



# Cámara de ambiente controlado

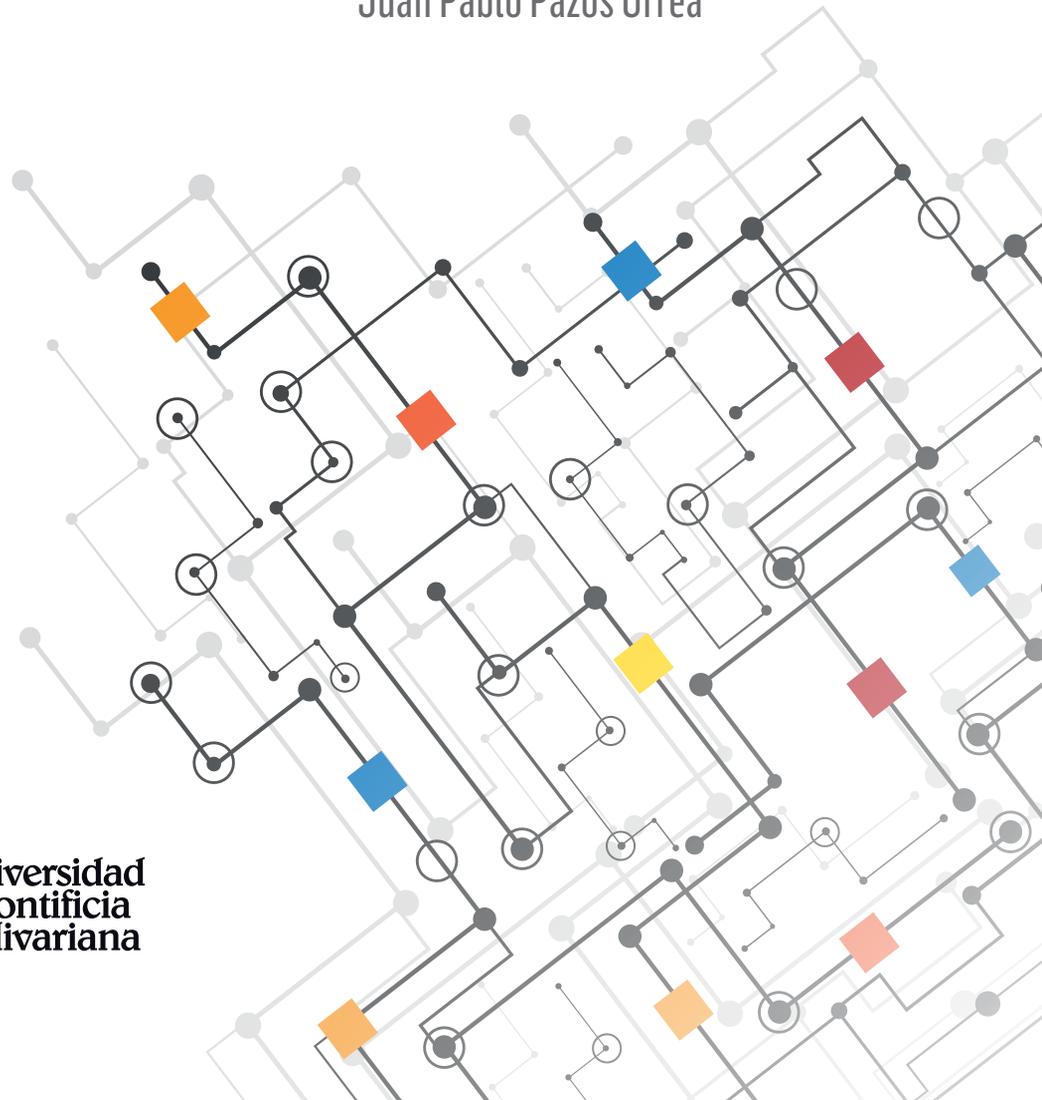
Jorge Andrés Cardona Gil  
Juan Pablo Pazos Urrea

Escuela de Ingenierías  
Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

MONOGRAFÍAS  
Y TESIS



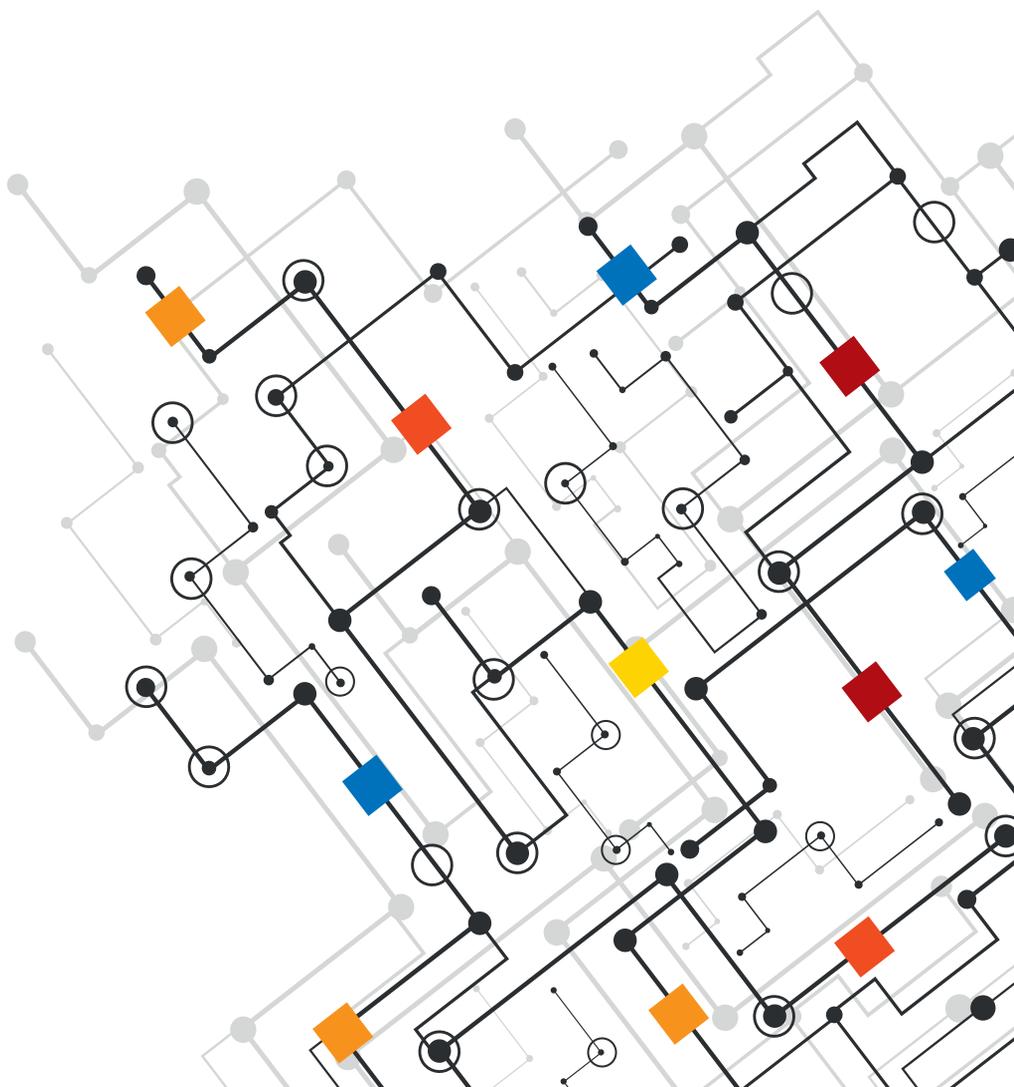
Universidad  
Pontificia  
Bolivariana





# Cámara de ambiente controlado

Jorge Andrés Cardona Gil  
Juan Pablo Pazos Urrea



631.3  
C268

Cardona Gil, Jorge Andrés, autor  
Cámara de ambiente controlado / Jorge Andrés Cardona Gil y Juan Pablo Pazos Urrea -- Medellín: UPB, 2017  
224 p.: 19 x 24 cm.  
ISBN: 978-958-764-477-7

I. Temperatura -- 2. Humedad relativa -- I. Pazos Urrea, Juan Pablo, autor -- II. Título

CO-MdUPB / spa / rda  
SCDD 21 / Cutter-Sanborn

© Jorge Andrés Cardona Gil  
© Juan Pablo Pazos Urrea  
© Editorial Universidad Pontificia Bolivariana  
Vigilada Mineducación

#### **Cámara de ambiente controlado**

ISBN: 978-958-764-477-7  
Primera edición, 2017  
Escuela de Ingenierías  
Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

**Gran Canciller UPB y Arzobispo de Medellín:** Mons. Ricardo Tobón Restrepo

**Rector General:** Phbro. Julio Jairo Ceballos Sepúlveda

**Vicerrector Académico:** Álvaro Gómez Fernández

**Editor:** Juan Carlos Rodas Montoya

**Coordinación de Producción:** Ana Milena Gómez Correa

**Diagramación:** Sissi Tamayo Chavarriaga

**Correctora de Estilo:** Dora Luz Muñoz Rincón

**Dirección Editorial:**  
Editorial Universidad Pontificia Bolivariana, 2017  
E-mail: [editorial@upb.edu.co](mailto:editorial@upb.edu.co)  
[www.upb.edu.co](http://www.upb.edu.co)  
Telefax: (57)(4) 354 4565  
A.A. 56006 - Medellín - Colombia

**Radicado:** 1577-09-05-17

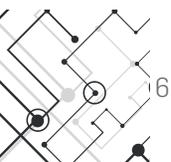
Prohibida la reproducción total o parcial, en cualquier medio o para cualquier propósito, sin la autorización escrita de la Editorial Universidad Pontificia Bolivariana.

# Tabla de contenido

Introducción .....	25
<b>1. Estado del arte y planteamiento del problema resuelto .....</b>	<b>29</b>
<b>2. Descripción general de la cámara existente y sus posibilidades.....</b>	<b>33</b>
2.1. Cámara de maduración.....	33
2.1.1. <i>Elementos de control para el buen funcionamiento de la Cámara de maduración .....</i>	<i>35</i>
2.1.2. <i>Sistema de refrigeración .....</i>	<i>38</i>
2.1.3. <i>Sistema de calefacción por resistencia eléctrica .....</i>	<i>44</i>
2.1.4. <i>Sistema de humidificación.....</i>	<i>46</i>
2.1.5. <i>Sistema de ventilación .....</i>	<i>46</i>
2.2. Cámaras de ambiente controlado.....	48
2.2.1. <i>Tipos de cámaras de ambiente controlado .....</i>	<i>49</i>
<i>Cámaras compactas .....</i>	<i>50</i>
<i>Cámaras Walk-in .....</i>	<i>50</i>
<b>3. Características generales de los ácaros Tetranychus Urticae Koch y de las especies hospederas .....</b>	<b>52</b>
3.1. Biología .....	54
3.1.1. <i>Condiciones óptimas para el desarrollo y la reproducción.....</i>	<i>54</i>
3.2. Síntomas y daños .....	54
3.3. Métodos de control.....	56



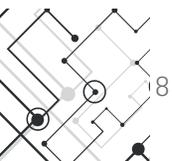
3.3.1. Control cultural .....	56
3.3.1.1. Buenas prácticas culturales .....	56
3.3.2. Control biológico .....	56
Lucha biológica .....	57
3.3.3. Control químico .....	57
3.3.4. Control por invernización .....	59
3.3.5. Control físico .....	60
<b>4. Acondicionamiento de la Cámara de maduración.....</b>	<b>61</b>
4.1. PLC (Programmable Logic Controller) .....	62
4.1.1. PLC Unitronics Vision 230-13-B02B .....	63
4.1.1.1 Snap-in V200-18-E1B de módulos I/O .....	63
4.1.1.2 PLC Unitronics Vision 230 en la Cámara de Ambiente Controlado .....	64
4.2. Sensor de humedad y temperatura .....	64
4.3. Iluminación. Tubos fluorescentes .....	66
4.4. Resistencia de calefacción .....	67
4.5. Gabinete .....	69
<b>5. Modelamiento cinemático de los actuadores controlados.....</b>	<b>71</b>
5.1. PWM (Pulse-Width Modulation) .....	74
5.2. Modelamiento estático y dinámico de los actuadores controlados .....	75
5.2.1. Curva estática. Resistencia de calefacción de 310 W .....	76
5.2.2. Curva dinámica. Resistencia de calefacción de 310 W .....	80
5.2.3. Prueba fallida modelamiento resistencia del humidificador .....	85
5.2.4. Resistencia de calefacción de 1500 W. Curva estática y dinámica .....	88
5.3. Modelo en tiempo continuo de la resistencia de calefacción de 1500 W .....	93
<b>6. Técnicas de control clásico implementadas .....</b>	<b>98</b>
6.1. Control PID .....	98
6.1.1. Instrumentación necesaria para el correcto funcionamiento de un controlador PID .....	101



6.1.1.1 Sensor .....	101
6.1.1.2 Actuador .....	101
6.1.1.3 Controlador.....	101
6.1.2. Acción proporcional .....	102
6.1.3. Acción integral.....	103
6.1.4. Acción derivativa.....	103
6.1.5. Consideraciones prácticas de un controlador PID para ser programado en una máquina de cómputo .....	104
6.1.6. Consideraciones prácticas con actuadores reales.....	104
6.1.6.1 Windup.....	104
6.1.6.2 Antiwindup.....	105
<b>7. Diseño, simulación y resultados experimentales del control PID implementado .....</b>	<b>106</b>
7.1. Diseño y simulación del control PID por el método de Ziegler-Nichols .....	107
7.1.1. Métodos de Ziegler-Nichols .....	108
7.1.1.1 Método 1. Lazo abierto.....	108
7.1.1.2 Método 2. Lazo cerrado.....	108
7.1.2. Diseño y simulación del control PID método 1 Ziegler-Nichols.....	108
7.1.3. Diseño y simulación del control PID método 2 Ziegler-Nichols.....	112
7.2. Diseño y simulación del control PID por el método de Chien, Hrones y Reswick.....	112
7.3. Resultados experimentales del control PID implementado. Método de Chien, Hrones y Reswick.....	115
<b>8. Comunicación PC-PLC .....</b>	<b>122</b>
8.1. Protocolo Modbus .....	122
8.1.1. Modos de transmisión del protocolo Modbus .....	123
8.1.2. Funcionamiento y elementos de una red Modbus.....	123
8.1.3. Representación de datos en Modbus.....	124
8.1.3.1 Output Coils.....	125
8.1.3.2 Holding Registers.....	125
8.1.4. Comunicación Modbus a través del Programa en LabVIEW® (PC) y Unitronics Visilogic (PLC).....	125



<b>9. Software de control</b> .....	<b>127</b>
9.1. Software de control PLC .....	128
9.1.1. <i>Menú principal. Setup</i> .....	129
9.1.2. <i>Menú principal. Control PC</i> .....	130
9.1.3. <i>Menú principal. Control PLC</i> .....	131
9.2. Software de control PC.....	132
9.2.1. <i>Menú control PID temperatura</i> .....	132
9.2.2. <i>Menú control ON-OFF humedad relativa</i> .....	134
9.2.3. <i>Menú lámparas fluorescentes</i> .....	134
9.2.4. <i>Menú datos y comunicación</i> .....	135
<b>10. Productos obtenidos</b> .....	<b>137</b>
<b>11. Trabajo futuro</b> .....	<b>139</b>
<b>12. Potencial</b> .....	<b>141</b>
<b>13. Conclusiones</b> .....	<b>142</b>
<b>14. Referencias</b> .....	<b>144</b>
<b>15. Anexos</b> .....	<b>156</b>
<b>Sobre los autores</b> .....	<b>221</b>



## Lista de figuras

Figura 1. Temperatura (rojo) (°C) Vs Tiempo (min), setpoint (32 °C) (azul) .....	27
Figura 2. Cámara de maduración para productos cárnicos existente .....	34
Figura 3. Póster Cámara de maduración para productos cárnicos existente .....	34
Figura 4. Interruptor selector de tipo muletilla de dos posiciones.....	35
Figura 5. Indicadores luminosos instalados actualmente en la Cámara de maduración.....	36
Figura 6. Detector de nivel.....	36
Figura 7. Temporizador Autonics ATE .....	37
Figura 8. Llenado automático con válvula solenoide (parte superior Cámara de maduración) .....	37
Figura 9. Llenado automático con válvula solenoide (parte inferior Cámara de maduración) .....	37
Figura 10. Sensor de humedad y temperatura Cámara de maduración .....	38
Figura 11. Ciclo de refrigeración por compresión de vapor .....	39
Figura 12. Evaporador .....	39
Figura 13. Compresor .....	41
Figura 14. Condensador.....	42
Figura 15. Resistencia eléctrica por aire forzado de 310 W.....	45
Figura 16. Resistencia eléctrica por aire forzado de 310 W en la Cámara de maduración .....	46



Figura 17. Humidificador por resistencia eléctrica sumergida de 1 kW .....	46
Figura 18. Circulación horizontal y vertical.....	47
Figura 19. Ventiladores vista interna .....	48
Figura 20. Ventiladores vista externa.....	48
Figura 21. Cámaras climáticas modulares tipo <i>Walk-in</i> .....	50
Figura 22. Ácaro <i>Tetranychus Urticae Koch</i> .....	53
Figura 23. Huevos de ácaro <i>Tetranychus Urticae Koch</i> .....	53
Figura 24. Colonia de ácaro <i>Tetranychus Urticae Koch</i> .....	53
Figura 25. Daño producido en hojas.....	55
Figura 26. Daño producido en fruta.....	55
Figura 27. PLC Unitronics <i>Vision 230</i> .....	65
Figura 28. Sensor de humedad y temperatura .....	65
Figura 29. Instalación de tubos fluorescentes.....	67
Figura 30. Resistencia eléctrica por aire forzado de 1500 W.....	68
Figura 31. Resistencia eléctrica por aire forzado de 1500 W en la Cámara de ambiente controlado .....	68
Figura 32. Termostato TS-120S C.....	68
Figura 33. Termostato ubicado en la Cámara de ambiente controlado .....	68
Figura 34. Gabinete vista frontal.....	69
Figura 35. Gabinete cableado interno .....	69
Figura 36. Gabinete cableado interno PLC.....	70
Figura 37. Cámara de ambiente controlado.....	70
Figura 38. PWM.....	75
Figura 39. Curva de polarización con un <i>duty cycle</i> del 65 % (punto Q) .....	81
Figura 40. Curva de polarización con un <i>duty cycle</i> del 60 % (punto Q) .....	82
Figura 41. Perturbación de la temperatura ambiente.....	83

