla sombra controlada.

En esta etapa se llevaron a cabo pruebas experimentales para controlar la radiación solar al interior de la CACO a través del posicionamiento de la malla sombra haciendo uso de la lógica difusa. En estas pruebas se tomo como valor de referencia la radiación solar recomendada por Ayala et al., 2011, en el crecimiento y rendimiento de tomate en respuesta a radiación solar transmitida por mallas sombra, donde señala que se obtienen los más altos niveles de rendimiento con calidad de exportación en la producción de tomate a una radiación solar es de  $191.3 \text{ W/m}^2$

Se llevo a cabo la prueba experimental el día 18 de septiembre del 2015, bajo condiciones de un día completamente soleado y con la sección A (submodulos 2 y 4) y sección B (submodulos 1 y 3) cubiertas con malla sombra de manera controlada.

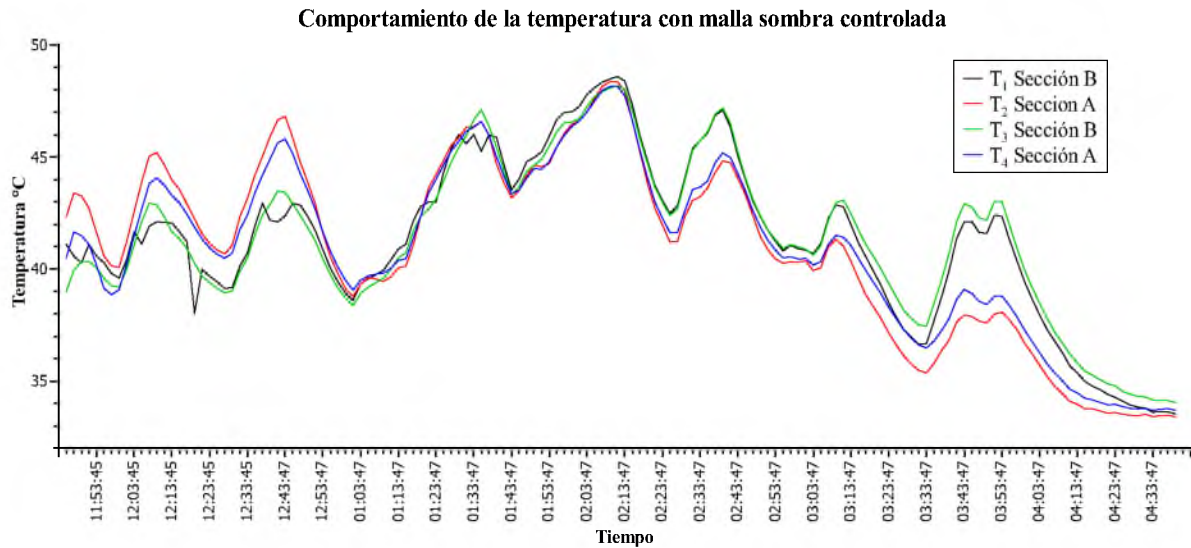
En la Figura 4.3 se muestra la gráfica del comportamiento de la radiación solar ( $G_{T2}$ ) al interior de la CACO a lo largo de la prueba, donde se muestra que la radiación solar promedio al exterior fue de  $715 \text{ W/m}^2$ , mientras que la radiación solar al interior de la CACO fue de  $182 \text{ W/m}^2$ . Lo anterior demuestra que existe una reducción significativa de radiación solar del 75% al utilizar la malla sombra negra en conjunto con el plástico de

polivinilo, pero a diferencia de la primer prueba el valor de la radiación solar al interior de la sección A y B de la cámara se mantuvo en promedio de  $182 \text{ W/m}^2$  desde el inicio de la prueba y casi hasta el final de la misma. Lo que demuestra que al utilizar el sistema de control propuesto en este trabajo se logra obtener con mayor precisión y con mayor tiempo el valor de referencia para la producción de tomate a una radiación solar de  $191.3 \text{ W/m}^2$ .



**Figura 4.3:** Comportamiento de la radiación solar del día 18 de septiembre.

De igual manera, en la Figura 4.4 se muestra el resultado obtenido en el comportamiento de la temperatura al interior de la CACO, donde se puede observar que todos los sensores al interior del sistema reportan casi la misma temperatura en el lapso del medio día solar (1:00 a 2:00 hrs), obteniendo a lo largo de la prueba una temperatura promedio de  $41^\circ\text{C}$  en cada sección (A y B) de la CACO. Mientras que en las horas de la mañana y por la tarde existe una diferencia de temperatura entre las dos secciones de aproximadamente  $5^\circ\text{C}$ . Esto debido a que la radiación solar incide directamente sobre las paredes laterales del modelo a escala y no en el techo donde está instalada la malla sombra

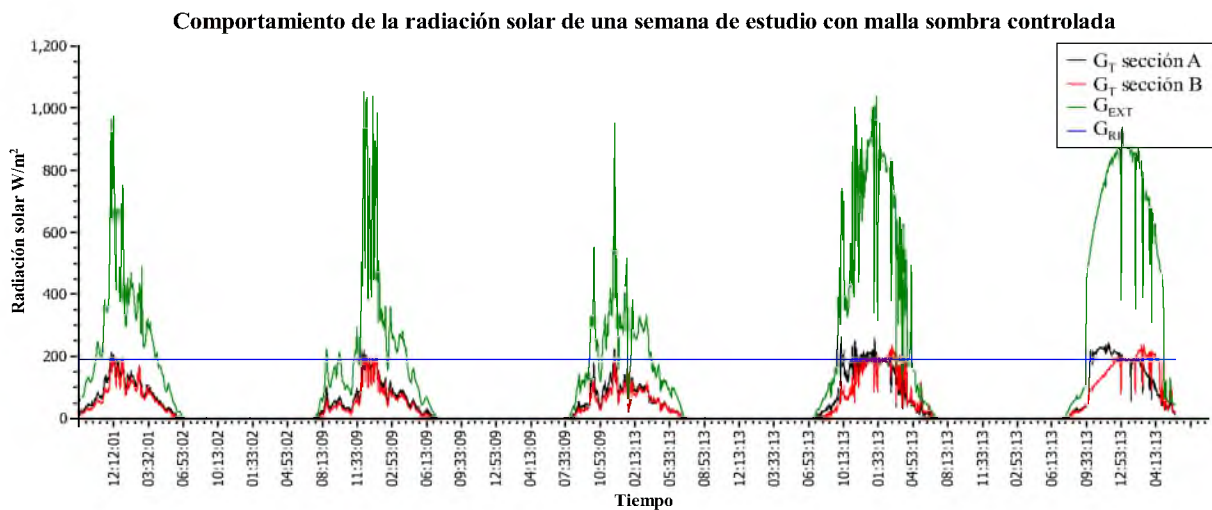


**Figura 4.4:** Comportamiento de la temperatura al interior de la CACO del día 10 de septiembre.

#### 4.1.3 Pruebas del comportamiento de la radiación solar con malla sombra controlada para una semana.

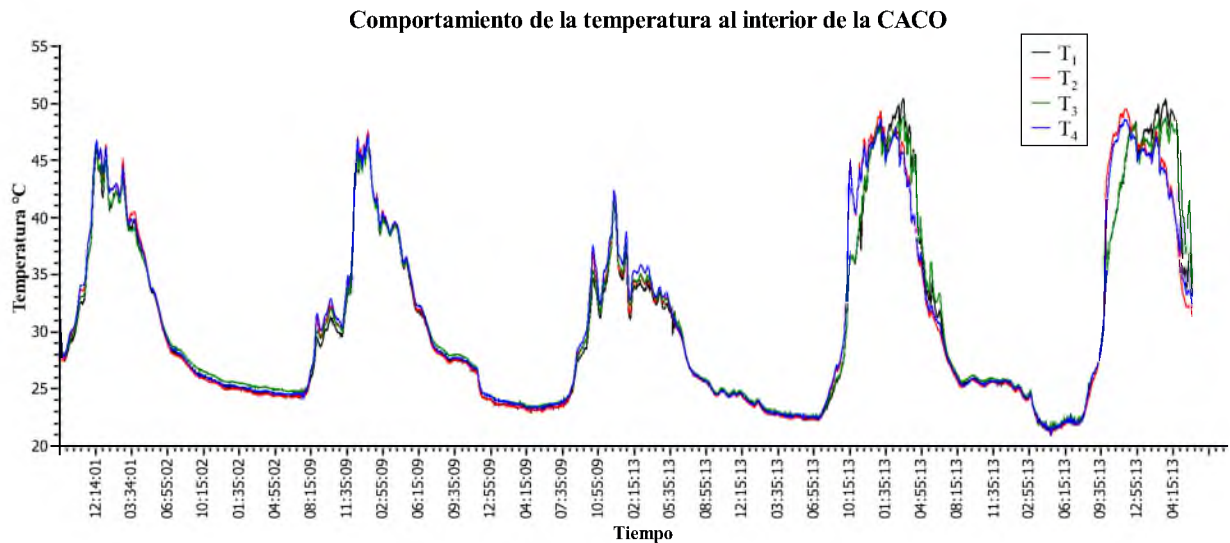
Con la finalidad de observar un comportamiento más completo de la radiación solar utilizando el sistema de control de la malla sombra desarrollada en este trabajo, y adicionalmente observar el comportamiento de la temperatura y la humedad relativa al interior del modelo a escala. Se llevo a cabo una prueba experimental con duración de una semana completa, comprendida del día 28 de Septiembre al 2 de Octubre del año 2015. El monitoreo y sensado de radiación solar estuvo a cargo del sistema NI cRIO-9014 en conjunto con LabVIEW™ y las mediciones se realizaron en promedios de cada 2 minutos. En el transcurso de esta prueba se registraron días parcialmente nublados/soleados y completamente soleados. En la Figura 4.5 se presentan el comportamiento de la radiación solar al interior de la CACO donde se muestra que los 3 primeros días se presentaron condiciones parcialmente nublados/soleados. Durante esos días la radiación solar promedio al interior de la CACO fue de 70 a 97  $W/m^2$ , mientras que al exterior alcanzo un promedio de 253 a 315  $W/m^2$  respectivamente. Para los 2 últimos días se presentaron condiciones completamente soleados, por lo que el promedio de radiación solar al interior de la CACO fue de 142 y 145  $W/m^2$  y al exterior se registró un promedio de 566 y 658  $W/m^2$ .