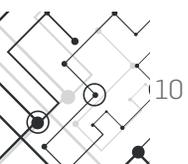


Figura 42. Curva dinámica de la resistencia de 310 W de calefacción .....	84
Figura 43. Curva dinámica de la resistencia de 310 W de calefacción en la zona de operación.....	84
Figura 44. Comportamiento de la humedad relativa con un <i>duty cycle</i> del 60 %.....	86
Figura 45. Comportamiento de la humedad relativa bajo las condiciones normales de operación del sistema.....	86
Figura 46. Comportamiento de la humedad relativa bajo un funcionamiento continuo del sistema de refrigeración y ventilación .....	87
Figura 47. Curva estática de la resistencia de 1500 W del sistema de calefacción.....	90
Figura 48. Curva estática de la resistencia de 1500 W del sistema de calefacción al restar la temperatura ambiente en cada <i>duty cycle</i> .....	91
Figura 49. Curva dinámica de la resistencia de 1500 W del sistema de calefacción.....	92
Figura 50. Curva dinámica de la resistencia de 1500 W del sistema de calefacción en la zona de operación .....	92
Figura 51. Curva característica de un sistema de primer orden con retardo.....	94
Figura 52. Diagrama de bloques implementado en Simulink® para obtener la curva dinámica.....	97
Figura 53. Comparación entre curva dinámica experimental y curvas dinámicas simuladas.....	97
Figura 54. Control PID en lazo de realimentación.....	100
Figura 55. Parámetros respuesta al paso del sistema método 1 Ziegler-Nichols .....	107
Figura 56. <i>Duty cycle</i> 40 % - 50 %.....	109
Figura 57. <i>Duty cycle</i> 50 % - 40 % .....	109
Figura 58. <i>Duty cycle</i> 40 % - 30 %.....	110
Figura 59. <i>Duty cycle</i> 30 % - 40 %.....	110



Figura 60. Diagrama de bloques control PID método 1 Ziegler-Nichols .....	111
Figura 61. Respuesta al paso 40 % de <i>duty cycle</i> (30 °C) del sistema controlado por método 1 Ziegler-Nichols .....	111
Figura 62. Respuesta control PID ajustado método 1 Ziegler-Nichols .....	112
Figura 63. Diagrama de bloques control PID método CHR sobrepaso 0 %.....	114
Figura 64. Respuesta al paso 40 % de <i>duty cycle</i> (30 °C) del sistema controlado por método CHR sobrepaso 0 %.....	114
Figura 65. Respuesta control PID ajustado método CHR sobrepaso 0 %.....	115
Figura 66. Control PID temperatura sin perturbación con referencia 30 °C, 19 °C y 47 °C (día y noche).....	116
Figura 67. <i>Duty cycle</i> control PID temperatura sin perturbación (día y noche).....	117
Figura 68. Control PID temperatura referencia 30 °C con perturbación control ON-OFF humedad relativa referencia 50 %HR (día y noche).....	117
Figura 69. Control <i>ON-OFF</i> humedad relativa referencia 50 %HR (día y noche) .....	118
Figura 70. <i>Duty cycle</i> control PID temperatura con perturbación humidificador 50 %HR (día y noche) .....	118
Figura 71. Control PID temperatura referencia 30 °C (día y noche) y 47 °C con perturbación control <i>ON-OFF</i> humedad relativa 50 %HR y lámparas fluorescentes encendidas.....	119
Figura 72. Control <i>ON-OFF</i> humedad relativa 50 %HR con perturbación lámparas fluorescentes encendidas (día y noche).....	119
Figura 73. <i>Duty cycle</i> control PID temperatura con perturbación humidificador 50 %HR y lámparas fluorescentes encendidas (día y noche).....	120

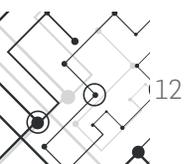
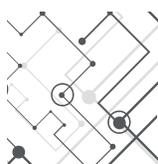


Figura 74. Control PID temperatura referencia 30 °C y 17 °C con perturbación control <i>ON-OFF</i> humedad relativa 60 %HR, lámparas fluorescentes encendidas y apertura de puerta.....	120
Figura 75. Control <i>ON-OFF</i> humedad relativa 60 %HR con perturbación lámparas fluorescentes encendidas y apertura de puerta.....	121
Figura 76. <i>Duty cycle</i> control PID temperatura con perturbación humidificador 60 %HR, lámparas fluorescentes encendidas y apertura de puerta.....	121
Figura 77. Funcionamiento Modbus PC (Maestro) - PLC (Esclavo).....	124
Figura 78. Menú principal.....	128
Figura 79. <i>Setup</i> . Opciones 1 y 2 .....	129
Figura 80. <i>Setup</i> . Opción 3.....	129
Figura 81. Menú control PC.....	131
Figura 82. Menú control PID temperatura (°C).....	134
Figura 83. Menú control <i>ON-OFF</i> humedad relativa (%HR).....	135
Figura 84. Menú lámparas fluorescentes.....	135
Figura 85. Menú datos y comunicación .....	136



## Lista de tablas

Tabla 1. Especificaciones técnicas del evaporador .....	39
Tabla 2. Especificaciones técnicas del compresor .....	41
Tabla 3. Especificaciones técnicas del condensador .....	42
Tabla 4. Especificaciones técnicas de la válvula de expansión .....	43
Tabla 5. Propiedades físicas del refrigerante R-134A.....	44
Tabla 6. Materias activas.....	58
Tabla 7. Especificaciones técnicas del sensor de humedad y temperatura.....	65
Tabla 8. Condiciones normales de operación de la Cámara de ambiente controlado.....	74
Tabla 9. Registro de la curva estática disminuyendo el <i>duty cycle</i> de la resistencia de calefacción de 310 W desde el 100 %.....	77
Tabla 10. Registro de la curva estática aumentando el <i>duty cycle</i> de la resistencia de calefacción de 310 W desde el 0 %.....	77
Tabla 11. Zona de operación de la resistencia de calefacción de 310 W. Resultados al aumentar el <i>duty cycle</i> desde el 0 %.....	79
Tabla 12. Zona de operación de la resistencia de calefacción de 310 W. Resultados al disminuir el <i>duty cycle</i> desde el 100 %.....	79
Tabla 13. Nueva zona de operación de la resistencia de calefacción de 310 W. Resultados al aumentar el <i>duty cycle</i> desde el 0 %.....	81

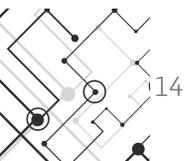
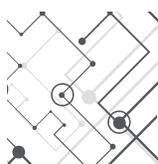


Tabla 14. Nueva zona de operación de la resistencia de calefacción de 310 W. Resultados al disminuir el <i>duty cycle</i> desde el 100 %.....	81
Tabla 15. Nuevas condiciones normales de operación de la Cámara de ambiente controlado .....	88
Tabla 16. Registro de la curva estática de la resistencia de calefacción de 1500 W.....	90
Tabla 17. Zona de operación de la resistencia de calefacción de 1500 W. Resultados al aumentar el <i>duty cycle</i> desde el 0 %.....	91
Tabla 18. Zona de operación de la resistencia de calefacción de 1500 W. Resultados al disminuir el <i>duty cycle</i> desde el 60 % .....	91
Tabla 19. Parámetros del modelo matemático de la resistencia del sistema de calefacción.....	95
Tabla 20. Promedio de los parámetros del modelo matemático de la resistencia del sistema de calefacción .....	95
Tabla 21. Valores de los parámetros método 1 de Ziegler-Nichols.....	108
Tabla 22. Valores de los parámetros método 2 de Ziegler-Nichols.....	108
Tabla 23. Parámetros método 1 Ziegler-Nichols promediados....	110
Tabla 24. Valores de los parámetros método CHR sobrepaso 0 %.....	113
Tabla 25. Valores de los parámetros método CHR sobrepaso 20 %.....	113
Tabla 26. Parámetros método CHR sobrepaso 0 %.....	114
Tabla 27. Tabla de datos protocolo <i>Modbus</i> .....	124
Tabla 28. Parámetros de la comunicación serial.....	126
Tabla 29. Parámetros que pueden ser modificados por el usuario .....	130
Tabla 30. Registros del PLC leídos por el PC.....	133
Tabla 31. Registros del PC escritos al PLC.....	133

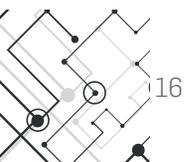


A la memoria de mi madre, a mi padre, a mi hermana, a mi novia,  
a mis amigos y maestros por todo su apoyo y, a Dios, quien me  
permitió cumplir satisfactoriamente con todos los objetivos  
planteados.

Por: Jorge Andrés Cardona Gil

A mis padres, amigos y maestros por todo su apoyo.

Por: Juan Pablo Pazos Urrea



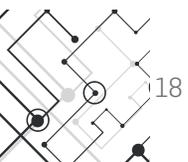
## Agradecimiento

Este trabajo de grado, con su formulación y culminación, lo queremos agradecer profundamente; en primer lugar, a Dios, a nuestras familias, amigos y maestros, quienes nos acompañaron y brindaron su apoyo durante el desarrollo del proyecto. Al Grupo de Investigaciones Agroindustriales (GRAIN), además, queremos resaltar la colaboración del director de Ingeniería Agroindustrial, Esp. Juan Carlos Palacio Piedrahíta, por el tema de financiamiento, al inicio de este proyecto; al Laboratorio de Ingeniería Eléctrica y Electrónica; al Centro de Investigación, Desarrollo y Calidad en Refrigeración y Climatización, en especial, al Ing. Mecánico Santiago del Río Rico, quienes nos brindaron su confianza, servicios y apoyo incondicional; al Ph.D. César Alejandro Isaza Roldán por toda su colaboración, en cuanto a temas de refrigeración e implementación; al Ph.D. Manuel J. Betancur y al Ing. Eléctrico Hernán Valencia Gallón, por su asesoría en temas de acondicionamiento de la Cámara de maduración y en temas de control; a la Ing. Electrónica Pilar Alzate Alzate, por todo su acompañamiento y apoyo moral en todos los temas referentes a este trabajo de grado; y al MSc. José Isaac Jaramillo Moreno, quien nos colaboró con parte importante del financiamiento de este proyecto y realizó los trámites de compra y entrega de equipos de forma rápida y oportuna.

Agradecemos, especialmente, a la directora de este proyecto, Ph.D. Marisol Osorio Cárdenas, por todo su apoyo y colaboración, en todos los temas referentes a este proyecto, lo que nos permitió aprender muchas cosas en el camino, por la tranquilidad con que



manejó todo el desarrollo del trabajo de grado, los comentarios para orientar nuestro trabajo, cuando perdíamos el foco y por la ayuda en la escritura del documento. Gracias a todo lo anterior, este proyecto se pudo culminar con éxito.



## Glosario

**4-20 mA:** "señal analógica estándar, para transmisión de información, muy utilizada en el ámbito de la instrumentación y comunicación industrial" (Congote y Rincón, 2008).

**Antocóridos:** pequeños insectos que, generalmente, viven en las flores (Gómez, 1958).

**Ácaro fitoseido:** los fitoseidos son depredadores de ácaros plaga, "son ácaros de vida libre y distribución mundial. Muy activos, se les ve desplazarse rápidamente sobre las hojas, corteza, humus, entre otros, donde se encuentran sus presas" (Núñez, 2005).

**Acondicionamiento húmedo:** aplicación de las cámaras de ambiente controlado, que permite garantizar las condiciones ideales de humedad relativa, para la supervivencia de plantas e insectos.

**Ambiente controlado:** "entorno cerrado, donde parámetros tales como luz, temperatura, humedad relativa y, algunas veces, presión parcial de los gases (e, incluso, su composición) están completamente controlados dentro de unos límites determinados, fuera de los cuales, la variación de dichas magnitudes afecta negativamente las funciones de los instrumentos y a aquello que se encuentra en el interior de dicho entorno" (Hughes et al., 2004).

**Apelmazamiento del polen:** se refiere a al estado viscoso, que puede llegar a tomar el polen de las plantas, por exceso de humedad.



**Biocenosis:** "es el conjunto de seres vivos de un ecosistema. Entre ellos se establecen distintas relaciones y, además, ocupan su espacio vital de una forma estructurada en varios niveles de organización" (Kalipe-dia, 2013).

**Caducifolio:** "árboles y arbustos que no se conservan verdes todo el año, dejan caer sus hojas en épocas desfavorables, estación fría o seca" (Botánica morfológica, 2013).

**Carga térmica:** "cantidad de energía que se requiere vencer en un área, para mantener determinadas condiciones de temperatura y humedad, para una aplicación específica, como, por ejemplo, el confort térmico. Es, por tanto, la cantidad de calor que se retira de un espacio definido" (Miliarium, 2008).

**Cecidómidos:** "son moscas finas y frágiles, de aproximadamente 3 mm de longitud" (Carles-Tolrá. 2002).

**CFM:** es la abreviatura para *pies cúbicos por minuto*, un parámetro de los equipos de ventilación, que indica una medida de volumen de aire movido (Sodeca, s.f.).

**Clorofila:** es una familia de pigmentos de color verde, que se encuentra en las cianobacterias y en todos aquellos organismos que, contienen cloroplastos en sus células, lo que incluye a las plantas y a los diversos grupos de protista, crítica en la fotosínte-

sis, proceso que permite a las plantas absorber energía a partir de la luz. (Wikipedia, 2013b).

**Coleópteros:** los coleópteros son un tipo de insectos conocidos comúnmente como escarabajos. (Casanova, 2012).

**DataXls®:** "programa propietario de *Unitronics*®, que se utiliza para enviar los datos que recibe *DataXport*® a un archivo de *Microsoft Excel*®" (Congote y Rincón, 2008).

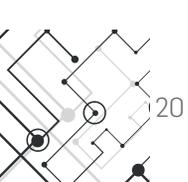
**DataXport®:** "programa propietario de *Unitronics*®, que se utiliza para pasar registros desde el PLC hacia el PC" (Congote y Rincón, 2008).

**Defoliaciones:** "caída de las hojas de los árboles y plantas, causada por enfermedades y agentes químicos o atmosféricos" (WordReference, 2013a).

**Depósitos calcáreos:** acumulación de minerales, como piedra o roca caliza (Wikipedia, 2013b).

**Diapausa:** "período de inactividad, que presenta el desarrollo larvario de algunas especies de insectos, durante el cual se produce una disminución del metabolismo y, como consecuencia, la interrupción del proceso embrionario" (Diccionarios-Online, 2013a).

**Díptero:** "Insecto con solo dos pares de alas funcionales" (Educarchile, 2013).



**Eclosionar:** se le llama así a la “salida de la cría de su huevo o la crisálida de su capullo, al romper la pared de este” (Wikcionario, 2013).

**Enfermedades criptogámicas:** “es una enfermedad causada a una planta por un hongo u otro organismo filamentosos (caso de los oomycetes) parásito. Cuando es un animal el afectado, se habla en su lugar de micosis” (Noemí, 2011).

**Entropía:** “es una magnitud física, que permite determinar la parte de la energía que no puede utilizarse para producir trabajo” (Wikipedia, 2013c).

**Estafilínidos:** es una de las familias más grande del orden de los escarabajos. “Su tamaño oscila entre 0.5 y 50 mm, aunque la mayoría miden entre 2 y 10 mm” (Wikipedia, 2013d).

**Estanqueidad:** “sistema de protección para evitar el paso de agua, a través de una construcción o de los elementos constructivos exteriores” (Construmática, 2013).

**Estilete:** “estructuras como una aguja o un pequeño estilo, ubicada en el término del abdomen y, a veces, en las partes bucales de insectos picadores-succionadores” (Infojardin, 2013).

**Estrés:** “factor externo a la planta, provocado por el medio ambiente cambiante, que ejerce una influencia negativa sobre su crecimiento y desarrollo” (Raffo, 2004).

**Festuca:** “la planta tiene una altura de unos 20 cm, aunque, cuando florece, puede alcanzar los 40 cm de altura” (Guía verde, s.f.).

**Fitoquímica:** “ciencia responsable del estudio de los componentes químicos de los vegetales” (La Guía, 2013).

**Fotoperíodo:** “conjunto de procesos de las especies vegetales, mediante los cuales regulan sus funciones biológicas (como, por ejemplo, su reproducción y crecimiento), al usar como parámetros, la alternancia de los días y las noches del año y su duración según las estaciones y el ciclo solar” (Zegarra, 2011).

**Herrumbrosas:** plantas “de color amarillo rojizo” (WordReference, 2013b).

**HMI:** “interfaz de usuario, por sus siglas en inglés, *Human Machine Interface*, se usa para referirse a la interacción entre humanos y máquinas” (Wikipedia, 2013h).

**Humedad relativa:** “es el cociente entre la humedad absoluta y la cantidad máxima de agua, que admite el aire por unidad de volumen. Se mide en tantos por ciento y está normalizada de forma que, la humedad relativa máxima posible es el 100 %” (Juarez, s.f.).

**Larvas:** “las larvas son las fases juveniles de los animales con desarrollo indirecto (con metamorfosis) y que tienen una anatomía, fisiología y ecología diferente del adulto” (Wikipedia, 2013f).



**Micropropagación:** “es el conjunto de técnicas y métodos de cultivo de tejidos utilizados, para multiplicar plantas asexualmente en forma rápida, eficiente y en grandes cantidades” (Rosales, 2005).

**Módulo SNAP I/O:** Módulos de entradas y salidas propio de *Unitronics*<sup>®</sup>.

**Nimodbus**<sup>®</sup>: librería de *LabVIEW*<sup>®</sup>, proporcionada de manera gratuita por *National Instruments*, para el manejo del protocolo *Modbus*.

**Ninfa:** “estado intermedio en la metamorfosis de algunos insectos, situado entre la fase larvaria y la adulta” (*The free dictionary by Farlex*, 2013).

**Offset:** Constante alrededor de la cual, se supone que, variará una señal.

**Polífaga - polífago:** “patrón de alimentación, en el cual muchas especies hospederas son consumidas” (Hruska y Gladstone, 2003).

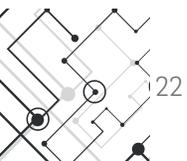
**Quelíceros:** piezas bucales terminadas en pinzas y, a veces, con glándulas venenosas (*Cyclopaedia*, 2013).

**Radiación fotosintéticamente activa:** también es conocida como PAR o *Quantum* y “hace referencia a la cantidad de radiación que es capaz de producir la actividad fotosintética en las plantas y otros organismos fotosintéticos, como microalgas y bacterias. El rango de longitudes de onda está comprendido aproximadamente entre los 400 y los 700 nanómetros” (Infoagro, 2011b).

**RTU:** de sus siglas en inglés *Remote Terminal Unit*, “define a los dispositivos basados en microprocesadores, de los cuales permite obtener señales independientes de los procesos y enviar la información a un sitio remoto donde se procese” (Wikipedia, 2013i).

**Sumidero:** “es un tipo de dolina circular, que actúa como desagüe natural para el agua de lluvia para corrientes superficiales como ríos o arroyos” (Wikipedia, 2013g).

**Tisanópteros:** “orden de pequeños insectos delgados con cuatro alas membranosas iguales, de escasa nervación y con el borde franjeado de pelos; tienen metamorfosis sencilla” (Universidad Salamanca, 2011).



## Resumen

La temperatura, la humedad relativa (HR) y la luz son variables que influyen en el desarrollo de plantas e insectos y afectan considerablemente su desarrollo. El estudio del efecto de diferentes estímulos sobre plantas y animales es posible bajo condiciones controladas, cuando se regulan las variables en cuestión.

A través de este proyecto se busca obtener un controlador de temperatura y HR, dentro de una cámara de la que dispone el Grupo de Investigaciones Agroindustriales (GRAIN), inicialmente, utilizada como recinto de maduración de cárnicos, que permita crear ambientes adecuados para el crecimiento de plantas e insectos, con el fin de tener un mejor control sobre las condiciones de desarrollo, a la hora de llevar a cabo experimentos de interés para la agroindustria.