De esta prueba se puede concluir que se obtuvo un mejor control de la radiación solar en los días parcialmente soleados debido a que la intensidad de radiación solar en su mayoría predomina la difusa por lo que los máximos picos no superan la referencia deseada, mientras que en los últimos dos días se puede observar que por la mañana y tarde la radiación solar sobrepasa el valor de referencia, esto debido a que inciden los rayos solares de manera directa por los laterales, por lo que para estos días el mejor control de la radiación solar se focaliza dos horas antes y dos horas después del medio día solar, ya que en esos momentos el sol se encuentra en el cenit que es el punto más alto del sol, momento en el que la malla sombra efectúa un mejor control de la radiación solar al interior.



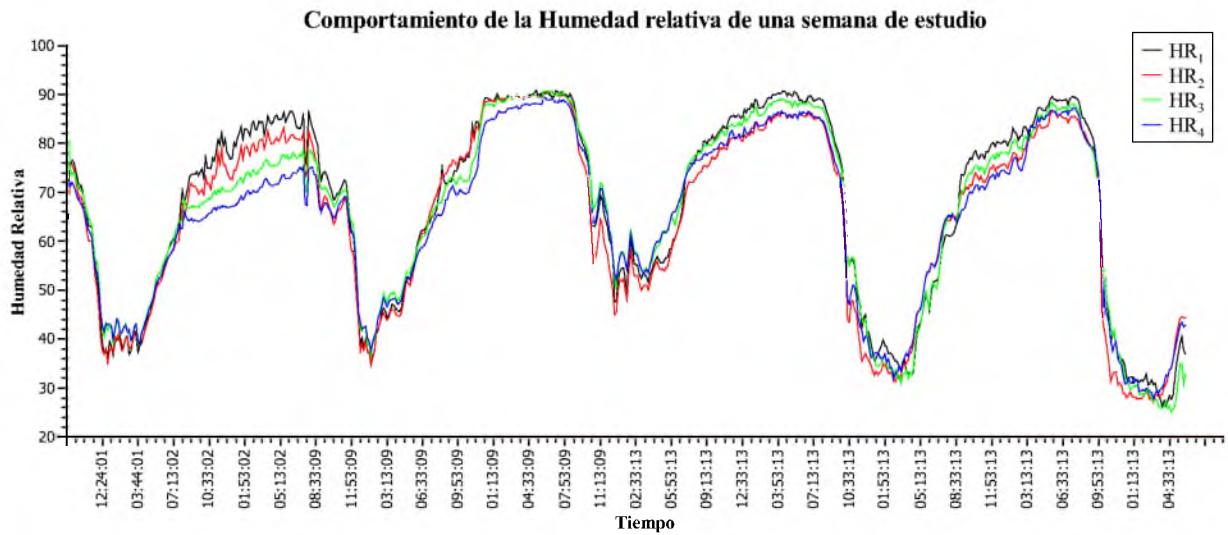
**Figura 4.5:** Mediciones de radiación solar del día 28 de Septiembre al 2 de Octubre.

Adicionalmente en la Figura 4.6 se presenta el comportamiento de la temperatura al interior de la CACO durante la prueba realizada. La temperatura promedio ( $T_1$ - $T_4$ ) se calculó para cada día de la semana comprendido de las 8:00am a las 6:00pm horas.



**Figura 4.6:** Mediciones de temperatura del día 28 de Septiembre al 2 de Octubre.

En la gráfica de la Figura 4.6 se observa que para los dos primeros días (días parcialmente soleados) se registro una temperatura promedio de  $37^{\circ}\text{C}$ , en el tercer día se registro una temperatura promedio de  $33^{\circ}\text{C}$ . Mientras que en los últimos dos días completamente soleados se registro una temperatura promedio al interior de  $41^{\circ}\text{C}$ . Cabe resaltar que el comportamiento de la temperatura es muy similar al comportamiento la radiación solar al interior de la CACO ya que durante los dos últimos días de la prueba se observo que dos horas antes y dos horas después del medio día solar la temperatura permanece casi constante en los  $41^{\circ}\text{C}$ . Esto se debe a que precisamente en esas horas la malla sombra efectúa un mejor control de la radiación solar al interior de la CACO. Ya que el sol incide en la parte superior y no en sus paredes laterales, tal como sucede en las primeras horas de la mañana y en las últimas horas de la tarde.



**Figura 4.7:** Mediciones de la humedad relativa para el día 28 de Septiembre al 2 de Octubre.

Adicionalmente se presenta el comportamiento de la humedad relativa para la semana completa de estudio (ver Figura 4.7) en la cual se observa que por las noches alcanza máximos picos de 90%. Esto debido a una disminución en la temperatura al interior de la CACO debido a la ausencia de radiación solar. Mientras que en el transcurso del día se prestan promedios de 40% y 50% casi iguales a los niveles registrados de temperatura. Lo anterior demuestra que al controlar la radiación solar en el espécimen de estudio se ve directamente afectada la variable temperatura y humedad relativa.

# Capítulo 5

## Conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

En este capítulo se presentan las conclusiones del proyecto de tesis abordado, así como también las recomendaciones para trabajos futuros para la mejora en el control de la radiación solar al interior del modelo a escala.