Como producto final se obtuvo una interfaz gráfica, tanto en el PLC como en el PC, que permitió establecer unas condiciones determinadas de temperatura como de HR en el interior del recinto, con y sin la necesidad de utilizar un computador externo, para realizar el control. *Copyright © UPB 2017*

**Palabras clave:** ambiente, control, interfaz gráfica, luz, plantas, temperatura.



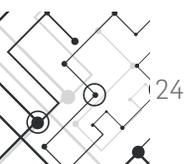
## Abstract

The temperature, the relative humidity (HR) and the light are variables that influence the development of plants and insects and affect considerably their own development. The study of the different stimulus's effect on plants and animals is possible under controlled conditions when the variables in question are regulated.

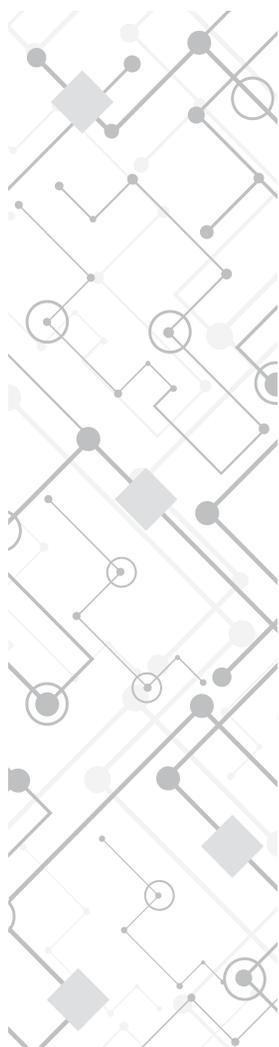
With this project we aim to obtain a suitable controller of temperature and relative humidity in a chamber, property of the Grupo de Investigaciones Agroindustriales (GRAIN), formerly used as meat maturation facility, in a way that ensures the proper environment for plants and insects, in order to obtain a better control over its development when experiments are made over them.

As a final product we obtained a graphic interface in both the PLC and the PC, which allows the user to set certain conditions of temperature and HR inside the chamber, with and without the requirement of an external computer for doing the control of these variables.

**Keywords:** control, environment, graphic display, light, plants, temperature.



## Introducción



La temperatura, el porcentaje de humedad relativa, la intensidad lumínica y la concentración de  $\text{CO}_2$  son variables críticas para favorecer o limitar el desarrollo de plantas e insectos. "Para que las plantas puedan realizar sus funciones es necesaria la conjunción de estos factores dentro de unos límites máximos y mínimos, fuera de los cuales las plantas cesan su metabolismo" (Infoagro, 2011a), lo que les puede llegar a causar la muerte. Estos factores no solo afectan a las plantas, sino, también, a los insectos que habitan en ellas, debido a que estas plantas hospederas, al ser sometidas a estrés de temperatura y humedad relativa, sufren modificaciones en su arquitectura, la estructura de sus órganos, su fisiología y composición bioquímica, lo que hace necesario el control de esos elementos, para permitir la supervivencia de diferentes plantas e insectos, dentro de ambientes controlados.

Las plantas presentan una curva de respuesta a la temperatura, donde se determina una tasa de crecimiento máximo y un rango de temperatura máximo y mínimo,

por fuera del cual su desarrollo se detiene (Raffo, 2004), razón por la cual, el control de esta variable es un factor decisivo respecto a su crecimiento. Estos valores de temperatura varían al depender de la especie y de la etapa de desarrollo en la que se encuentre, lo que afecta directamente a las plantas en sus funciones de fotosíntesis, respiración, permeabilidad de la membrana celular, absorción de agua y nutrientes, transpiración y actividades enzimáticas, entre otras.

“En términos fisiológicos, un insecto debe acumular cierta cantidad de calor para poder desarrollarse” (Marco, 2001). El aumento de la temperatura en que se desarrolla una especie de insecto acelera su tasa de desarrollo y, por consiguiente, aumenta el número de generaciones que tiene durante el año (Mejía, 2005). Desde luego, este comportamiento puede ser diferente en muchas especies, pero ocurre así de forma general (Brodsky y Naranjo, 1976). Además, a temperaturas superiores a las adecuadas, los porcentajes de mortalidad son muy elevados, lo que dificulta los estudios que se puedan realizar a altas temperaturas, las cuales son conocidas como el umbral máximo de desarrollo.

A partir de esta información, surge la idea por parte del Grupo de Agroindustrial GRA-IN de generar un entorno adecuado para la supervivencia de plantas e insectos, a través de una Cámara de ambiente controlado. Este grupo posee una Cámara de

maduración cárnica, que puede ser acondicionada para el nuevo propósito de crecimiento controlado de plantas e insectos, al tener en cuenta variables críticas como la humedad y la temperatura. El control a aplicar sobre estas variables debe tener en cuenta las condiciones ambientales y las diferentes cargas térmicas que se pueden generar, agregar o extraer del interior del espacio que se desea controlar.

Se diseñó un control adecuado de temperatura, humedad relativa e iluminación, con algún grado de robustez ante perturbaciones, lo que permitió usar estos factores tan decisivos para el desarrollo de plantas e insectos a su favor, al lograr evitar el estrés en las plantas y la muerte, debido a altas temperaturas de los insectos, junto con un crecimiento adecuado y estable de los mismos.

El control de temperatura y humedad relativa implementado tuvo en cuenta los sistemas de calefacción, refrigeración y nebulización, la ubicación de los mismos, dimensiones de la cámara, ubicación geográfica del recinto, sistemas de ventilación y el aislamiento de los diferentes componentes mencionados anteriormente. Con la apropiada ubicación y selección de estos dispositivos es posible lograr una temperatura y humedad uniforme en todo el recinto o cambios despreciables de estas variables dentro del mismo, acercándolas o manteniéndolas en un valor de interés para un experimento determinado.

Sin embargo, las condiciones de la Cámara de maduración de la que se dispuso, no eran las adecuadas para permitir la supervivencia de seres vivos en un ambiente artificial. El grupo de investigación GRAIN planteó reconvertir esta cámara para propósitos de crecimiento controlado. Esto se realizó mediante técnicas de control, con el uso de los sensores y actuadores adecuados.

La cámara contaba con un control *ON-OFF* en todas sus variables, el cual no era adecuado para llevar a cabo los objetivos del proyecto, debido a que los actuadores que se tenían se sometían a ciclos de trabajos pesados, lo que llevaba a disminuir su vida útil considerablemente.

Se llevaron a cabo experimentos para conocer el comportamiento de la temperatura al interior de la Cámara de maduración. En la Figura 1, se puede ver que la temperatura presenta una oscilación de 3 °C, alrededor del valor de referencia escogido por el usuario, oscilación que puede llegar a ser considerable en condiciones ambiente, sobre todo, para los insectos, debido a que un entorno con una temperatura de 302 °C favorece la reproducción y supervivencia de los ácaros (Corredor *et al.*, s.f.). Además, debido a la propiedad que indica la cantidad de calor que puede conservar un cuerpo y la velocidad con la que cede o absorbe del entorno, llamada inercia térmica, las acciones de calefacción y refrigeración tienen retardos, que pueden generar condiciones inadecuadas para el desarrollo de los seres vivos, con los cuales se va a experimentar.

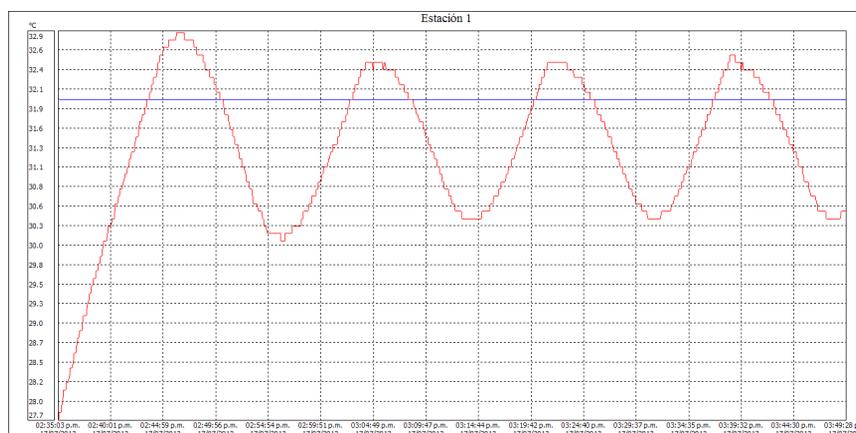


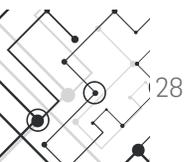
Figura 1. Temperatura (rojo) (°C) vs. tiempo (min), setpoint (32 °C) (azul).



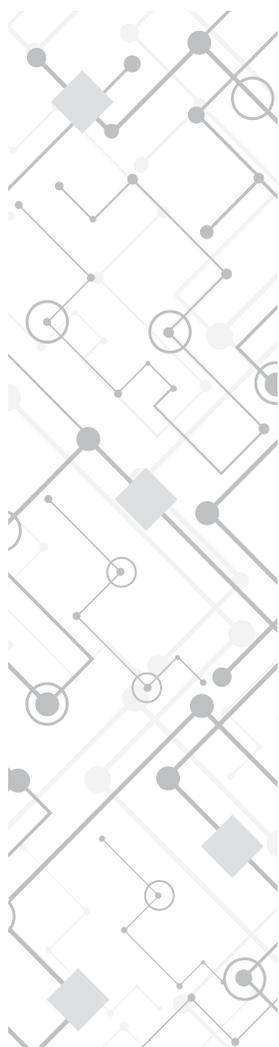
Gracias al contacto directo que se tuvo con la Cámara de maduración, se logró verificar que, efectivamente, el control *ON-OFF* hace que se presente un rizado y una oscilación en la variable controlada, lo cual se puede observar en el comportamiento mostrado en la Figura 1.

Los resultados de este trabajo de grado son de utilidad para posteriores estudios que, conlleven al diseño de nuevas estructuras, esquemas y mecanismos para la innovación y producción de diferentes tipos de ambientes artificiales efectuados en distintos recintos, en este caso, una Cámara de maduración, la cual es poco utilizada en nuestro país y no es producida a gran escala, por los grandes desafíos de control que implica.

Para alcanzar los resultados obtenidos en este trabajo de grado, se debieron cumplir unos objetivos propuestos al inicio del proyecto. Para el cumplimiento de estos objetivos fue necesario investigar de manera exhaustiva, todo lo referente a la parte de acondicionamiento de la Cámara de maduración, en lo que se refiere al cableado, conexiones, actuadores, detectores y sensores existentes y de allí proceder a determinar los elementos necesarios, para poder establecer y realizar los planos eléctricos. Con los planos eléctricos realizados, se procedió a efectuar la conexión y a aplicar los controles adecuados, lo que conllevó a que lo que antes era una Cámara de maduración de cárnicos, se convirtiera en una cámara, en donde pudieran sobrevivir plantas e insectos, una Cámara de ambiente controlado.



## 1. Estado del arte y planteamiento del problema resuelto



Las cámaras de ambiente controlado son recintos en los que se crean, de forma artificial, las condiciones necesarias para que se lleven a cabo algunas funciones de los seres vivos, como la micropropagación y el crecimiento de plantas, entre otras (Álvarez *et al.*, 2007). Las cámaras de ambiente controlado presentan un amplio rango de aplicaciones, como simulación ambiental, 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 otras.

Las cámaras de ambiente controlado se diseñan en función de cada aplicación, al tener en cuenta variables fundamentales, tales como: la capacidad de enfriamiento; la capacidad de calentamiento; la capacidad de humidificación; las dimensiones del recinto de ensayo; el formato, compacto o por paneles ensamblables; la masa sometida al tratamiento, conservación o ensayo; la disipación térmica del contenido; y variables adicionales, tales como: la existen-

cia de gases controlados (contaminación, renovación de emanaciones y atmósferas inertes...) y simulación solar, entre otros (CCI, 2009).

“Estos ambientes controlados resultan de gran utilidad, debido que facilitan la obtención de un producto en entornos diferentes a los habituales y durante diferentes estaciones climatológicas” (Álvarez *et al.*, 2007), pues permiten independizar el clima interno del externo.

Las cámaras de ambiente controlado deben contar con una fuente de frío, una de calor y un panel de iluminación, para poder obtener las condiciones de temperatura, humedad e iluminación, que simulan las del ambiente natural. Pueden manejar un amplio rango de temperaturas, para que cualquier atmósfera pueda ser simulada de forma constante, durante largos períodos de tiempo, junto con lámparas fluorescentes, que suplen la iluminación natural que necesitan las plantas (Álvarez *et al.*, 2007), pues les brindan la mayor parte del espectro de luz que requieren, para permitir su supervivencia dentro del recinto. La iluminación no debe ser continua, debido a que durante ciertos períodos, las plantas realizan la fotosíntesis y en los momentos de oscuridad realizan el proceso contrario a la fotosíntesis, denominado respiración. Ambos procesos son de vital importancia para el desarrollo y supervivencia de las plantas (Villego, 1996).

Generalmente, la fuente de frío es un sistema acondicionador de aire controlado por un termostato y la fuente de calor se compone de un conjunto de resistencias eléctricas de potencia suficiente. Ambos sistemas requieren un sistema de ventilación, que distribuya homogéneamente el aire en el área de cultivo de las plantas. El panel de iluminación está compuesto por lámparas, cuyo espectro de emisión es adecuado para el normal crecimiento y desarrollo de los cultivos. Dicho panel se encuentra separado del recinto de cultivo, por una estructura transparente de vidrios, que actúa como aislamiento térmico. Este aislamiento térmico no evita la necesidad de extraer, a través del acondicionador de aire, la carga de radiación lumínica introducida en la cámara, para permitir el crecimiento de las plantas (Cogliatti, 2008).

El desarrollo alcanzado en esta área ha permitido obtener una cámara solar de clima controlado que, permite solo el paso de la radiación fotosintéticamente activa, la cual logra disminuir la carga térmica y, por lo tanto, el consumo de energía por concepto de climatización (Álvarez *et al.*, 2007).

La mayoría de estos diseños tienden a incrementar la carga térmica en su interior (Álvarez *et al.*, 2007), por lo cual, la temperatura se considera una variable imprescindible que, puede someter al sistema a cambios bruscos y los puede llegar a afectar negativamente; por ejemplo, el crecimiento de las plantas, al someterlas



bajo el concepto denominado "estrés", el cual puede detener, no solo su crecimiento, sino, también, a afectar el desarrollo de un determinado tipo de insecto. El concepto de "carga térmica" hace referencia a la cantidad de energía que se necesita en un área, para conservar determinadas condiciones de temperatura y humedad, para una aplicación específica.

Entre la temperatura y la humedad existe una relación inversa, por lo que, a elevadas temperaturas, aumenta la capacidad del aire de contener vapor de agua y, por tanto, disminuye la humedad relativa (Infoagro, 2011a). Con temperaturas bajas, la humedad relativa aumenta. Cuando la humedad es excesiva, las plantas reducen la transpiración y disminuyen su crecimiento, se producen abortos florales por apelmazamiento del polen y un mayor desarrollo de enfermedades criptogámicas. Por el contrario, si es muy baja, las plantas transpiran en exceso, con lo que se ocasiona la deshidratación de las mismas (Ross y Salisbury, 1992), además de incrementar la tasa reproductiva, el desarrollo y favorecer la existencia de un determinado tipo de insecto.

La temperatura en el interior de la cámara no solo se ve afectada por la humedad, sino, también, por la temperatura ambiente del lugar donde se sitúe y el calor generado por las fuentes de luz de las que se disponga. La relación tan estrecha que existe entre estas cuatro variables fundamentales hace que su control sea indispensable, para permitir la supervivencia tanto de plantas

como de insectos dentro de ambientes controlados. Igualmente, el control de estas variables no debería realizarse de forma independiente, debido a que cambios en una significan cambios en otra, lo que complica el control con técnicas convencionales. En algunos casos, se controlan algunas de las variables, mientras que las otras se consideran perturbaciones.

Dentro de los sistemas clásicos de control, el más difundido es el *Proporcional-Integral-Derivativo* (PID).

En este, la sección proporcional (P) reacciona de acuerdo al error actual del sistema; el valor integral (I) genera su salida de acuerdo a la suma del error en el tiempo y la acción derivativa (D) determina la acción con base en la tasa de cambio temporal del error. El sistema PID es ampliamente utilizado y se emplea en sistemas de control de temperatura, humedad y velocidad de motores, entre otros (García y Palacio, 2010).

El proceso de optimización del sistema de control PID se lleva a cabo por medio del cálculo de las constantes del sistema,  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$ . Este proceso puede ser llevado a su primera aproximación por medio del modelamiento del sistema a controlar, proceso en el cual, generalmente, tiene un alto costo computacional. Este modelamiento permite predecir el comportamiento del sistema en el tiempo y, de esa forma, obtener un valor aproximado de las constantes.



Sin embargo, el ajuste final del sistema se realiza por medio del proceso de ensayo y error, lo que constituye en algunas situaciones una limitante del control PID (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. Esta es una forma de:

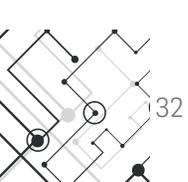
Lógica multivariada, que se basa en el razonamiento difuso. En contraste con la lógica digital, en la cual las variables tienen únicamente los valores uno y cero, las variables en lógica difusa pueden adoptar cualquier valor entre estos dos valores extremos. Este rango ampliado de valores les brinda a las variables difusas, la posibilidad de tener grados de pertenencia, porcentajes de verdad o permite calificar una afirmación en una escala más amplia que falsa o verdadera (García y Palacio, 2010).

En la actualidad, es posible encontrar cámaras de ambiente controlado que regulan las variables especificadas anteriormente y cuyo precio neto puede variar entre USD \$ 27060 y USD \$ 42240 para los modelos 30 *Cubic Foot Reach-In Chamber series 9130 and series 9530*, (Parameter Generation y Control, 2011), los cuales presentan las siguientes características:

- Rango de humedad relativa entre 10 % y 95 %.
- Límites de variación de la humedad relativa de 0.2 %.
- Uniformidad de la humedad relativa de 1 %.
- Rango de temperatura entre 5 °C y 85 °C.
- Límites de variación de la temperatura de 0.2 %.
- Uniformidad de la temperatura 0.2 %.
- Dimensiones externas de 54.5" 36" 79".
- Dimensiones internas de 34.5" 28.45" 52.5".

Además, las cámaras especificadas permiten incorporar componentes adicionales, tales como estantes de acero inoxidable, opción de secado y una tarjeta de registro, los cuales aumentan los precios mostrados anteriormente. Estos precios no incluyen transporte ni impuesto.

Estas cámaras son construidas por esta empresa ubicada en Carolina del Norte, USA, y traen, por defecto, un control PID. Pero este tipo de control no es el único utilizado en este mercado, los controles implementados por lógica difusa han logrado ganar terreno frente a los controles tradicionales, en lo que se refiere a ambientes controlados, como es el caso de la cámara de crecimiento vertical distribuida por la empresa Instrumentación Científico Técnica, la cual incluye tanto controles PID como por lógica difusa (I.C.T, S.L. Instrumentación Científico Técnica, 2012).



## 2. Descripción general de la cámara existente y sus posibilidades

### 2.1. Cámara de maduración

Se denomina maduración de productos cárnicos "al proceso de reposo, al que se somete la carne para su añejamiento progresivo, en ambientes de temperatura y humedad controladas, durante un período prolongado de tiempo" (Wikipedia, 2012b). Para dicho proceso se dispone de una Cámara de maduración climatizada.

La Cámara de maduración existente (ver Figuras 2 y 3) fue construida en acero inoxidable, para suplir la necesidad del procesamiento de 4 kg de producto. Por tal motivo, se debía contar con un espacio útil interior de 95 cm de profundidad, 9 cm de ancho y 59 cm de alto, junto con un espesor de 4 cm de poliuretano de alta densidad. La cámara existente tiene unas medidas exteriores de 70 cm de ancho, 170 cm de alto y 60 cm de profundidad (Barrios y Uribe, 2012). Se encuentra conformada por un sistema

de refrigeración por compresión mecánica, un sistema de calefacción por resistencia eléctrica, un sistema de humidificación por resistencias eléctricas sumergidas y un sistema de ventilación. La acción, en conjunto con todos los sistemas mencionados anteriormente, permite el control de la temperatura y de la humedad y, es gracias a ellos, que es posible hablar de la creación de ambientes artificiales.



Figura 2. Cámara de maduración para productos cárnicos existente. Reproducida con permiso de Isaza (2012).

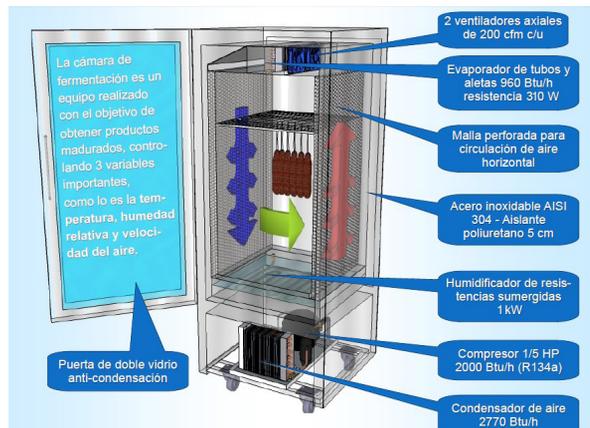


Figura 3. Póster Cámara de maduración para productos cárnicos existente. Reproducida con permiso de Isaza (2011).

### 2.1.1 Elementos de control para el buen funcionamiento de la Cámara de maduración

La Cámara de maduración que se acondicionó cuenta con un detector de nivel, una serie de indicadores luminosos, un interruptor selector de dos posiciones, un temporizador y un llenado automático con válvula solenoide. Cada uno de ellos representa una serie de precauciones, con el fin de evitar posibles daños en los diferentes sistemas instalados, además de mostrar el funcionamiento actual de los mismos, lo que permite percibir cuándo algo está mal y qué sistema es el afectado.



**Figura 4.** Interruptor selector de tipo muletilla de dos posiciones.

“Los interruptores eléctricos son dispositivos que sirven para desviar u obstaculizar el flujo de corriente eléctrica” (Bricos, 2013). En este caso, la cámara cuenta con un interruptor selector de tipo muletilla (ver Figura 4), el cual dispone de una perilla, que puede girarse entre dos posiciones

de maniobra claramente definidas, una de ellas permite el encendido del sistema de control y del sensor de humedad y temperatura existentes, mientras que la otra posición deshabilita lo anteriormente mencionado, lo que impide el funcionamiento de la Cámara de maduración.

Los elementos indicadores permiten la interacción del usuario con el equipo. El usuario puede saber de forma inmediata, si un equipo se encuentra apagado o encendido, o si funciona de manera correcta o incorrecta (Bitsingenio, 2011), con tan solo observar el estado de los indicadores al momento de dar una orden. En este caso, se cuenta con una serie de indicadores luminosos (ver Figura 5) para el sistema de refrigeración, de calefacción, de humidificación y para indicar el nivel de agua de este último. Con relación a los sistemas, estos indicadores muestran cuál de ellos se encuentra encendido o apagado, mientras que, para referirse al nivel de agua, el indicador relacionado a este se enciende cuando el depósito de agua se encuentra vacío o con un bajo nivel de agua, alerta para no utilizar el sistema de humidificación, debido a que puede generar posibles daños en la resistencia por sobrecalentamiento.

Se le llama detector a un dispositivo que solamente es capaz de distinguir entre dos posibles valores o estados del sistema que se mide y transformarlos en variables eléctricas. En este caso, se cuenta con un detector de nivel (ver Figura 6), que se encarga de vigi-



Figura 5. Indicadores luminosos instalados en la Cámara de maduración.



Figura 6. Detector de nivel.

lar constantemente el nivel de agua del sistema de humidificación. Dicho detector cumple una función de protección, debido a que gracias a él se activa el indicador luminoso de nivel de agua y, de esta manera, el usuario entiende que dicho sistema no se debe activar, con el fin de evitar el daño del mismo. La acción del detector y del indicador no limitan el uso del sistema de humidificación, es decir, alguien que no se encuentre relacionado con este funcionamiento podría activar dicho sistema, así el indicador se encuentre activado.

Dicho detector tiene asociado un temporizador de marca Autonics ATE (ver Figura 7), con el fin de evitar falsas alarmas, debido a la superficie irregular del agua. De esta manera, es posible obtener lecturas más confiables, pues al activarse este detector, el temporizador espera unos cuantos segundos, para volver a revisar el estado del detector y tomar la decisión si activar o no, el indicador luminoso asociado a este.

Además, a este detector de nivel se encuentra ligada una válvula solenoide, que permite o no el paso de agua al activarse o desactivarse el detector de nivel, esto quiere decir que, si este detector indica que el nivel de agua está bajo, este energiza la válvula solenoide, para que esta se abra y permita el paso del agua, cuando el detector de nivel deja de indicar que está bajo el nivel de agua, se desenergiza esta válvula y se cierra, al obstruir el paso del agua. Lo anterior se conoce como un llenado automático (ver Figuras 8 y 9).

A través de este proyecto se le dio una mayor seguridad al sistema de humidificación, al enclavar el detector de nivel con el encendido de la resistencia del humidificador, de tal manera que, cuando el nivel de agua se encuentre en nivel bajo, no permita su encendido y se logre proteger la resistencia de un posible daño.



Figura 7. Temporizador Autonics ATE.



Figura 8. Llenado automático con válvula solenoide (parte superior Cámara de maduración).



Figura 9. Llenado automático con válvula solenoide (parte inferior Cámara de maduración).

Además del detector de nivel, la Cámara de maduración cuenta con otro par de sensores: uno de temperatura y uno de humedad (ver Figura 10), ambos propios de Full Gauge, para funcionar en conjunto con el controlador Humitech Super. Gracias a ellos, es posible conocer las condiciones actuales en el interior de la cámara y las variaciones ocasionadas por los diferentes sistemas, que esta posee al conectar o desconectar uno de ellos.

El sensor de temperatura consiste en una NTC 10K y tiene un rango de medición entre  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mientras que el sensor de humedad se basa en uno capacitivo y presenta un rango de medición entre 0 % y 100 % de humedad relativa sin condensación. Ambos sensores fueron diseñados para trabajar específicamente con la gama



Figura 10. Sensor de humedad y temperatura Cámara de maduración.

de controladores de *Full Gauge*, motivo por el cual se tomó la decisión de cambiarlos, al no cumplir con las características técnicas necesarias, para que el PLC logre hacer lectura de los datos sensados.

### 2.1.2 Sistema de refrigeración

La refrigeración es un proceso por el cual se puede obtener y mantener un lugar aislado, a una temperatura inferior a la del medio ambiente. Esto es posible gracias a la absorción o extracción del calor del recinto, fluido o producto que se desea enfriar (Cooperativa de Mejoramiento Genético, 2004), desde un nivel de temperatura baja hacia uno más alto. Dicha extracción o absorción se logra gracias a los sistemas frigoríficos o sistemas de refrigeración.

Los sistemas de refrigeración:

Corresponden a arreglos mecánicos que utilizan las propiedades termo-

dinámicas de la materia, para trasladar energía térmica en forma de calor entre dos o más focos, conforme se requiera. Están diseñados primordialmente para disminuir la temperatura del producto almacenado en cámaras frigoríficas o cámaras de refrigeración (Wikipedia, 2012c).

Existen dos tipos de sistemas de refrigeración: refrigeración por compresión y refrigeración por absorción, sistemas que se diferencian entre sí, principalmente, en el tipo de energía que consumen, debido a que mientras el sistema de refrigeración por compresión consume energía mecánica, el sistema de refrigeración por absorción consume energía térmica (Gas Natural Fenosa, 2013). En este caso, la Cámara de maduración existente dispone de un sistema de refrigeración por compresión.

En el ciclo de refrigeración por compresión:

Un líquido que se evapora a presión constante proporciona un medio para la absorción de calor a una temperatura baja constante. El vapor producido se comprime a una presión mayor y, en seguida, se enfría y condensa con el desprendimiento de calor a un nivel de temperatura más elevado. El líquido del condensador regresa a su presión original por un proceso de expansión. En principio, es posible llevar a cabo este proceso en un dispositivo que permite expandir y, a partir del cual, se obtiene tra-

bajo, pero por razones prácticas, se acostumbra a realizarlo por estrangulamiento, a través de una válvula parcialmente abierta. La caída de presión en este proceso irreversible es el resultado de la fricción del fluido de la válvula (Abbott *et al.*, 2007).

El ciclo de refrigeración por compresión mecánica (ver Figura 11) consta de cuatro componentes principales: el evaporador (ver Figura 12 y Tabla 1), el compresor, el condensador y el dispositivo de expansión.

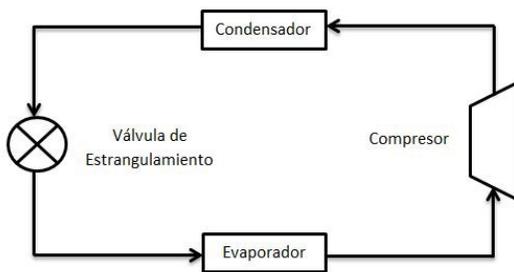


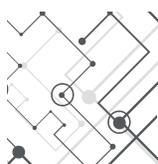
Figura 11. Ciclo de refrigeración por compresión de vapor.



Figura 12. Evaporador.

Tabla 1. Especificaciones técnicas del evaporador.

Característica	Especificación técnica
Marca	Thermocoil
Modelo	EM-SRD-1
Capacidad	1850 BTU/h
Largo	343 mm
Alto	102 mm
Ancho	132 mm
Caudal	235 cfm



El evaporador es el:

Intercambiador de calor ubicado dentro del recinto que se desea enfriar, al cual el refrigerante entra en estado líquido o mayoritariamente líquido a baja presión y, por consiguiente, a una baja temperatura de ebullición. Al entrar en contacto con las paredes del evaporador, comienza su evaporación con la consiguiente absorción de calor. Dicha absorción provoca el enfriamiento de las paredes del evaporador y, por consiguiente, el enfriamiento del medio que lo rodea. A la salida del evaporador nos encontramos con vapor refrigerante a baja presión que se encuentra "cargado" con la energía térmica absorbida por las paredes de este aparato y por el medio ambiente (Cooperativa de Mejoramiento Genético, 2004).

Este vapor refrigerante entra al compresor (ver Figura 13 y Tabla 2), en el que se comprime a alta presión. Esta presión debe estar por debajo de la presión crítica del refrigerante, pero, a su vez, debe ser lo suficientemente alta, como para permitir la condensación del refrigerante, a una temperatura ligeramente superior a la del aire ambiente. Esta compresión ocurre a una entropía constante. Conforme la presión del refrigerante aumenta, lo hace también su temperatura y este se sobrecalienta. El vapor sobrecalentado se lleva al condensador (ver Figura 14 y Tabla 3):

El segundo intercambiador de calor, fundamental dentro del sistema. Tiene por fina-

lidad condensar los vapores refrigerantes a alta presión provenientes del compresor. La condensación de estos vapores significa convertirlos en líquidos y, para ello, debemos extraerles calor, o sea, enfriarlos. El calor retirado de los vapores refrigerantes en este elemento, es el mismo calor que se absorbió en el evaporador, más una pequeña cantidad aportada al refrigerante, por el funcionamiento del compresor. El calor extraído del refrigerante es entregado al medio ambiente, ya sea por enfriamiento de este elemento, mediante agua o aire. A la salida del condensador nos encontramos con líquido refrigerante a alta presión" (Cooperativa de Mejoramiento Genético, 2004).

El líquido refrigerante a alta presión entra a continuación a la válvula de expansión (ver Tabla 4), la cual se encarga de reducir la presión del líquido refrigerante que viene del condensador y llevarlo al evaporador como un líquido a baja presión, de esta manera el ciclo comienza nuevamente. En algunos casos, actúa como un regulador al controlar la cantidad de líquido que entra al evaporador (Cooperativa de Mejoramiento Genético, 2004).

El desempeño de los refrigeradores depende, en cierta medida, del refrigerante.

Características tales como su toxicidad, inflamabilidad, costo, propiedades de corrosión y presión de vapor, con respecto a la temperatura, son de gran importancia en la selección

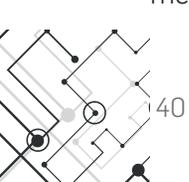


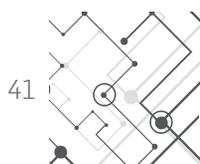


Figura 13. Compresor.

Tabla 2. Especificaciones técnicas del compresor.

Característica	Especificación técnica
Marca	Tecumseh
Modelo	AED3425YXA (AEZ3425Y)
Tipo	Reciprocante
Refrigerante	R-134A
Voltaje	115 V
Frecuencia	60 Hz
Número Fases	1
Capacidad de refrigeración	2515 Btu/h
Potencia	333 W
Eficiencia	7.55 Btu/Wh
T. Evaporación (rango)	-6.7 °C a 12.8 °C
T. Condensación	45 °C
T. Líquido	45 °C
Peso	9.484 kg

Continúa



Característica	Especificación técnica
Desplazamiento	7.6 CC
Tipo de aceite	Poliéster
Viscosidad	32 cSt
Carga de aceite	250 CC
Resistencia del motor (arranque)	10.1 Ohm
Resistencia del motor (principal)	2.03 Ohm
Tipo de motor	RSIR



Figura 14. Condensador.

Tabla 3. Especificaciones técnicas del condensador.

Característica	Especificación técnica
Marca	Thermocoil
Modelo	CT-00027
Referencia comercial	1/5 HP 2x9
Capacidad	2770 BTU/h

Continúa

Característica	Especificación técnica
Largo	266.6 mm
Alto	239 mm
Ancho	85 mm
Caudal	300 cfm

del refrigerante. Para que el aire no pueda filtrarse hasta el sistema de refrigeración, la presión de vapor del refrigerante a la temperatura del evaporador deberá ser mayor que la presión atmosférica. Por otra parte, la presión del vapor a la temperatura del condensador no debe ser excesivamente alta, debido al costo inicial y al gasto de operación del equipo de alta presión (Abbott *et al*, 2007). La selección del refrigerante depende de las diferentes características mencionadas, en este caso, se utilizó el refrigerante R-134A (ver Tabla 5), el cual no afecta la capa de ozono. "Tiene gran estabilidad térmica y química, una baja toxicidad y no es inflamable" (Barrios y Uribe, 2012).

Tabla 4. Especificaciones técnicas de la válvula de expansión.

Característica	Especificación técnica
Marca	Danfoss
Tipo	Igualación interna
Diámetro en la entrada	3/8"
Diámetro en la salida	1/2"
Refrigerante	R-134A
Capacidad	1/4" Tonelada

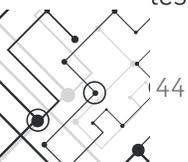
Tabla 5. Propiedades físicas del refrigerante R-134A.

Propiedades físicas	(Unidad)	R-134A
Peso molecular	(kg/Kmol)	102
Punto de ebullición	(°C)	-26.2
Punto de congelación	(°C)	-103
Temperatura crítica	(°C)	101.1
Presión crítica	(bar)	40.67
Densidad crítica	(kg/l)	0.51
Densidad del líquido (25 °C)	(kg/l)	1.206
Densidad del líquido (0 °C)	(kg/l)	1.293
Densidad de vapor (25 °C)	(kg/m <sup>3</sup> )	3.25
Densidad de vapor (0 °C)	(kg/m <sup>3</sup> )	14.41
Presión de vapor (25 °C)	(bar)	6.657
Presión de vapor (0 °C)	(bar)	216.4
Calor específico del líquido (25 °C)	(Kj/kg K)	1.44
Viscosidad del líquido (25 °C)	(cP)	0.202
Presión superficial	(mN/m)	7.9
Solubilidad del R-134A en agua	(%)	0.15

### 2.1.3 Sistema de calefacción por resistencia eléctrica

“Un sistema de calefacción permite elevar la temperatura de un determinado espacio en relación con la temperatura ambiental exterior” (Sistemas de calefacción, 2012), para generar unas condiciones ambientales específicas.

Al momento de escoger un sistema de calefacción determinado entre los diferentes sistemas existentes, es fundamental considerar ciertas variables, para que los mismos resulten eficientes, al ser la zona geográfica en el que está ubicado, el espacio donde se va a instalar el sistema de calefacción; la primera de las condiciones a atender, seguido por las dimensiones del



mismo, junto con su ubicación en cuanto a su orientación geográfica. Finalmente, se debe tener en cuenta si existe la necesidad de proporcionar calor a todo el espacio o solo a sectores, por lo que se deberá optar por un sistema centralizado o independiente o aquellos que poseen la capacidad de regulación individual por ambientes (Sistemas de calefacción, 2012). En este caso, se debe proporcionar calor a todo el espacio disponible, además, al no encontrarse ubicado en zonas climáticas, en donde la temperatura desciende bajo cero, no se necesita de un sistema de calefacción "muy potente".

La Cámara de maduración existente dispone de un sistema de calefacción eléctrico, el cual consiste en convertir la electricidad a calor, a través de una resistencia eléctrica. Este tipo de calefacción presenta las siguientes ventajas, en relación con los demás sistemas de calefacción:

- Presenta un uso eficiente de energía.
- La calefacción eléctrica es limpia. No existe combustión, humos, residuos ni olores; no consume oxígeno y no enfría el ambiente.
- La electricidad es segura, no necesita almacenamiento con el consiguiente riesgo de filtraciones y de explosión, y los equipos no requieren obras de instalación ni mantenimiento.

- Su rendimiento es muy elevado, por lo que aprovecha, prácticamente, toda la energía eléctrica que se consume.
- No exige instalaciones complicadas ni espacios dedicados a las mismas, tales como: sala de calderas, depósito de combustible y chimeneas, entre otros.
- Se puede automatizar y programar con gran sencillez.
- Ventajas como las mencionadas anteriormente, hacen muy llamativa dicha calefacción a la hora de utilizar este tipo de sistemas.