### 5.1 Conclusiones.

- 1) En este trabajo se implemento un control para el posicionamiento de malla sombra en función de la radiación solar  $G_{T2}$  al interior del modelo a escala, el desarrollo incluyo la construcción de la estructura, instrumentación, así como la calibración y puesta en operación.
- 2) Durante la calibración del sistema de control se observo que se obtuvo un mejor rendimiento aplicando un tiempo de retardo de dos segundos en la programación del control con lógica difusa.
- 3) De acuerdo a los resultados experimentales se determino que no se puede controlar una radiación solar al interior con una referencia menor a  $200\text{W/m}^2$ , implementando el sistema de control propuesto con una malla sombra al 40% de atenuación
- 4) Se observo que existe una reducción significativa de radiación solar del 75% al utilizar malla sombra negra en conjunto con el plástico de polivinilo.
- 5) Se observo que al controlar a radiación solar a través del pliegue y despliegue de la malla sombra, con una incertidumbre de  $\pm 10\text{W/m}^2$  se presento una disminución de la temperatura promedio en  $5^\circ\text{C}$  y una disminución del 40% al 50% en la humedad relativa al interior de la CACO.
- 6) También se observo que el sistema de control presenta un mejor desempeño en los días parcialmente soleados, mientras que para los días soleados el mejor desempeño se presenta dos horas antes y después del medio día, por lo que no es necesario orientar la CACO con respecto a la trayectoria aparente del sol.

### 5.2 Recomendaciones para trabajos futuros.

- 1) Diseñar y construir la estructura para el desplazamiento de la malla sombra de acuerdo al sistema real, ya que la construcción de la estructura para el sistema a escala de CACO solo permitió corroborar el funcionamiento optimo del control de la radiación solar al interior.

- 2) Considerar la construcción y calibración de un amplificador de instrumentación, para permitir el monitoreo y control de la radiación solar directamente a través del Arduino mega.
- 3) Implementar una malla sombra de un porcentaje de atenuación mayor al 40% para referencias menores a  $200 \text{ W/m}^2$  al interior de sistema CACO. Y bajo las mismas condiciones climáticas similares a las de la localidad de estudio.

**Bibliografía**

1. Álvarez, M., S. Corp. y L. Vásquez, 2007, Carga térmica en las cámaras del clima controlado que utilizan la energía solar. Citado en: [http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar 12/HTML/articulo04.htm](http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar%2012/HTML/articulo04.htm)
2. Ángeles, Montiel Vicente, and Universidad Autónoma Chapingo (México (Estado)). Diseño Agronómico De Sistemas De Riego Presurizado: Aspersión, Microaspersión Y Goteo. Chapingo, Edo. De México: UACH, 2000. Print.
3. Ayala-Tafoya, F. 2012, Efecto que ocasionan las mallas sombra de colores en el crecimiento de hortalizas, Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Sinaloa, Culiacán, Sinaloa.
4. Bastida A., 2004, La agricultura protegida y los invernaderos, Instituto de estudios Cajamar. Citado en: <http://www.slideshare.net/olaxpiston/01-la-agricultura-protegida-y-los-invernaderos>.
5. Bouzo C. A., Pilatti R.A., Favaro J. C. y Norberto F., 2005. Facultad de Ciencias Agrarias UNL Gariglio. Cultivo de tomate en invernadero Alternativas para el control de temperaturas extremas.
6. Cardona-Gil, J.A., Pazos-Urrea, J.P., 2013, Cámara de ambiente controlado para la Supervivencia de Plantas e Insectos, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.
7. Carrasco-Ríos, L., 2009, Efecto de la radiación ultravioleta-B en plantas, volumen 27, Universidad de Tarapacá, Arica, Chile.
8. Carrillo-Reveles, D.A., Vázquez-Minjares, J.L., Villela-Varela, R., Beltrán-Telles, A., Reyes-Rivas, C., González-Elías, M.E. 2008, Control del clima de un invernadero, Revista Investigación Científica, Vol. 4, No. 2, Nueva época, mayo-agosto ISSN 1870-8196, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas.
9. Cícero, L., 2005, Las mallas en el contexto del proyecto de un vivero, Revista ,66-72, Polysack, Brasil.
10. Díaz-Vázquez, S.G., 2012, Efecto de la radiación en el desarrollo fenológico, rendimiento y calidad en policultivo: Chile, Jitomate, maíz, frijol y amaranto en condiciones de invernadero, Centro Universitario Querétaro, Querétaro.

11. González I y Calderón A.J., 2008, Automatización de invernadero mediante autómatas programables y periferia descentralizada a través de profibus-DP.
12. Hernández J., Escobar I., Castilla N., 2001. La radiación solar en invernaderos mediterráneos, Copyright Ediciones de Horticultura, S.L. Universidad Almería, CIFA, Granada.
13. Huerta-Hernández, A., 2012, Agricultura protegida, Agroentorno, Artículo, primera parte.
14. Juárez-López, P., Bugarín-Montoya, R., Castro-Brindis, R., Sánchez-Monteon, A.L., Cruz-Crespo, E., Juárez-Rosete, C.R., Alejo-Santiago, G., Balois-Morales, R. 2011, Estructuras utilizadas en la agricultura protegida, Unidad Académica de Agricultura, Universidad Autónoma de Nayarit, Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo.
15. Martínez P.F., D Roca., R Suay., M. Martínez., X. Blasco., J.M. Herrero y C. Ramos, 2009, Avances en el control de los factores del clima para el cultivo en invernadero.
16. Mavi, H.S. y G.J. Tupper. 2004. Agrometeorology. Principles and applications of climate studies in agriculture. Food Products Press, New York, NY. Citado en: *Efecto de la radiación solar en la calidad de los productos hortícolas*
17. Morales I., 2013, Aplicación de la robótica en la agricultura, desarrolladas en Holanda, Universidad de Almería.
18. Morales-Maza, A., Payán-Ochoa, S., 2010, Agricultura protegida mallas plásticas, Inifap, Valle de Mexicali.
19. Múnera-Campuzano, J.P., 2012, Sistema de control automático para monitorear y controlar el ambiente al interior de un invernadero, Universidad pontificia Bolivariana; Cir. 1 #70-01, B11, Medellín, Colombia.
20. Ortiz G., 2009, Agricultura protegida en San Luis Potosí.
21. Palacio-Gómez C y García-Sucerquia J., 2012. Control de temperatura utilizando lógica difusa. Revista colombiana de física, Vol. 42, No 3, 378-382, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, A.A. 3840, Medellín Colombia.

22. Pérez H y De Paul M., 2007, Simulación y control de la temperatura dentro de un invernadero, Facultad de Ingeniería de Diseño y Automatización Electrónica, Universidad de la Salle, Bogota D.C.
23. Pérez-Rojas, H y De Paul-Cortes, M, 2007, Simulación y control de la temperatura dentro de un invernadero. Universidad de la Salle, Facultad de ingeniería de diseño y automatización electrónica, Bogotá D.C.
24. Tanny, V., Teitel, M., Barak, M., Esqira, Y., Amir, R. 2008. The Effect of Height on Screenhouse Microclimate. Acta Horticultura 801: 107-114. Citado en: Manejo automático de malla sombra y del riego en un invernadero con tomates.
25. Wener H. 1999. tomate de invernadero y producción de pimiento en malla sombra en Israel. Memorias de V congreso de Nuevas Tecnologías agrícolas. 5-8 de mayo de 1999. Puerto Vallarta, Jalisco México. P163-171.
26. Zari G.E., 2006, El efecto de mallas de sombreo sobre invernaderos microclima.
27. Zhang, Z.B. 2006. Shading Net Application in Protected Vegetable Production in China. Acta Horticultura 719: 479-486. Citado en Manejo automático de malasombra y del riego en un invernadero con tomates.