Para este tipo de calefacción, lo más aplicable es la instalación de una resistencia aleada para aire forzado (ver Figuras 15 y 16). Para la Cámara de maduración existente se seleccionó una resistencia eléctrica con capacidad de 310 W, de 40 cm de largo y 5 cm de ancho (Barrios y Uribe, 2012).



Figura 15. Resistencia eléctrica por aire forzado de 310 W.

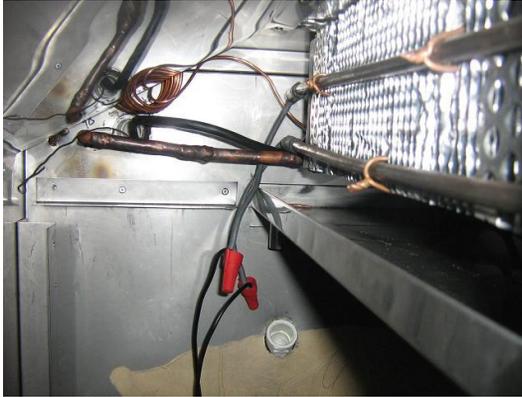


Figura 16. Resistencia eléctrica por aire forzado de 310 W en la Cámara de maduración.

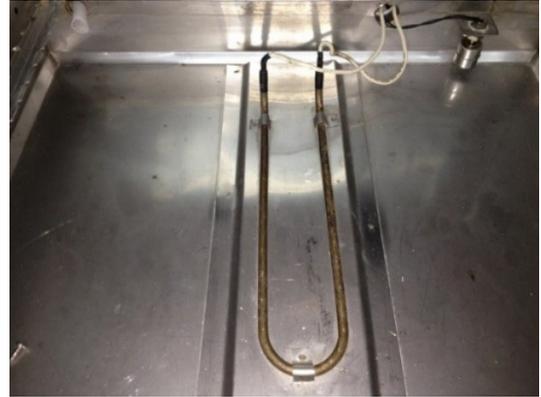


Figura 17. Humidificador por resistencia eléctrica sumergida de 1 kW.

#### 2.1.4 Sistema de humidificación

Para realizar un control adecuado de humedad que sea económico, eficaz y que no vaya causar ningún trastorno, tanto a los seres vivos como a los materiales que se encuentran o conforman un sistema determinado, se debe contar con un equipo de humidificación, el cual, simplemente, se encarga de adicionar agua al aire (Translímite, 2012).

En este caso, la Cámara de maduración cuenta con un sistema de humidificación por resistencias sumergidas (ver Figura 17), el cual se encarga de calentar “el agua hasta su punto de ebullición por transferencia de calor, desde el elemento calefactor (resistencia eléctrica) al líquido. Pueden funcionar con agua desmineralizada, porque no aprovechan la conductividad eléctrica del agua y el mantenimiento pe-

riódico puede ser, por lo tanto, muy reducido, con la mínima formación de depósitos calcáreos” (Carel, 2012).

Para evitar el recalentamiento de los elementos resistivos se debe contar con detectores que indiquen el estado del nivel del agua, en donde estos se encuentran sumergidos. Si se desea controlar el vapor de agua generado por este tipo de sistemas, se debe contar con diferentes componentes, tales como los relés, que permitan aplicarle la potencia eléctrica con un *duty cycle* variable, durante un ciclo de trabajo definido (Carel, 2012).

#### 2.1.5 Sistema de ventilación

“Los sistemas de ventilación son un conjunto de dispositivos y ductos que facilitan y permiten la renovación y circulación del aire dentro de una construcción” (Quimi-

Net, 2012). Gracias a estos sistemas se logra la distribución homogénea del aire en una zona o espacio determinado, además de ayudar a mantener condiciones uniformes, tanto de humedad relativa como de temperatura dentro del recinto, de esta manera es posible "asegurar" unas condiciones climáticas en un espacio determinado.

Generalmente, las cámaras climáticas convencionales cuentan con sistemas de ventilación vertical de abajo hacia arriba, los cuales son susceptibles a los cambios de operación, al depender de la distribución de los productos en el interior del equipo (Barrios y Uribe, 2012).

La Cámara de maduración existente plantea un sistema de ventilación (ver Figura 18), en donde se da una presión de alimentación positiva en el lado derecho de ella, una presión de retorno negativo en el lado izquierdo, con el fin de lograr la distribución del flujo de aire de manera uniforme en toda la cámara (Barrios y Uribe, 2012).

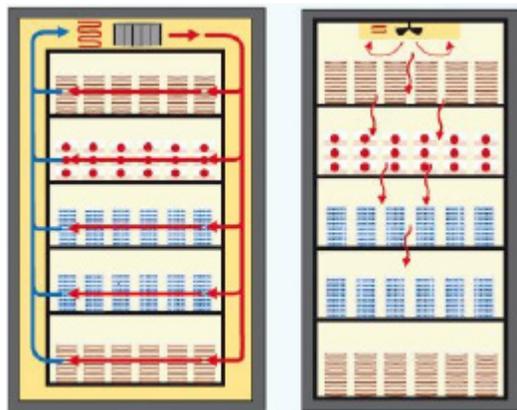


Figura 18. Circulación horizontal y vertical. Reproducida con permiso de Barrios y Uribe (2012).

"Esta combinación dirige el aire a través de la superficie de una lámina perforada. Incluso, cuando se llena de producto el equipo, cada nivel recibe un flujo constante de aire" (Barrios y Uribe, 2012), en condiciones uniformes para un control adecuado de temperatura y humedad relativa.

Este sistema de ventilación implementado cuenta con una serie de ventiladores AC de 200 cfm (ver Figuras 19 y 20).



Figura 19. Ventiladores vista interna.

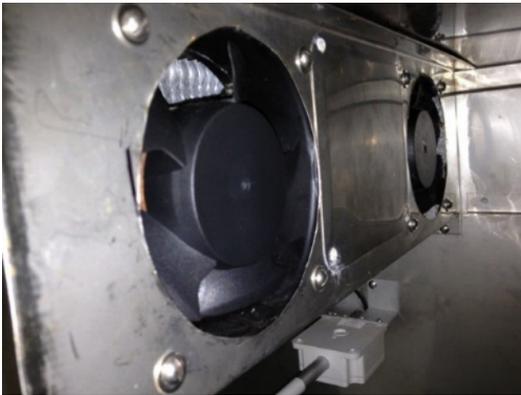


Figura 20. Ventiladores vista externa.

## 2.2. Cámaras de ambiente controlado

Una Cámara de ambiente controlado "es una habitación aislada del exterior, donde se pueden controlar y variar diversos factores ambientales" (González, 2008) como la temperatura, la humedad relativa, la presión atmosférica, la contaminación ambiental, el flujo de aire y la intensidad luminosa, entre otros, los cuales permiten controlar y crear diversos ambientes artificiales, dentro de unos rangos establecidos por los diferentes actuadores que conforman dicha Cámara de ambiente controlado. En este tipo de cámaras se pueden introducir sujetos de estudio durante un tiempo determinado, con el fin de analizar sus respuestas a la exposición de un ambiente determinado, creado en el interior de la cámara (González, 2008).

Las cámaras de ambiente controlado, además de ser capaces de reproducir las diferentes condiciones climáticas que se pueden producir en la naturaleza, mediante la generación controlada de los parámetros de frío, calor y humedad, permiten realizar la simulación de condiciones extremas, por medio de la generación de nieve, hielo, deshielo, condensación y secado, entre otras, junto con sus combinaciones térmicas (CCI, 2012a).

Una Cámara de ambiente controlado puede llegar a tener un tamaño muy pequeño o muy grande, todo depende del tipo de prueba o ensayo a realizar y del tamaño y la cantidad de las muestras con las que se va a trabajar (Laboratorio de Investigación Aplicada y Desarrollo, 2012).

Las cámaras de ambiente controlado permiten realizar ensayos a escala de laboratorio de diferentes tipos de materiales, sistemas e instrumentos y estabilidad de productos, entre otras aplicaciones, bajo la acción de diversas condiciones climáticas de frío, calor y humedad. En general, se utilizan en todas las aplicaciones de la industria y la investigación (CCI, 2012b).

Dentro de los diferentes ensayos que son posibles realizar a escala de laboratorio, tanto para conocer el comportamiento de las especies animales y vegetales bajo diversas condiciones ambientales, como para evaluar el grado de resistencia de los materiales, automatismos y sistemas en condiciones adversas, control de calidad, determinar fechas de caducidad de productos y ensayar el cultivo y crecimiento de especies vegetales, poseen una mayor importancia las cámaras de ensayos climáticos y de simulación ambiental, sobre las diseñadas para otras aplicaciones diferentes a esta, como las mencionadas anteriormente (CCI, 2011).

Para el control de calidad y la investigación es de suma importancia, tanto la simulación de las condiciones climáticas a escala de

laboratorio, como los diferentes aspectos relacionados con la naturaleza de los especímenes y su interacción con las variables físicas y químicas del entorno en que se encuentren (CCI, 2011), aplicación para la cual se tiene destinada la cámara a acondicionar.

En los ensayos climáticos es muy importante el elemento que se va a poner a prueba, debido a que este determinará el tipo de cámara a utilizar. Las características más importantes a tener en cuenta son el campo de aplicación y el tamaño, sin embargo, al depender de las dimensiones de la muestra, la cámara a utilizar variará.

Lógicamente, las cámaras climáticas o de ambiente controlado no son todas iguales ni sirven para lo mismo. Se debe saber de antemano qué es lo que el cliente quiere ensayar y cuáles son las características de ese ensayo, con el fin de adaptar la cámara al cliente y no el cliente a la cámara.

### 2.2.1 Tipos de cámaras de ambiente controlado

Las cámaras de ambiente controlado se construyen para aplicaciones específicas. Estas cámaras existen bajo ciertos estándares que difieren en cuanto al volumen que manejan, al tipo de fuente de luz y de radiación que utilizan, a los tiempos de exposición, a la cantidad de radiación, a los tipos de muestras y a los sensores que usan, entre muchas otras características; de esta manera se logran obtener



resultados confiables y exactos a la hora de utilizar estas cámaras, para una aplicación determinada.

Existen muchas cámaras de ambiente controlado que se enfocan en una aplicación o ensayo determinado, pero, generalmente, existen dos tipos de cámaras que dependen principalmente del volumen de la muestra que se va a poner a prueba y de la ubicación o condiciones del recinto, donde va a ser instalada dicha cámara. Estos tipos de cámaras se mencionan y describen a continuación.

**2.2.1.1 Cámaras compactas.** Cámaras diseñadas para manejar muestras de tamaño pequeño-mediano (volumen  $<1 \text{ m}^3$ ) con un buen aislamiento térmico. Controlan humedad y temperatura en un amplio rango (Guirao, 2009) y son construidas en materiales no ferrosos. Este tipo de cámaras de ambiente controlado son modelos estandarizados con una capacidad de almacenamiento, que va desde los 81 hasta los 2000 litros (Dycometal, 2012).

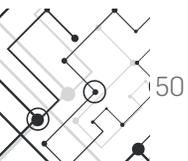
**2.2.1.2 Cámaras Walk-in.** Una cámara Walk-in (ver Figura 21) es un recinto cerrado, cuyas dimensiones permiten el acceso, tanto de personas como de grandes equipamientos o masas, mediante rodadura en su interior. Este tipo de cámaras permiten crear dentro de ellas diferentes condiciones climáticas, con el fin de realizar acondicionamientos, tratamientos, ensayos e investigaciones de equipos y sistemas y

mantener en condiciones ambientales controladas, diferentes sustancias y masas determinadas, debido a que los paneles que la conforman dan un aislamiento térmico y la estanqueidad suficiente (CCI, 2008).



Figura 21. Cámaras climáticas modulares tipo Walk-in.

Este tipo de cámaras de ambiente controlado son utilizadas para realizar acondicionamientos climáticos a grandes masas, simulaciones ambientales, tratamientos térmicos, conservación y congelación de productos, ensayos de control de calidad e investigación multidisciplinar, caracterizadas por su aislamiento térmico optimizado, su robustez y estabilidad, la facilidad de montaje y desmontaje, la estanqueidad, la construcción resistente a la corrosión



y su versatilidad para realizar múltiples configuraciones (CCI, 2008); gracias a su construcción, mediante paneles modulares desmontables.

La configuración estructural desmontable está diseñada para el desarrollo de recintos isotérmicos e isoclimáticos de grandes capacidades, los cuales no pueden ser fabricados de forma compacta, debido a sus dimensiones o por la existencia de impedimentos de acceso hasta el lugar definitivo de la ubicación del montaje (CCI, 2010b).

Este tipo de construcción, además de presentar múltiples configuraciones, no pre-

senta limitaciones de tamaño y pueden ser desmontadas, ampliadas, reducidas y trasladadas a otros lugares, sin ningún problema (CCI, 2010b).

Sus aplicaciones son múltiples en todos los sectores de la industria y la investigación. Algunas de ellas se centran en los campos de la electrónica, motores, automatismos, ordenadores, automoción, defensa, aeroespacial, energía fotovoltaica y eólica, farmacia, alimentación, botánica, agricultura y comportamiento humano, entre otras. Además de permitir la conexión y acoplamiento de cualquier tipo de mecanismo, que pueda formar parte de un ensayo dinámico particularizado (CCI, 2012c).



### 3. Características generales de los ácaros *Tetranychus Urticae* Koch y de las especies hospederas



El GRAIN ha logrado desarrollar un número importante de investigaciones con el ácaro *Tetranychus Urticae* Koch (ver Figura 22). Este ácaro por ser plaga de cultivos debe ser criado sobre plantas, por lo que se hace necesario que la cámara pueda sostener, tanto la vida de las plantas hospederas como la del ácaro. Sin embargo, cabe aclarar que debe poderse criar cualquier otro artrópodo fitófago (insectos o ácaro) en la cámara. Además, cuando se realizan experimentos con organismos vivos, debe poder garantizarse que las condiciones ambientales (temperatura, HR y fotoperíodo) estén dentro de unos rangos, que puedan ser controlados y que sean óptimos para el desarrollo o la reproducción de los individuos.

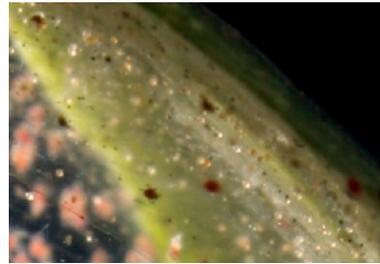


**Figura 22.** Ácaro *Tetranychus Urticae* Koch.  
Reproducida con permiso de Hincapié (2013).

*T. Urticae* pertenece a la clase *arácnida*, subclase *acarí*, orden *acariformes* y familia *tetranychidae*. Se considera que esta familia está constituida por cerca de 1200 especies, algunas de las cuales están incluidas dentro de las mayores plagas para la agricultura en el mundo (Bolland *et al.*, 1998). *T. Urticae* es un ácaro plaga considerado altamente polífago y cosmopolita, reportado en 1 059 especies de plantas hospederas en 102 países del mundo (Dorkeld y Migeon, (2006-2013).

Los individuos de la familia tetranychidae pasan por el estado de protoninfa y ninfocrisálida con tres pares de patas, luego pasan al estado ninfal (durante el cual se inicia el desarrollo del cuarto par de patas) deutocrisálida, deutoninfa y teliocrisálida. En total son cuatro estados quiescentes (huevo y tres crisálidas) y cuatro estados móviles (larva, protoninfa, deutoninfa y adulto). Los estados quiescentes (ver Figura 23) son más resistentes a productos químicos y a ataques de depredadores. Se les encuentra en el envés de la hoja (ver Figura 24), cerca de la nervadura, especial-

mente, la principal. Fabrican una telaraña con un espacio, donde se pueden refugiar algunos adultos y los individuos de los estados más jóvenes de la población (Acosta, 1994).

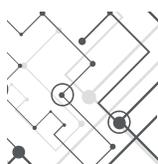


**Figura 23.** Huevos de ácaro *Tetranychus Urticae* Koch.  
Reproducida con permiso de Toro (2013).



**Figura 24.** Colonia de ácaro *Tetranychus Urticae* Koch.  
Reproducida con permiso de Toro (2013).

Las arañas rojas inmaduras son más pequeñas, tienen la misma forma que los ejemplares adultos y su coloración es más tenue. Los estadios larvarios presentan tan solo tres pares de patas, mientras que las ninfas ya tienen los cuatro pares que caracterizan a todos los ácaros.



### 3.1. Biología

La hembra de *T. Urticae* adulta tiene forma ovalada, un tamaño promedio de 0.5 mm de largo y dorso con espinas. El color varía desde el amarillo pálido y pasa por el verde, carmín y rojo anaranjado. El macho es de menor tamaño y es de coloración más pálida que la de la hembra. Ambos sexos presentan dos manchas oscuras sobre el dorso. En clima cálido, la hembra pone entre 80 a 100 huevos esféricos y de color blanco y suele protegerlos por una fina tela. Las larvas son blanquecinas, con ojos rojos y pasan por los estadios de protoninfa y deutoninfa para llegar al estado adulto, lo que tarda entre cinco y 30 días, pues esto depende de las condiciones ambientales, especialmente, de temperatura y humedad (Ayala *et al.*, 2002).

#### 3.1.1 Condiciones óptimas para el desarrollo y la reproducción

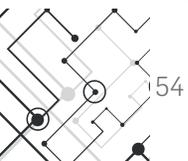
Para los efectos de obtención de individuos para los experimentos y el desarrollo de los mismos, es necesario identificar cuáles son las condiciones de temperatura y humedad relativa, que permiten el óptimo desarrollo y reproducción de los individuos de *T. Urticae*. Investigadores han encontrado que a temperaturas entre 28 y 32 °C y humedad relativa entre 40 %HR y 65 %HR, los individuos pueden alcanzar una madurez reproductiva entre 4 y 5 días, mientras que entre 13 y 15 °C se puede demorar entre 28 y 31 días. Así mismo, estas condiciones de temperatura

permiten observar una ovoposición de entre 80 y 90 huevos por hembra, que contrasta con una de 50 a 60 a temperaturas cercanas a los 15 °C. Cabe anotar que, las altas precipitaciones causan un decrecimiento significativo en la cantidad de individuos (Haque, *et al.*, 2008; El-Halawany y El-Wahed, 2012). Estos aspectos relevan la importancia de mantener los ácaros en condiciones controladas, para facilitar todas las operaciones necesarias para los procesos experimentales.

### 3.2 Síntomas y daños

*T. Urticae* puede causar daños severos que incluyen necrosis del área foliar, defoliación, pérdida de vigor y muerte de la planta; al alimentarse dañan la superficie de la hoja al destruir los estomas, extraen savia y clorofila, inyectan sustancias tóxicas e interfieren en los procesos vitales de la planta (Quintero, 1991). En fríjol, por ejemplo, ataques severos causan pérdida de hojas y disminución de productividad (Aponte y Aponte, 1990) y en flores, causan disminución en el crecimiento de las plantas y en la producción de botones, además de pérdida de calidad (Acosta *et al.*, 2001). Es importante resaltar que se han descubierto diferencias entre las preferencias alimenticias de cada una de las poblaciones, lo que sugiere que existen razas con adaptaciones especiales a su hospedero (Navajas, 1998).