# Apéndice A

## Algoritmo de control.

En el presente apéndice es muestra el algoritmo de control implementado en la Arduino Mega 2560 para llevar a cabo el control del pliegue y despliegue de la malla sombra en el modelo a escala, además de la comunicación entre el sistema NI cRIO 9014

```
int tiempo=0, tiempo2=0;
int pulfinal=0, pulinicio=0;
int Senalsens1=31, Senalsens2=33; //Seccion A

int pulfinal2=0, pulinicio2=0; //Seccion B
int Senalsens3=35, Senalsens4=37;

int Motor = 7, Motor2 = 6;

void setup()
{
  pinMode (31,INPUT);// Conexión para los interruptores electromecánicos.
  pinMode (33,INPUT);//
  pinMode (35,INPUT);
```

```
pinMode (37,INPUT);
}
void loop() {
//SECCION 1
//CANALA ANALOGICO A0 =
//CANALA ANALOGICO A1 =
//CANALA ANALOGICO A2 =
//CANALA ANALOGICO A3 =
//CANALA ANALOGICO A4 =
//SECCION 2
//CANALA ANALOGICO A8 =
//CANALA ANALOGICO A9 =
//CANALA ANALOGICO A10 =
//CANALA ANALOGICO A11 =
//CANALA ANALOGICO A12 =

pulfinal = digitalRead(Senalsens1);// 31
pulinicio = digitalRead(Senalsens2);// 33

if( analogRead(0) > 999 )
{
digitalWrite(40, LOW);
digitalWrite(42, LOW);
analogWrite(Motor, 0);
delay(1000);
}

if((analogRead(1) > 999) && (pulfinal!=1) )
{
tiempo=1;
digitalWrite(40, LOW);
digitalWrite(42, HIGH);
analogWrite(Motor, 255);
```

```
    delay(250);

}
analogWrite(Motor,0);

if (tiempo == 1)
{
    delay(700);
}
tiempo=0;

if ((analogRead(2) > 999) && (pulfinal!=1))
{
    tiempo=2;
    digitalWrite(40, LOW);
    digitalWrite(42, HIGH);
    analogWrite(3, 100);
    analogWrite(Motor, 255);
    delay(600);
}
analogWrite(Motor,0);

if (tiempo == 2)
{
    delay(500);
}
tiempo=0;

if ((analogRead(3) > 999) && (pulinicio !=1))
{
    tiempo=3;
    digitalWrite(40, HIGH);
    digitalWrite(42, LOW);
```

```
    analogWrite(Motor, 255);
    delay(250);
}
analogWrite(Motor,0);

if (tiempo == 3)
{
    delay(700);
}
tiempo=0;

if ((analogRead(4) > 999) && (pulinicio !=1))
{
    tiempo=4;
    digitalWrite(40, HIGH);
    digitalWrite(42, LOW);
    analogWrite(Motor, 255);
    delay(600);
}
analogWrite(Motor,0);

if (tiempo == 4)
{
    delay(500);
}
tiempo=0;

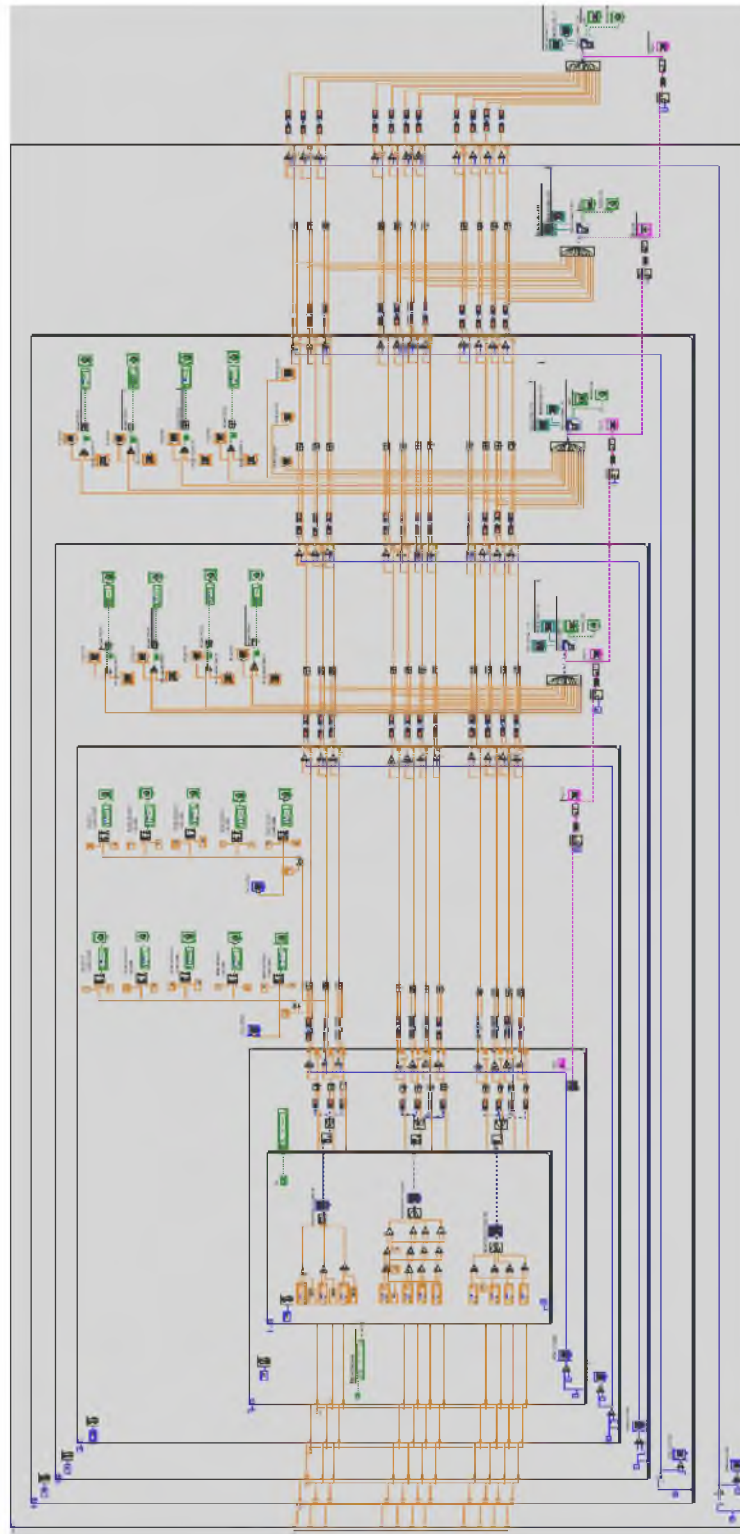
////////SECCION 2: Código de control para la sección B del modelo a escala
pulfinal2 = digitalRead(Senalsens3);
pulinicio2 = digitalRead(Senalsens4);

if( analogRead(8) > 999 )
{
    digitalWrite(46, LOW);
```