Estos ácaros pueden encontrarse en invernaderos y zonas tropicales y subtropicales.



Se pueden alimentar de cientos de tipos de plantas como alubias (fríjoles), pepino, algodón, pimiento (ají), lúpulo, soja, tomate, vid, berenjena, habas, cacahuete (maní), lechuga, melón, alfalfa, okra, papaya, grosellero, naranjo, clementino, limonero, sorgo y té, entre otros, así como también, de la mayoría de ornamentales y hortalizas: rosas, flor de calabaza, entre otras (Culturaagraria, 2012). Deposita sus huevos en las hojas y supone una amenaza para la planta huésped, porque se alimenta de los contenidos celulares de las hojas, pues los absorbe célula a célula, con lo que de inmediato aparecen unas manchas claras (ver Figura 25) sobre el haz y envés de la hoja, que en definitiva, hace que la hoja se torne completamente amarilla. Aunque, individualmente las lesiones que puede causar este ácaro son insignificantes, de acuerdo con el pequeño tamaño de este quelicerado, se debe tener en cuenta que a una planta la pueden atacar cientos o miles de ácaros, lo que causa muchas lesiones irreversibles en la planta, al reducir la capacidad fotosintética de la planta y la

producción de nutrientes, en ocasiones, logran matar la planta. (Wikipedia, 2012a).

El ácaro *T. Urticae* es bastante resistente y difícil de combatir, debido a que se presenta una elevada reproducción; pues existen tres hembras por macho. Además de esto, mutan con facilidad de una generación a otra (Elhuertoderamon, 2011).

La alimentación frecuente de estos ácaros hace que en las hojas de las plantas se produzca decoloración y desecación, lo que genera manchas amarillentas y abombamientos en el haz. Además de lo anterior, producen defoliaciones presentadas con mayor frecuencia en verano y se alimentan de los frutos, que adquieren manchas herrumbrosas difusas por toda la superficie del fruto maduro. Si los ataques son fuertes, el fruto aparece de color gris sucio (ver Figura 26). "En el limón da lugar a manchas oscuras, este síntoma característico es conocido comúnmente como el "bigote" del limón" (Wikipedia, 2012a).



Figura 25. Daño producido en hojas.



Figura 26. Daño producido en fruta.



### 3.3. Métodos de control

La lucha contra este ácaro puede ser según las situaciones: química, biológica, cultural, física o por ivernalización. Las poblaciones de este ácaro pueden verse disminuidas por la lluvia (Gipcitricos, 2010).

#### 3.3.1 Control cultural

“La siembra de festuca entre líneas aumenta el nivel de fitoseidos y disminuye la presencia de la araña en los árboles. Además si se deja espigar el polen es utilizado por los fitoseidos como alimento” (Gipcitricos, 2010).

##### 3.3.1.1 Buenas prácticas culturales

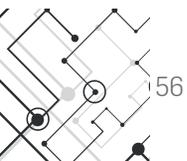
Culturaagraria (2012) sugiere tener en cuenta las siguientes recomendaciones, con el fin de disminuir las poblaciones de ácaros en el cultivo:

- En plantas ornamentales, sobre todo, las más sensibles y las de interior, se debe ser preciso con el emplazamiento, lo que evita los lugares secos y cálidos.
- Hay que buscarles un lugar fresco, aireado, lejos de la calefacción.
- La pulverización con agua clara de las plantas ayuda a prevenir ataques.
- En cultivos al aire libre o en invernadero conviene eliminar las malas hierbas y destruir los cultivos previos, si han sido infestados.

- Conviene vigilar las parcelas colindantes, sobre todo, las abandonadas, por si sirven de refugio a la plaga.
- Se debe llevar una correcta fertilización, lo que evita los excesos de nitrógeno.
- Las barreras de protección contra el viento ayudan a disminuir la dispersión de este ácaro.
- Las plantaciones regadas por aspersión no sufren ataques.
- En días secos regar las plantas del jardín y mojarlas con el agua de la manguera.
- Limpiar el polvo de las plantas, debido a que ayudan a aumentar las poblaciones de la araña roja.
- Los ácaros crecen en las plantas sometidas a estrés.
- Las plantas vigorosas son menos susceptibles.
- Las poblaciones de este ácaro pueden verse disminuidas por la lluvia, pero este factor no lo podemos controlar.

#### 3.3.2 Control biológico

El control biológico de la araña roja es posible con la utilización de uno de sus enemigos naturales, el ácaro fitoseido *phytoseiulus persimilis*, que una vez que es distribuido sobre las hojas del cultivo, realiza una buena acción de control de las poblaciones de *T. Urticae*. Este método de control es, sobre todo, utilizado en cultivos de hortalizas en invernaderos. *Phytoseiulus persimilis* es multiplicado en muchas empresas europeas dedicadas a la reproducción y venta de insectos, utilizados en control biológico (Gipcitricos, 2010).



*Amblyseius californicus* es otro ácaro depredador de *T. Urticae*, que se usa en control biológico de la misma. Una de las principales ventajas de este, es que puede alimentarse en ciertos momentos del polen de las flores (en especial, de festuca, que se puede colocar entre las líneas de árboles), por lo que puede permanecer en los cultivos, hasta que aparezcan los primeros individuos de *T. Urticae* (Gipcitriscos, 2010).

*Lucha biológica.* Gipcitriscos (2010) muestra algunos de los enemigos naturales de la araña roja:

- Ácaros fitoseidos. *Phytoseiulus persimilis*, *amblyseius californicus* y *neoseius californicus*.
- Antocóridos del género *orius*.
- Tisanópteros. *Aeolothrips intermedius*.
- Dípteros cecidómidos y coleópteros estafilínidos (género *oligota*).
- Chinchas depredadoras. *Nesidiocoris tenuis*.
- *Conwentzia psociformis*, *stethorus punctillum*, *feltiella acarisuga*.

Estos organismos contribuyen a reducir las poblaciones y ayudan a su control, pero no hacen desaparecer la plaga. En verano, incluso, con la presencia de sus enemigos, las poblaciones se pueden disparar cuando se dan las condiciones adecuadas, debido a que los depredadores y parasitoides responden con crecimientos más lentos. Esta estrategia de lucha se

debe combinar con otras. Los depredadores más usados en el ámbito comercial son el *phytoseiulus persimilis* y el *amblyseius californicus*, de los que se venden preparados y listos para ser liberados en cultivo (Culturaagraria, 2012).

*Otros medios ecológicos.* Los aceites minerales que se utilizan para el control de la cochinilla algodonosa en invierno, matan también muchas de las arañas rojas que permanecen refugiadas en la corteza de árboles y arbustos caducifolios. Esto ayuda a reducir los posteriores ataques en verano. El espolvoreo con azufre puede frenar el crecimiento de las poblaciones de ácaros, pero no es muy efectivo ni duradero (Culturaagraria, 2012).

Más tratamientos:

- Purín de ortigas.
- Infusión de helechos diluidos en agua a principios de primavera.
- Infusiones de ajeno con silicato de sosa, en primavera y otoño.
- Cola de caballo con jabón neutro.
- La cebolla puede actuar como repelente.

### 3.3.3 Control químico

Son muchos los productos químicos que se pueden utilizar en el control de las poblaciones de este ácaro. Hay que tener en cuenta que los mayores ataques se producen en épocas de calor y baja humedad, condiciones que se suelen dar en verano.



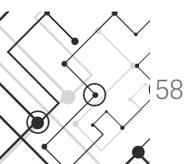
Hay que valorar antes de realizar un tratamiento químico, sobre la presencia de enemigos naturales y considerar el efecto que el producto puede tener sobre estos. Los ataques de este ácaro suelen aparecer en focos bien delimitados, por lo que es importante la vigilancia de estos y, si es posible, realizar tratamientos localizados (ver Tabla 6) a estos focos, antes de que se extiendan al resto del cultivo (Gipcitricos, 2010).

Culturaagraria (2012) hace las siguientes recomendaciones para realizar el control químico sobre el ácaro *Tetranychus Urticae* Koch.

- En caso de tener que realizar más de una aplicación, se debe alternar entre las materias activas con distinto modo de acción, con el fin de evitar la aparición de resistencias.

Tabla 6. Materias activas.

Modo acción	Materia activa	Plazo (s)
Activador del canal cloro	Abamectina <sup>3</sup>	10
Inhibidores de crecimiento de los ácaros	Clotecifenn	21
Modo acción	Materia activa	Plazo (s)
Inhibidores del transporte de electrones	Hexitiazox	14
	Etoxazol	14
	Fenazaquin	21
	Piridabén	15
	Tebufenpirad	7
	Fenpiroximat	14
Inhibidores de la síntesis ATP mitocondrial	Propargita	14
Inhibidores de la síntesis de los lípidos	Espirodiclofén	14
Físico, asfixia	Aceite parafínico	-



- Los plaguicidas deben utilizarse a las dosis recomendadas, para evitar la aparición de resistencias o pérdida de eficacia de la aplicación.
- Todas las aplicaciones químicas deben realizarse con equipos previamente calibrados. Se debe considerar el uso de un adecuado volumen, presión y velocidad de aplicación, de manera que se asegure una apropiada cobertura vegetal.
- La técnica de aplicación debe permitir alcanzar bien el envés de las hojas, pero se debe procurar por una buena cobertura de estas en todas las plantas. Para las aplicaciones en pulverización es aconsejable la utilización de mojanter.
- Diferenciar el estado de la plaga predominante y el nivel poblacional de cada estadio al que se dirige el tratamiento, debido a que según estos, se realizará la elección del producto más apropiado (ovicidas, larvicidas, adulticidas).

Antes de realizarlos conviene valorar su idoneidad. La presencia de enemigos naturales combinados con las inclemencias del tiempo suelen mantener a raya a la araña roja, durante buena parte del año. Pero una época cálida, acompañada de sequedad, puede significar un repunte de las poblaciones. El período de máxima sensibilidad discurre desde principios de junio, hasta que llegan las lluvias de septiembre. No se recomienda tratar sistemáticamente sin ton ni son, sino, cuando la plaga supere cierto límite. Un posible umbral es cuando se detectan más del 7 % de hojas o 2 % de los frutos afectados (Wikipedia, 2012a).

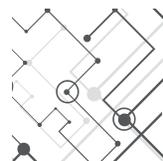
Esta plaga se presenta muchas veces focalizada en determinadas plantas o zonas de la parcela, así que los tratamientos pueden ser también locales. Se recomiendan los preparados en polvo más que los diluidos en agua. Las pulverizaciones han de ir dirigidas a los lugares donde se ceban las arañas y envés de las hojas o frutos. Se deben mojar bien, debido a que la tela tejida por estos ácaros les procura cierta protección. Los ataques generalizados requieren de productos específicos (Culturaagraria, 2012).

Los productos deberían respetar a los enemigos naturales, para así actuar en dos o más frentes a la vez. Tras una primera aplicación, suele ser necesario un segundo pase al cabo de un par de semanas o, incluso, un tercero. Existe un gran número de productos que se pueden utilizar. Algunos de ellos son: amitraz, spiroadiclofen, abamectina, etoxazol, propargita, dicofol, tebufenpirad. Se recomienda alternar tanto las sustancias acaricidas utilizadas, como las formas de presentación de las mismas, debido a la capacidad de generar resistencias de esta especie (Wikipedia, 2012a).

El empleo de piretroides en el control de otras plagas puede suponer un aumento de la población de araña roja (Culturaagraria, 2012).

### 3.3.4 Control por invernización

Esta técnica ha sido comúnmente realizada cada temporada por los agricultores de Michoacan y consiste en inducir frío



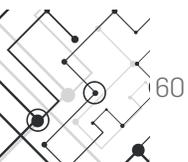
artificialmente a plantas provenientes de viveros, comúnmente establecidos por la mayoría de los agricultores. Este procedimiento consiste en empacar las plantas principalmente secas, las cuales se introducen en bolsas plásticas transparentes (para evitar el desarrollo de patógenos) y, luego, son sometidas en una cámara frigorífica a una temperatura de 0 - 3 °C por un determinado tiempo (se sugiere no inducir por más de 3 días), de preferencia, antes de empacar las plantas, tratarlas con productos fitosanitarios. La invernización tiene un efecto en el balance hormonal (giberelinas) natural, principalmente, de las plantas, las cuales son inducidas en las variedades exigentes de frío como en las variedades de fotoperíodo neutro. Estas hormonas endógenas son las principales causantes de un engrosamiento de la cutícula de la hoja, así como un mayor vigor y hojas más cerosas, lo que evita la proliferación del ácaro, también favorece una mayor inducción floral de las plantas y frutos con mayores características organolépticas (sabor, color, aroma y vida de anaquel).

Las desventajas de esta técnica son: 1) No puede ser aplicada a todas las variedades,

debe ser en variedades muy exigentes de frío como las variedades de fotoperíodo neutro. 2) Si se exponen las plantas por un período de tiempo muy prolongado en la cámara frigorífica, trae como consecuencia un retraso en la floración, por un desarrollo vegetativo excesivo e indeseable en las mismas (Culturaagraria, 2012).

### 3.3.5 Control físico

El utilizar tecnologías de microaspersión como los *foggers*, pueden ser de gran utilidad bajo el sistema de cultivo de plantas en macrotúnel; los *foggers* producen gotas de agua muy pequeñas, casi imperceptibles, las cuales ayudan a disminuir la temperatura interior del túnel y, así, aumentar la humedad relativa, aquella que es desfavorable para el ácaro de dos manchas (*tetranychus urticae*) y, también, algunas enfermedades. La desventaja de esta técnica es: 1) Costo, debido a que se requiere de una red hidráulica externa en la mayoría de los casos. 2) La proliferación de enfermedades como pudrición gris del fruto (*botrytis cinerea*) y antracnosis (*colletotrichum fragariae*), entre otras (Gipci-tricos, 2010).



## 4. Acondicionamiento de la Cámara de maduración



Hablar de acondicionamiento hace referencia a la acción de preparar algo para un fin determinado, en este caso, se trata de “convertir” una Cámara de maduración para productos cárnicos, en una Cámara de ambiente controlado, para permitir la supervivencia de plantas e insectos. Esto implica la adición de nuevos elementos, tales como un PLC, que permita aplicar un control preciso para la estabilización de las diferentes variables y la generación de ambientes artificiales, cambio de sensores de temperatura y humedad, por no cumplir especificaciones técnicas con respecto al PLC, cambio de resistencia de calefacción, debido a que la existente es de muy baja potencia y un sistema de iluminación para simular el ciclo solar; todo esto con el fin de permitir la experimentación con los ácaros *Tetranychus Urticae* Koch, bajo unas condiciones climáticas controladas, que permitan obtener resultados más precisos y la elaboración de conclusiones más acertadas, con relación a una determinada investigación.

Se aprovecharon al máximo los diferentes elementos instalados en dicha cámara, junto con sus conexiones existentes. Solamente se desconectaron los diferentes elementos (que no requirieron cambios), conectados al controlador de humedad y temperatura anteriormente instalado, se tuvo en cuenta, también, los componentes que requirieron cambio y los adicionados, para ser conectados al PLC, de esta manera, no fue necesario alterar las conexiones existentes en los diferentes contactores y protecciones instaladas. No se realizó una conmutación entre el controlador y el PLC, debido a que esto implicaba la adición de un nuevo sistema de contactores, que se encargara de independizar el sistema a la hora de realizar el cambio entre ellos. El controlador instalado anteriormente fue reemplazado por el PLC.

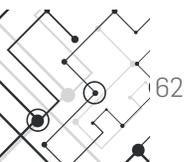
#### 4.1. PLC (*Programmable Logic Controller*)

Un Controlador Lógico Programable, más conocido por su forma abreviada en inglés PLC (*Programmable Logic Controller*), es muy utilizado en la industria y se trata de una computadora de gran potencia, utilizada en la ingeniería automática o automatización industrial, con la cual se automatizan procesos electromecánicos, tales como el control de la maquinaria de la fábrica, en líneas de montaje o atracciones mecánicas. Es un equipo electrónico que, tal como su mismo nombre lo indica, se ha diseñado para programar y controlar procesos secuenciales en tiempo real.

Los PLC son utilizados en una gran variedad de industrias y máquinas, con el fin de automatizar un proceso determinado. El PLC está diseñado para trabajar con varias señales de entrada y de salida, amplios rangos de temperatura, inmunidad al ruido eléctrico, resistencia a la vibración y al impacto, además, los programas de control son almacenados en baterías de copia de seguridad o en memorias no volátiles, razones que justifican su uso en muchas industrias y máquinas, con el fin de automatizar un proceso determinado. Un PLC es un ejemplo de un sistema de tiempo real duro, en donde los cambios o variaciones que se dan en las salidas, de acuerdo a unas condiciones de entrada determinadas, deben de ser producidos dentro de un tiempo limitado (Wikipedia, 2013k).

Para que un PLC logre cumplir con su función de controlar, es necesario programarlo con cierta información, acerca de los procesos que se quiere secuenciar. Esta información es recibida por captadores que, gracias al programa lógico interno, logran implementarla a través de los accionadores de la instalación.

Un PLC es un equipo comúnmente utilizado en maquinarias industriales de fabricación de plástico y en máquinas de embalajes, entre otras; en fin, son posibles de encontrar en todas aquellas maquinarias que necesitan controlar procesos secuenciales, así, como también, en aquellas que realizan maniobras de instalación, señalización y control.



Dentro de las funciones que un PLC puede cumplir se encuentran operaciones como las de detección y de mando, en las que se elaboran y envían datos de acción a los preaccionadores y accionadores. Además, cumplen la importante función de programación, en la cual se pudo introducir, crear y modificar las aplicaciones del programa.

Los PLC son de tamaño reducido, requieren mantenimiento de bajo costo, permiten ahorrar dinero en mano obra, controlar más de una máquina con el mismo equipo, ahorrar tiempo en la elaboración de proyectos y realizar modificaciones sin costos adicionales. Es gracias a estas ventajas que se justifica su uso, sin embargo, se debe contar con técnicos calificados y adiestrados, para encargarse de su buen funcionamiento (Plcdev, 2013).

#### 4.1.1 PLC Unitronics Vision 230-13-B02B

Los PLCs *Vision* son controladores lógicos programables que, componen un panel de mando integral. Son de diseño compacto y son compatibles con diferentes tipos módulos de *Unitronics* I/O, esto le permite construir la visión de sistemas controlados capaces de automatizar una amplia gama de aplicaciones analógicas y digitales. Todos los PLCs *Vision* ofrecen comunicaciones RS-232, CANbus y un reloj de tiempo real (RTC).

Los PLCs *Vision* contienen paneles de mando, pantalla gráfica LCD y un teclado. Algunos modelos ofrecen pantallas táctiles

gráficas. La pantalla LCD muestra las instrucciones de operación, alarmas y tiene un sistema de información en tiempo real, en donde se observan las variables a través de textos e imágenes gráficas. El operador utiliza el teclado programable para introducir o modificar datos en el sistema de visión controlada. Esta interfaz de comunicación entre el controlador y el operador se denomina: panel de operador o interfaz hombre-máquina.

Existen dos tipos de módulos de I/O que son compatibles con los PLCs *Vision*, módulos I/O que están disponibles en una variedad de modelos. *Snap-in* de módulos de I/O se conectan directamente a la parte trasera de un PLC *Vision* y facilitan la creación de una unidad autónoma con un PLC local de I/O de configuración. También se pueden integrar I/O módulos de expansión fácilmente, para extender enormemente la capacidad del sistema de control (Intrave, 2013).

Estas características se combinan para ofrecer una solución rentable para las medianas empresas y aplicaciones de las industrias, que requieren tanto la interfaz de un operador como la capacidad de controlar, de acuerdo con el tiempo y las condiciones ambientales.

##### 4.1.1.1 Snap-in V200-18-E1B de módulos I/O

Estos módulos I/O, fácilmente, se colocan en la parte posterior del controlador, lo que proporciona



una configuración de I/O, que puede ser analógica y digital. A través del puerto del controlador de ampliación de I/O se pueden conectar hasta ocho módulos de expansión de I/O por controlador.

El PLC con interfaz de operador gráfico integrado y módulo *Snap* de I/O, según la combinación de módulos *Snap*, se puede obtener una configuración de *hardware* según las necesidades a suplir, con entradas configurables para alta velocidad (HSC), para Termopar/PT100 y analógicas, entre otras, así, como también, salidas analógicas (0-10 V, 4-20 mA...), de PWM (*Pulse With Modulation*), por relé y transistor, como opciones de comunicación vía *Ethernet TCP/IP, Modbus, Can Open, Unican* y GSM/GPRS/SMS, entre otras; teclas de función personalizables tanto en la parte de *hardware* como de *software*, *display* gráfico retro iluminado tipo LED con resolución de 128x64 píxeles, con una pantalla de 3.2" para el *Vision 230* (Intrave, 2013).

#### 4.1.1.2 PLC Unitronics Vision 230 en la Cámara de ambiente controlado

El PLC Unitronics Vision 230 (ver Figura 27) es utilizado en este trabajo de grado para la lectura de un detector y dos sensores (detector de nivel, sensor de temperatura y sensor de humedad) y para el control de los actuadores (compresor, resistencias, ventiladores y lámparas fluo-

rescentes) presentes en la Cámara de maduración existente. Tiene, entonces, seis entradas: dos analógicas (sensor de temperatura y humedad) y cuatro digitales, entre las que se encuentran el detector de nivel y los pulsadores de mando (arranque, paro normal y paro emergencia). Tiene 12 salidas, las cuales incluyen ocho por relé, para el control de los actuadores en su totalidad y el piloto relacionado al funcionamiento de los ventiladores, y cuatro por transistor, dedicadas a los pilotos relacionados con el sistema de humidificación, el sistema de calefacción, al funcionamiento general del sistema, al paro normal y al paro de emergencia (utilizan un mismo piloto) del mismo. De esta manera, se observa que este PLC controla dos variables totalmente relevantes para este trabajo de grado, las cuales son la temperatura y la humedad relativa.

El PLC *Vision 230* se puso de manera ergonómica en el gabinete, para que el usuario o persona que desee usar la cámara y realizar un respectivo control, lo pueda hacer de manera cómoda y fácil.

## 4.2. Sensor de humedad y temperatura

Se trabajó con un sensor de humedad y temperatura (ver Figura 28) marca Auto-nics THD-W1-C de salida normalizada de 4-20 mA (ver Tabla 7). Gracias a este sensor, se facilitó la conexión con el PLC.

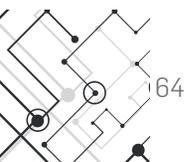




Figura 27. PLC Unitronics Vision 230.



Figura 28. Sensor de humedad y temperatura.

Tabla 7. Especificaciones técnicas del sensor de humedad y temperatura.

Característica	Especificación técnica
Modelo	THD-W1-C
Alimentación	24 VDC $\pm$ 10 %
Consumo	Max. 2.4 W
Entrada de medición	Temperatura, humedad (sensor integrado)
Temperatura: rango de medición	-19.9 °C ~ 60.0 °C
Humedad: rango de medición	0.0 %HR ~ 99.9 %HR
Temperatura: precisión	5.0 °C ~ 40.0 °C Max. $\pm$ 0.5 °C (Max. $\pm$ 1.0 °C para otros casos)
Humedad: precisión	Max. $\pm$ 3 %HR de 30 %HR a 70 %HR (de 35 °C a 45 °C)
Período de muestreo	0.5 s
Resistencia de aislamiento	Min. 100 M $\Omega$ (500 VDC mega)
Resistencia dieléctrica	500 VCA 50/60 Hz por 1 min

Continúa

Característica	Especificación técnica
Resistencia al ruido	$\pm 0.3$ kV onda cuadrada de ruido (ancho de pulso: 1 $\mu$ s) por un simulador de ruido
Protección	IP65
Temperatura ambiente	-20 °C - 60.0 °C
Temperatura de almacenamiento	-20 °C - 60.0 °C

### 4.3. Iluminación. Tubos fluorescentes

Los tubos fluorescentes son lámparas de vapor de mercurio a baja presión. Son de pocos vatios (40-200 W), por lo que son necesarias un gran número de ellas, si se quiere realizar iluminación fotosintética (espectro azul y rojo). Al depender de las plantas, se pueden necesitar de 200-400 W/m<sup>2</sup>. Se colocan a 10 cm del extremo de las plantas, para no correr el riesgo de exceso de calor. Su costo de instalación es elevado debido a las reactancias y al ocupar mucha superficie, sombrean bastante en los invernaderos. Se usan en cámaras de germinación y de cultivo.

Este tipo de bombillas se utilizan con el fin de sustituir la luz solar a la hora de hacer crecer/floreecer un determinado tipo de plantas, por lo que tienen que ser lo más parecidas posibles en espectro y temperatura a la del sol.

El sol "presenta diferentes temperaturas de color según la hora del día o el estado del tiempo. Así, la luz del atardecer o ama-

necer tiene una temperatura aproximada de 3200K y un aspecto cálido" (Rebosio, 2005), mientras que la luz solar, al mediodía, puede alcanzar temperaturas de 5000K a 6500K; es decir, una luz fría. En un día cubierto y cerca del mediodía, la luz puede presentar una temperatura mayor a los 7000K (Rebosio, 2005). Al conocer estas cifras, es posible determinar el tipo de iluminación a trabajar, que para este caso en específico, se tomó la decisión de utilizar lámparas fluorescentes de 17 W de tres tonos diferentes, con el fin de recrear la mañana (3500K), el medio día (4100K) y la tarde (6500K), lo que permitió mejores resultados y la creación de diferentes ambientes artificiales, a la hora de realizar un experimento determinado.

Las lámparas fluorescentes (ver Figura 29), se componen de un tubo de vidrio que contiene una pequeña cantidad de mercurio y de gas argón. Al circular la corriente eléctrica por dos electrodos situados a ambos lados del tubo, se produce una descarga eléctrica entre ellos, que al pasar a través del vapor de mercurio, produce ra-

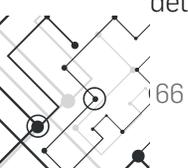




Figura 29. Instalación de tubos fluorescentes.

diación ultravioleta. Esta radiación excita una sustancia fluorescente con la que se recubre la parte interior del tubo y permite transformar la radiación ultravioleta en radiación visible, que en función de la sustancia fluorescente utilizada, puede tener distintos tonos y colores. Tienen un mayor rendimiento que las lámparas incandescentes, pero son más caras y requieren un equipo complementario (Bonet, s.f.).

Este equipo complementario se encarga de limitar la corriente y desencadenar el proceso de generación del arco eléctrico entre los dos electrodos, que da lugar a la radiación visible. Para limitar la corriente, se debe colocar en serie un dispositivo que limite la corriente máxima que lo atraviesa. Para ello, se usa una impedancia inductiva (bobina) denominada balasto o reactancia. Esta bobina produce un desfase negativo de la corriente, por lo que se suele colocar un condensador en paralelo con la línea,

para mejorar el factor de potencia del conjunto (Bonet, s.f.).

Estas lámparas tienen una vida útil alrededor de las 7500 h y según el número de encendidos y apagados, este valor se reduce considerablemente, razón por la cual, no deben ser utilizados de manera intermitente. A mayor número de ciclos de arranque, menor vida útil (Bonet, s.f.).

Estos tubos fluorescentes se ubicaron en un marco auxiliar removible, en el mismo sentido de apertura de la puerta de la cámara acondicionada, para facilitar el ingreso y extracción de elementos a ella.

#### 4.4. Resistencia de calefacción

Para obtener los valores necesarios para la supervivencia del ácaro *Tetranychus Urticae* Koch (entre 28 °C y 32 °C y 40



%HR y 65 %HR) en la Cámara de ambiente controlado, se hizo necesario el cambio de la resistencia de calefacción por una de 1500 W (ver Figuras 30 y 31), debido a que la que se tenía para la maduración de cárnicos era de una potencia de 310 W y no era la adecuada para la aplicación que se requiere en este caso. A esta resistencia de

1500 W se le agregó un interruptor límite de alta temperatura (termostato), para evitar valores de temperatura fuera de los límites de operación (ver Figuras 32 y 33) de la Cámara de ambiente controlado.

El cambio de esta resistencia se explicará más detalladamente en el capítulo 5.



Figura 30. Resistencia eléctrica por aire forzado de 1500 W.



Figura 31. Resistencia eléctrica por aire forzado de 1500 W en la Cámara de Ambiente Controlado.



Figura 32. Termostato TS-120S C.



Figura 33. Termostato ubicado en la Cámara de ambiente controlado.

## 4.5. Gabinete

Un gabinete:

Es una caja que contiene los dispositivos de conexión, maniobra, comando, medición, protección, alarma y señalización, con sus respectivas cubiertas y soportes correspondientes, para cumplir con una función específica dentro de un sistema eléctrico. La fabricación o ensamblaje del mismo debe cumplir con unos criterios de diseño y normativas que permitan su funcionamiento correcto una vez energizado, lo que garantiza la seguridad de los operarios y de las instalaciones en las cuales se encuentran ubicados (Tablero eléctrico, s.f.).

En este proyecto se decidió no modificar ninguna de las conexiones existentes en la Cámara de maduración, con el fin de evitar algún daño al momento de reestablecer dichas conexiones. Esta deci-

sión se determinó al no contar con planos eléctricos ni con cableado marcado, puesto que estas conexiones fueron realizadas por los estudiantes encargados de la construcción y elaboración de la cámara a acondicionar. Se realizó la marcación respectiva del cableado que se adicionó, además de levantar los planos eléctricos del cableado existente.

El gabinete se usó para la ubicación del PLC, canaletas, pulsadores, pilotos de señalización, relés de interface, elementos de protección, fuente de alimentación y balastos electrónicos, junto con el cableado de los mismos y su respectiva marcación (ver Figuras 34, 35, 36 y 37). Todo esto se encuentra especificado en los planos eléctricos realizados por los estudiantes.

Se trabajó con un gabinete de 60 x 60 x 35 cm en acero *cold rolled*, con puertas de fácil remoción y cambio de sentido de apertura.



Figura 34. Gabinete vista frontal.



Figura 35. Gabinete cableado interno.





Figura 36. Gabinete cableado interno PLC.



Figura 37. Cámara de ambiente controlado.

## 5. Modelamiento cinemático de los actuadores controlados

Para diseñar el sistema de control adecuado para una planta en específico, se debe conocer la manera cómo cambian las variables de entrada del proceso ante unos estímulos determinados (González, 2002), información que se logra obtener gracias al modelo matemático del sistema.

El término sistema hace referencia a un conjunto de componentes físicos que forman una unidad completa y que actúan simultáneamente para cumplir un objetivo determinado (Pérez *et al.*, 2008). No es necesario conocer en detalle las interacciones entre los componentes que forman dicho sistema, debido a que solo es de interés la relación entre la entrada y su salida. Un sistema puede ser considerado como una caja negra, al no ser importante lo que este tiene adentro (Bolton, 2006).

Para llegar a diseñar el controlador apropiado, en primer lugar, se debe investigar el comportamiento del proceso en cuestión,



al observar los cambios de este ante variaciones en las variables manipuladas y perturbaciones externas. Se puede usar un enfoque experimental o uno teórico, para obtener el modelo matemático correspondiente (González, 2002).

El enfoque experimental se aplica, cuando el equipo físico del proceso a controlar está disponible. "Este método consiste en cambiar deliberadamente las variables de entrada del proceso (disturbios externos y variables manipuladas) y medir cuidadosamente las variables de salida (temperatura, presión y flujo, entre otras) para observar su respectiva variación en el tiempo" (González, 2002). Se debe tener cuidado al momento de realizar los cambios, debido a que pueden llegar a forzar el sistema, al ser sometido a condiciones extremas de operación.

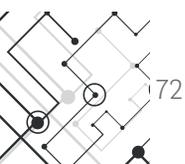
Mientras que el enfoque experimental requiere del equipo físico a controlar, en caso de que no se disponga de este, se puede aplicar un enfoque teórico, en donde "la representación del proceso se hace por medio de ecuaciones matemáticas, cuya solución permite conocer el comportamiento dinámico del proceso" (González, 2002). En este caso, al contar con el equipo a controlar, se optó por aplicar un enfoque experimental, para obtener el modelo matemático del sistema.

"Un modelo matemático de un sistema es una "réplica" de las relaciones entre entrada y salida o entre entradas y salidas" (Bolton, 2006), en cuya estructura intervienen

los elementos de la realidad modelizada y las relaciones existentes entre ellos (Lanfri, 2011), en otras palabras, es una copia del sistema original. Un sistema físico puede ser representado por varios modelos matemáticos, unos más complejos que otros (Pérez *et al.*, 2008).

Gracias a la representación matemática de un sistema físico, el ingeniero es capaz de emplear diferentes herramientas matemáticas y topológicas, como lo son las ecuaciones diferenciales y los diagramas de bloques y flujo de señal, que le permiten entender en realidad cómo se comporta el sistema o cuáles son los parámetros más importantes que rigen su comportamiento. Vale la pena mencionar que todos los sistemas físicos son, en algún aspecto, no lineales, motivo por el cual es necesario determinar una zona de funcionamiento, dentro de la que el sistema estudiado presenta un comportamiento lineal, con el fin de facilitar los estudios matemáticos posteriores a realizar con él (Pérez *et al.*, 2008).

El modelo matemático es válido solo bajo las condiciones de operación del sistema en las que se obtuvo dicho modelo. Si el sistema va a funcionar en unas condiciones de operación diferentes a las utilizadas, para obtener los modelos matemáticos de cada uno de los actuadores controlados, el sistema de control diseñado a partir de ellos no arrojará buenos resultados. Razón por la cual, antes de iniciar con el modelado de los actuadores controlados, se es-



tablecieron las condiciones normales de operación del sistema.

Inicialmente, se había tomado la decisión de dejar el compresor encendido todo el tiempo y controlar la resistencia del sistema de calefacción, la resistencia del sistema de humidificación y el par de ventiladores del sistema de ventilación, por medio de un PWM, de esta manera se podía asegurar unas condiciones determinadas de humedad relativa y temperatura en el interior del recinto. Dicha estrategia no se logró implementar, debido a que requiere el cambio de los ventiladores existentes de corriente alterna, por unos de corriente directa, además de ser necesario su funcionamiento continuo, para lograr y asegurar una homogeneidad en las condiciones, tanto de humedad relativa como de temperatura en el interior de la cámara, junto con la protección de la resistencia de calefacción, al evitar el daño de esta por sobrecalentamiento. Gracias a esto, se pasó a controlar en lugar de tres actuadores, solo dos de ellos, pues tanto el compresor como los ventiladores establecerían las condiciones normales de operación del sistema.

Determinar la condición normal de operación del compresor implicó una serie de problemas, debido a que este superaba fácilmente la resistencia de calefacción; es decir, a pesar de que esta se encontraba encendida todo el tiempo, la temperatura disminuía en lugar de aumentar, además de lograr temperaturas inferiores a la re-

queridas por los ácaros para permitir su supervivencia. Luego de esto, se realizaron pruebas con el compresor apagado todo el tiempo, pero a pesar de lograr temperaturas superiores a las de trabajo, el compresor debía estar encendido, debido a que si este permanecía apagado, solo se lograrían temperaturas superiores a las del medio ambiente, lo que daría un rango de operación no confiable, debido a la variación de la temperatura ambiente durante el día, además de no ser la misma todos los días ni durante todo el tiempo.

De las pruebas mencionadas anteriormente, solo se podía concluir una cosa: el compresor debía estar encendido por cortos períodos de tiempo, lo suficientemente cortos, como para permitir el aumento de la temperatura gracias a la calefacción y evitar reducir su vida útil considerablemente.

El fabricante del compresor recomienda un ciclo de trabajo no mayor de cuatro a cinco veces por hora, se entiende como ciclo de trabajo, el tiempo de encendido y de apagado, sin embargo, el tiempo de apagado no debe ser inferior a seis minutos, con el fin de asegurar la igualación de presiones entre los lados de aspiración y de descarga del ciclo de refrigeración, y el tiempo de encendido no debe ser de pocos segundos, para no disminuir considerablemente la vida útil de este actuador, al trabajar el motor de este con altas corrientes de arranque. Gracias a esta recomendación, se logró establecer el modo de operación



del compresor, el cual consiste en un ciclo de trabajo de quince minutos, de los cuales, siete, se encuentra encendido y los otros ocho restantes, se halla apagado.

Una vez que se han definido las condiciones normales de operación (ver Tabla 8) y el sistema físico ha sido sustituido por su equivalente modelo lineal, se procedió a diseñar el control PID implementado, tema a tratar en los capítulos 6 y 7. Pero antes de dar a conocer la manera cómo se obtuvieron los modelos matemáticos de los actuadores controlados y presentar los diferentes problemas enfrentados con su respectiva solución, se dará una breve explicación del PWM, técnica en la que se basa el PID diseñado, para garantizar las condiciones de humedad relativa y temperatura requerida por el ácaro *tetranychus urticae* Koch, para garantizar su supervivencia.

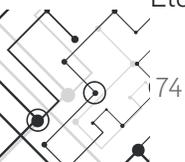
**Tabla 8.** Condiciones normales de operación de la Cámara de ambiente controlado.

Actuador	Ciclo de trabajo	Tiempo de encendido	Tiempo de apagado
Compresor	15 min	7 min	8 min
Ventiladores	-	Todo el tiempo	-

## 5.1. PWM (*Pulse-With Modulation*)

La modulación por ancho de pulsos (MAP o PWM, abreviaturas en inglés para *Pulse-With Modulation*) de una señal o fuente de energía es una técnica, en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica (una sinusoidal o una cuadrada, por ejemplo), ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga (Calderón *et al.*, 2010), entre otras aplicaciones.

El *duty cycle* modula el ancho del pulso generado con el PWM (ver Figura 38). Puede variar entre los valores del 0 % al 100 %, en donde un valor más bajo indica que la salida permanece encendida durante menos tiempo y un valor más alto del *duty cycle* indica que la salida permanece más tiempo encendida. Modificar este valor no altera la frecuencia de la salida, solo cambia el tiempo en que esta se encuentra encendida o apagada (Schneider Electric, 2011).