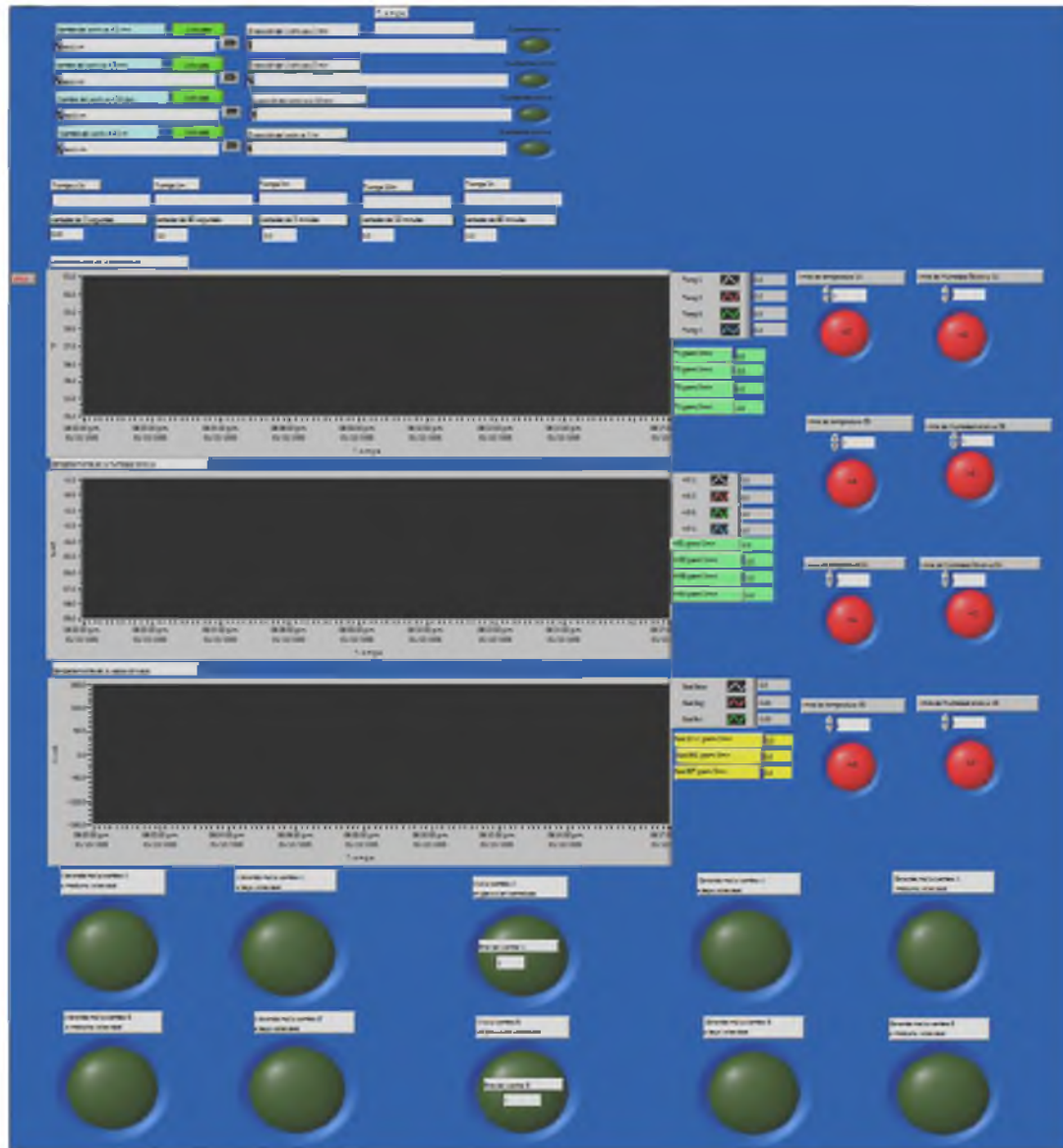
```
digitalWrite(48, LOW);
analogWrite(Motor2, 0);
delay(1000);
}
if((analogRead(9) > 999) && (pulfinal2!=1) )
{
    tiempo2=1;
    digitalWrite(46, LOW);
    digitalWrite(48, HIGH);
    analogWrite(Motor2, 255);
    delay(250);
}
analogWrite(Motor2,0);
if (tiempo2 == 1)
{
    delay(700);
}
tiempo2=0;
if ((analogRead(10) > 999) && (pulfinal2!=1))
{
    tiempo2=2;
    digitalWrite(46, LOW);
    digitalWrite(48, HIGH);
    analogWrite(Motor2, 255);
    delay(600);
}
analogWrite(Motor2,0);

if (tiempo2 == 2)
{
    delay(500);
}
tiempo2=0;
```

```
if ((analogRead(11) > 999) && (pulinicio2 !=1))
{
    tiempo2=3;
    digitalWrite(46, HIGH);
    digitalWrite(48, LOW);
    analogWrite(Motor2, 255);
    delay(250);
}
analogWrite(Motor2,0);
if (tiempo2 == 3)
{
    delay(700);
}
tiempo2=0;
if ((analogRead(12) > 999) && (pulinicio2 !=1))
{
    tiempo2=4;
    digitalWrite(46, HIGH);
    digitalWrite(48, LOW);
    analogWrite(Motor2, 255);
    delay(600);
}
analogWrite(Motor2,0);
if (tiempo2 == 4)
{
    delay(500);
}
tiempo2=0;
delay(1000);
}
```



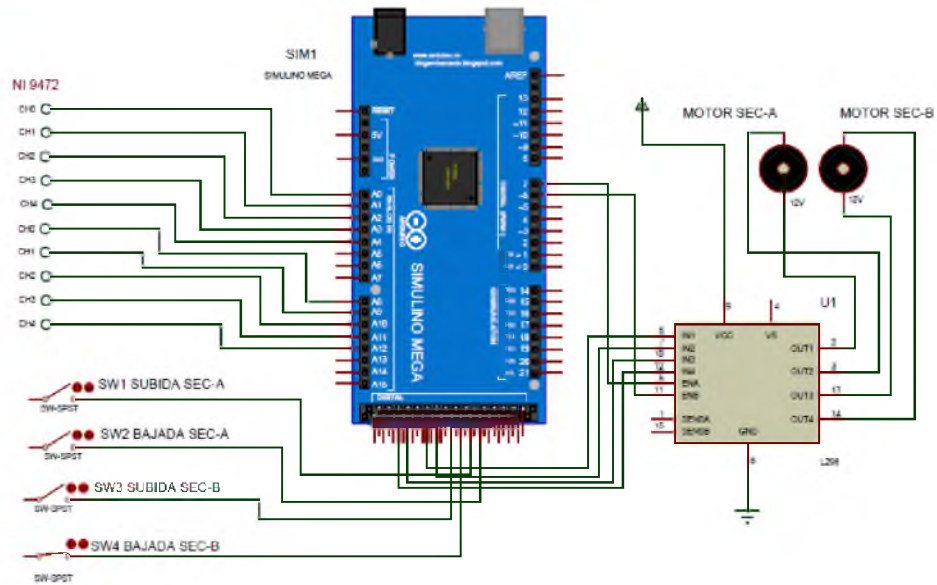
**Figura A.1:** Diagrama de control desarrollado en el software LabVIEW para censar y monitorear la radiación solar, temperatura y humedad relativa al interior del modelo a escala.



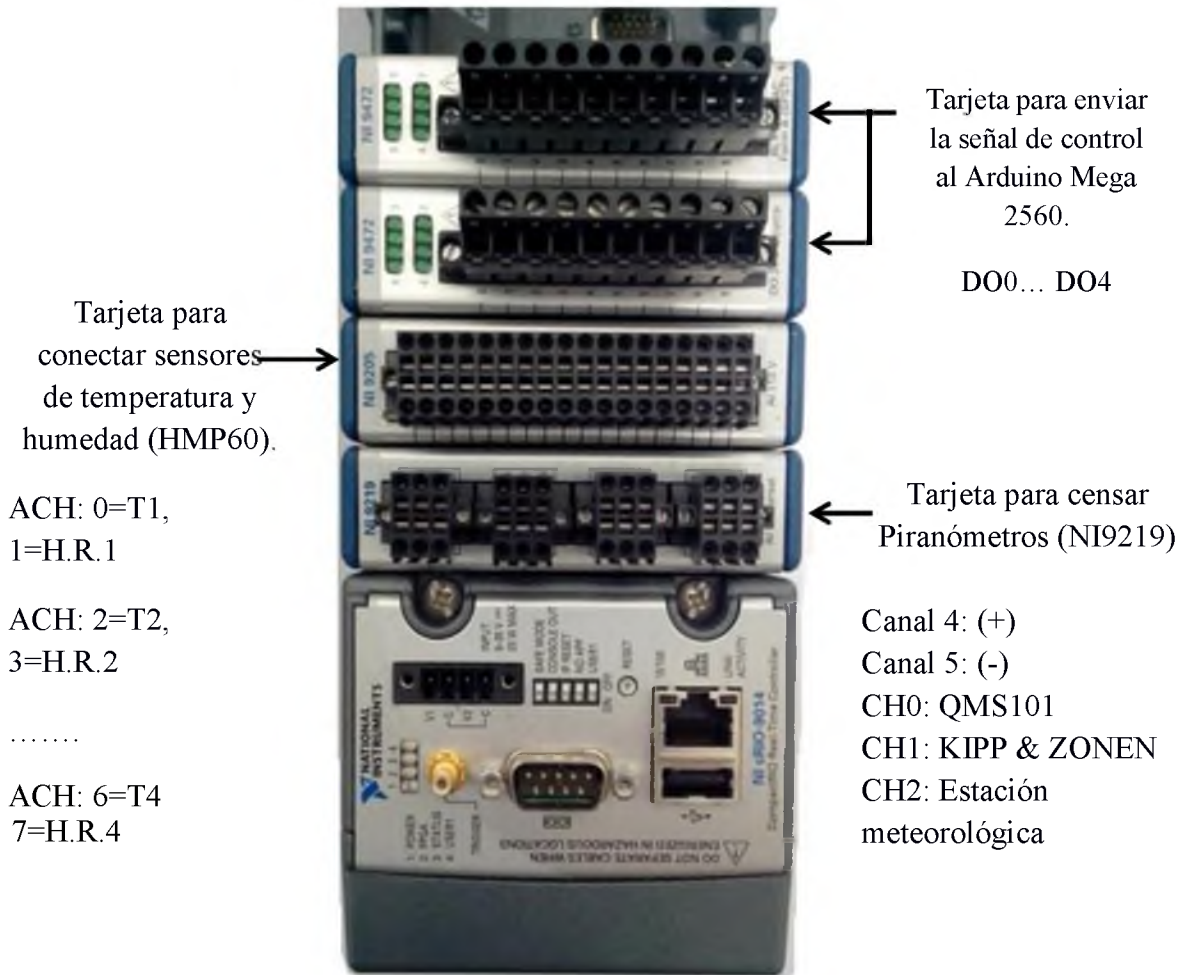
**Figura A.2:** Visualizador desarrollado en el software LabVIEW para monitorear las variables climatológicas, así como la señal de salida para el control de la malla sombra.

# Apéndice B

Diagrama de conexión



**Figura B.1:** Diagrama de conexión entre de la Arduino Mega 2560, con el modulo L298 para el control de los motores, así como también el censado de los interruptores electromecánicos y las condiciones de control recibidas del sistema NI cRIO 9014. Dicha conexión y simulación se realizado en el software Proteus 8 Profesional, con la librería Simulino V.3.



**Figura B.2:** Diagrama esquemático del sistema NI cRIO 9014 con las tarjetas utilizadas para la conexión de los sensores HMP60 y Piranómetro, así como la comunicación con la Arduino Mega a través de los canales digitales.