La curva dinámica permite determinar funciones de transferencia de primer o segundo orden, con o sin retardo, que presentan un comportamiento similar al mostrado por el sistema, al momento de hacer unas pruebas determinadas (Osorio, 2004). Al simular una de las pruebas experimentales realizadas y superponer estos resultados con los obtenidos experimentalmente al momento de realizar la misma prueba simulada, ambas gráficas deben presentar comportamientos similares dentro de la zona de operación establecida para trabajar.

“Es importante anotar que el modelo obtenido no tiene relación con el orden “verdadero” del sistema, sino que es la aproximación más cercana basada en el criterio de la respuesta del tiempo” (Osorio, 2004).

### 5.2.1 Curva estática. Resistencia de calefacción de 310 W

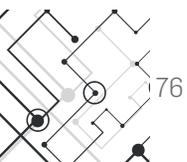
La resistencia de calefacción es controlada por medio de un PWM, con un ciclo de trabajo de cinco minutos.

Su respectiva curva estática se obtuvo experimentalmente, al variar el *duty cycle* del 0 % al 100 % en pasos del 10 %. Inicialmente, se encontró el valor máximo de temperatura alcanzado en el interior del recinto, al trabajar con un *duty cycle* del 100 % y, a partir de dicho valor, se disminuyó el *duty cycle* hasta llegar al 0 % (ver Tabla 9). Al llegar al valor mínimo de temperatura con un *duty cycle* del 0 % se aumentó hasta el

100 % (ver Tabla 10), con el fin de detectar qué tan grande es la histéresis propia de los sistemas de temperatura; es decir, qué tan diferentes son los valores estables de la temperatura en un mismo valor del *duty cycle* de la resistencia de calefacción, mientras se llega a dicho valor desde el 0 % y el 100 % del *duty cycle* respectivamente. Cada vez que se realizaba una variación del *duty cycle*, se hacía solamente cuando se aseguraba la estabilización de las variables a controlar, lo que hace de este proceso algo lento, al tener que esperar entre cada valor aproximadamente seis horas, pero gracias a este proceso, fue posible conocer la planta, además de detectar una serie de problemas y recomendaciones, que se deben tener en cuenta a la hora de trabajar con ella.

Gracias a las condiciones normales de operación del sistema definidas anteriormente y al ciclo de trabajo de la resistencia de calefacción, fue posible superar la temperatura requerida por los ácaros para garantizar su supervivencia, con una oscilación de  $\pm 2$  °C en cada *duty cycle*, oscilación generada gracias al ciclo intermitente del compresor.

Los resultados obtenidos no solo muestran el comportamiento de la temperatura, a medida que la resistencia de calefacción permanece encendida durante un tiempo determinado, sino, que es posible observar la manera cómo este mismo actuador afecta a la humedad relativa del recinto, la cual presenta, gene-



**Tabla 9.** Registro de la curva estática disminuir el duty cycle de la resistencia de calefacción de 310 W desde el 100 %.

<b>Duty cycle (%)</b>	<b>Rango de temperatura (°C)</b>	<b>Rango de humedad (%HR)</b>
100	38.7 - 40	40.7 - 91.4
90	35.7 - 37.2	38.3 - 93.4
80	34 - 35	37.6 - 93.9
70	28.8 - 30	40.6 - 94.4
60	28.1 - 30.2	38.7 - 94.8
50	26.4 - 27.7	37 - 94.9
40	20.4 - 21.1	45 - 93.6
30	19.3 - 20.5	45.1 - 94
20	17.2 - 18.1	47.9 - 92.5
10	10.8 - 11.5	52.9 - 89.8
0	9 - 9.5	54.2 - 87.3

**Tabla 10.** Registro de la curva estática, en la cual se aumenta el duty cycle de la resistencia de calefacción de 310 W desde el 0 %.

<b>Duty cycle (%)</b>	<b>Rango de temperatura (°C)</b>	<b>Rango de humedad (%HR)</b>
0	9 - 9.5	54.2 - 87.3
10	13.1 - 13.7	50.5 - 89.8
20	13.7 - 14.6	50.6 - 92
30	19 - 20.6	44.8 - 93.2
40	19.6 - 20.8	46.2 - 93.5
50	24.4 - 25.5	42 - 93.8
60	26.1 - 27	42.3 - 94.5
70	30 - 31	58.9 - 84.4
80	33 - 34.1	37.6 - 95.1
90	37 - 38	37 - 93.6
100	38.7 - 40	40.7 - 91.4

ralmente, el mismo rango de oscilación, sin importar que el valor de *duty cycle* de dicho actuador aumente o disminuya, lo que da a entender que, existe la posibilidad de que el cambio o variación en el *duty cycle* de la resistencia de calefacción, no implique ningún efecto positivo o negativo en el comportamiento de la humedad relativa, por ende, dicha variable solo dependería del humidificador.

Una manera de justificar matemáticamente lo mencionado anteriormente, es por medio del coeficiente de correlación, el cual "proporciona información sobre la relación lineal existente entre dos variables cualesquiera. Básicamente, esta información se refiere a dos características de la relación lineal: la dirección o sentido y la cercanía o fuerza" (Lahura, 2003).

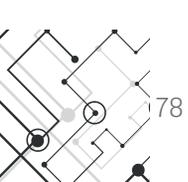
El coeficiente de correlación, además de ser independiente de las unidades de medida de las variables, se caracteriza por tomar valores dentro del intervalo cerrado  $[-1,1]$ . La interpretación del coeficiente de correlación depende del valor y del signo que tome y de las características de la muestra analizada (Lahura, 2003).

En este caso, se calcularon los coeficientes de correlación entre el *duty cycle* y la temperatura y el *duty cycle* y la humedad relativa, lo que dio como resultado un valor del 0.9846 y un -0.0656 respectivamente, valores muy cercanos a 1 y 0, lo que indica

una relación lineal perfecta y la ausencia de una relación lineal. Esta interpretación se ve reflejada en los diferentes datos tomados a la hora de realizar el registro de la curva estática, debido a que a medida que se aumenta el *duty cycle* de la resistencia de calefacción, la temperatura aumenta y si este disminuye, la temperatura también disminuye. La humedad relativa no muestra ningún patrón de cambio o comportamiento, al momento de aumentar o disminuir el *duty cycle* de la resistencia de calefacción.

Como se mencionó anteriormente, el registro de la curva estática se realizó al aumentar el *duty cycle* desde el 0 % y disminuir el *duty cycle* desde el 100 % en pasos del 10 %, con el fin de observar los valores estables de temperatura alcanzados en un mismo valor de *duty cycle*, cuando se llegaba a él desde el 0 % y desde el 100 % respectivamente. Es posible observar, al comparar las Tablas 9 y 10, que sí existe una variación no mayor a 4 °C en los valores estables de temperatura de un mismo *duty cycle*, fenómeno que se puede presentar debido a la propia inercia térmica del sistema de refrigeración, del sistema de calefacción y de los propios materiales de construcción que hacen parte de la Cámara de ambiente controlado.

Al tener un registro de datos completo que recorra todo el ciclo de trabajo de la resistencia de calefacción en unos pasos determinados, es posible determinar la zona de



operación (ver Tablas 11 y 12) y el punto Q o punto de operación, al cual va a ser sometido este actuador, para garantizar el rango de temperatura requerido por los ácaros para asegurar su supervivencia. El punto Q equivale a un *duty cycle* del 65 %.

**Tabla 11.** Zona de operación de la resistencia de calefacción de 310 W.  
Resultados al aumentar el duty cycle desde el 0 %.

<i>Duty cycle</i> (%)	Rango de temperatura (°C)	Rango de humedad (%HR)
50	24.4 - 25.5	42 - 93.8
60	26.1 - 27	42.3 - 94.5
70	30 - 31	58.9 - 84.4
80	33 - 34.1	37.6 - 95.1

**Tabla 12.** Zona de operación de la resistencia de calefacción de 310 W.  
Resultados al disminuir el duty cycle desde el 100 %.

<i>Duty cycle</i> (%)	Rango de temperatura (°C)	Rango de humedad (%HR)
80	34 - 35	37.6 - 93.9
70	28.8 - 30	40.6 - 94.4
60	28.1 - 30.2	38.7 - 94.8
50	26.4 - 27.7	37 - 94.9

### 5.2.2 Curva dinámica. Resistencia de calefacción de 310 W

La curva dinámica permitió conocer detalles que no se habían tenido en cuenta al momento de realizar los experimentos, para obtener el registro de la curva estática, además del surgimiento de nuevas problemáticas, que llevaron a proponer cambios y recomendaciones a la hora de trabajar con la Cámara de maduración ya acondicionada.

Inicialmente, se había determinado una zona de operación con un *duty cycle* entre el 50 % y el 70 % y un punto Q del 65 %, debido a que según los resultados obtenidos en la curva estática, alrededor de esos valores era posible garantizar el rango de temperatura requerido por el ácaro *Tetranychus Urticae* Koch. Sin embargo, al momento de polarizar, inmediatamente, el sistema desde la temperatura ambiente, sin haberlo llevado lentamente desde un *duty cycle* del 0 % hasta el punto Q, dio como resultado una curva (ver Figura 39), que presenta valores totalmente diferentes a los esperados, además de presentar oscilaciones inconsistentes de una amplitud de  $\pm 6^\circ\text{C}$  y de sobrepasar la temperatura requerida, para permitir la supervivencia de los ácaros.

Lo importante es no matar los ácaros, es preferible que su crecimiento sea más lento, que es lo que pasa cuando son sometidos a bajas temperaturas y, con lo cual, no están comprometidas sus vidas. Razón

por la que se estableció una nueva zona de operación (ver Tablas 13 y 14) y punto Q, además de trabajar inicialmente con un *duty cycle* del 0 % para polarizar el sistema, de esta manera, al encontrarse el interior del recinto cercano al valor mínimo de temperatura, se procede a llevar el sistema lentamente al punto de operación, con una variación del *duty cycle* del 10 % aproximadamente cada dos horas. Al llegar al punto Q, se espera a que se establezca la temperatura, con el fin de obtener la curva de polarización (ver Figura 40). El nuevo punto Q equivale a un *duty cycle* del 60 %.

Al comparar las gráficas de las Figuras 39 y 40, es posible observar cómo la amplitud de las oscilaciones disminuye, con el simple hecho de polarizar lentamente el sistema, desde aproximadamente la temperatura mínima alcanzada con un *duty cycle* del 0 %, lo que lleva a concluir que la respuesta de este sistema depende mucho de la historia de operación. Sin embargo, aunque la magnitud de las oscilaciones ya solo sean de  $\pm 4^\circ\text{C}$ , todavía se consideran inadecuadas, debido a que sobrepasan el rango de temperatura requerido por los ácaros, para garantizar su supervivencia. De nuevo se obtienen resultados totalmente diferentes a los mostrados en las Tablas 9 y 10.

Al revisar detalladamente los datos obtenidos durante las pruebas realizadas para obtener la curva de polarización del sistema, es posible apreciar que, durante el día el sistema alcanza la estabilización,



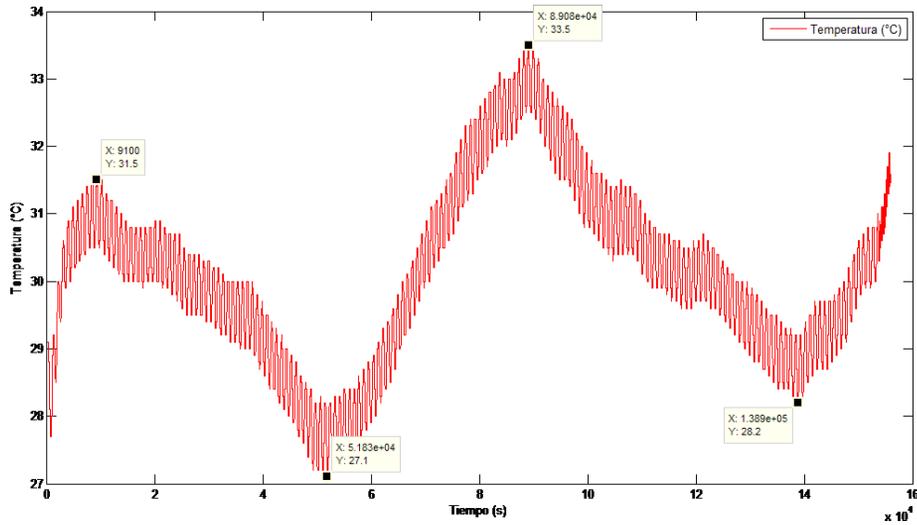


Figura 39. Curva de polarización con un duty cycle del 65 % (punto Q).

Tabla 13. Nueva zona de operación de la resistencia de calefacción de 310 W.  
Resultados al aumentar el duty cycle desde el 0 %.

Duty Cycle (%)	Rango de temperatura (°C)	Rango de humedad (%HR)
50	24.4 - 25.5	42 - 93.8
60	26.1 - 27	42.3 - 94.5
70	30 - 31	58.9 - 84.4

Tabla 14. Nueva zona de operación de la resistencia de calefacción de 310 W.  
Resultados al disminuir el duty cycle desde el 100 %.

Duty cycle (%)	Rango de temperatura (°C)	Rango de humedad (%HR)
70	28.8 - 30	40.6 - 94.4
60	28.1 - 30.2	38.7 - 94.8
50	26.4 - 27.7	37 - 94.9



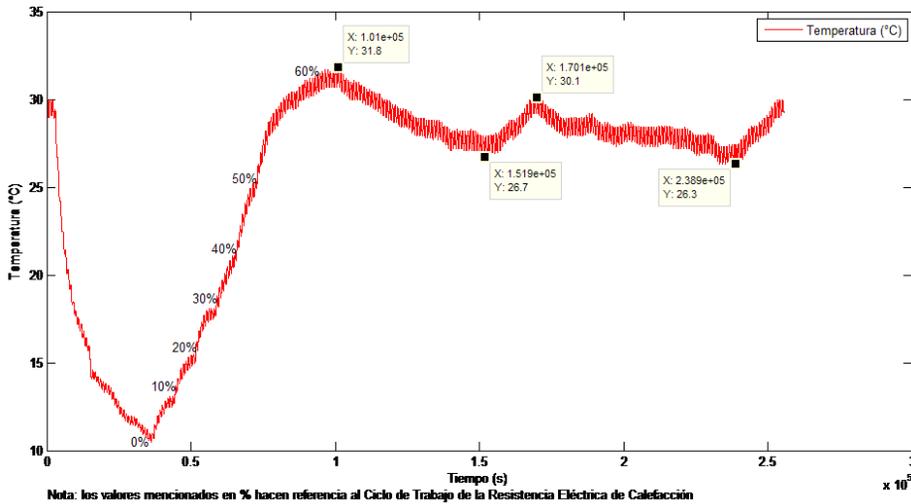


Figura 40. Curva de polarización con un duty cycle del 60 % (punto Q).

sin embargo, a altas horas de la noche y la madrugada ocurre una disminución de temperatura (ver Figura 41), lo que genera el comportamiento oscilatorio mostrado en las Figuras 39 y 40.

Estas pruebas no solo llevaron a determinar una nueva zona y punto de operación, sino, que fue posible observar qué tanto afecta la temperatura ambiente a la temperatura en el interior del recinto.

Esta prueba es realizada en lazo abierto, por lo que no se tenía ningún tipo de control, lo que hace el sistema sensible ante cualquier tipo de perturbación, como lo es la temperatura ambiente, la cual, en altas horas de la noche hasta la madrugada alcanza valores inferiores a los que llega normalmente durante el día. Esta disminución

de temperatura afecta considerablemente la temperatura en el interior del recinto, lo que ocasiona su disminución y le imprime un comportamiento oscilatorio, razón por la que los experimentos realizados para obtener la curva dinámica se realizaron dentro de unas horas de trabajo determinadas. Algo que vale la pena destacar, es que esta perturbación solo tiene efectos considerables, cuando la temperatura en el interior de la Cámara de ambiente controlado se encuentra a temperaturas elevadas. A bajas temperaturas, la noche y la madrugada no afectan considerablemente su comportamiento, horas que se aprovecharon para polarizar lentamente el sistema hasta la zona de operación, con el fin de realizar en el día el aumento del *duty cycle* y evitar al máximo la perturbación ocasionada por la disminución de la temperatura ambiente.

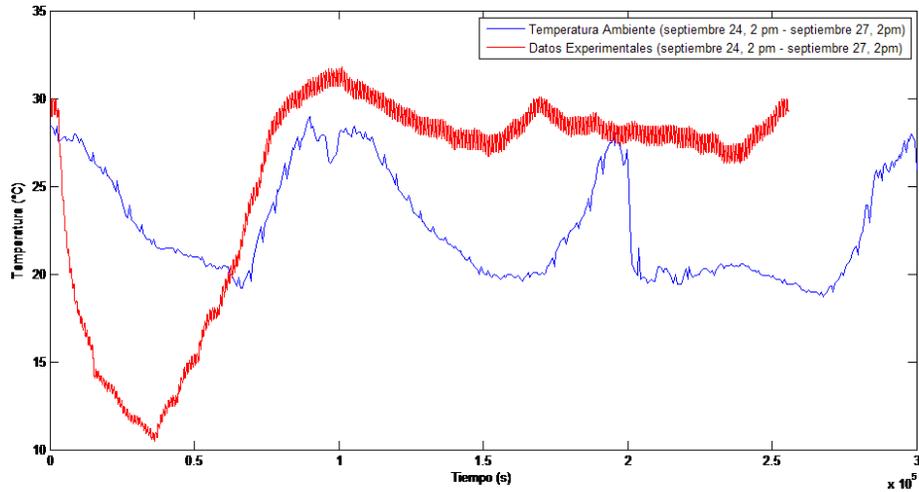


Figura 41. Perturbación de la temperatura ambiente.

Gracias a los cambios realizados en la zona de operación y a los problemas enfrentados a la hora de obtener la curva de polarización, fue posible encontrar la curva dinámica de la resistencia del sistema de calefacción (ver Figuras 42 y 43), la cual tuvo en cuenta toda la zona de operación, debido a que no se realizó alrededor de un punto determinado; es decir, que al momento de polarizar lentamente el sistema hasta llegar a un *duty cycle* del 50 %, este se aumentó en un 10 % sucesivamente, hasta llegar al 70 %, ya en este valor se disminuyó en pasos del 10 % hasta el 50 %. Al llegar a la zona de operación, los cambios realizados en el *duty cycle* solo se daban cuando la temperatura alcanzaba la estabilización o una oscilación en un rango definido.

En este caso, la polarización no se realizó al aumentar el *duty cycle* cada dos horas desde el 0 % como se había realizado en las pruebas anteriores, debido a que se observó que a partir del 30 %, este tiempo no era suficiente para lograr una menor variación en los datos sensados y el próximo escalón se daba, cuando todavía la temperatura aumentaba rápidamente. Por este motivo, a partir del 30 %, el *duty cycle* se aumentaba cada cuatro horas en pasos del 10 %, con el fin de obtener una curva más suave con relación a las pruebas anteriores.

De esta manera, fue posible observar la dinámica del sistema en la zona de interés y el modelo matemático de dicho actuador



se obtuvo al realizar un promedio entre los valores calculados, en cada uno de los pa-

ros realizados dentro de la zona de operación escogida.

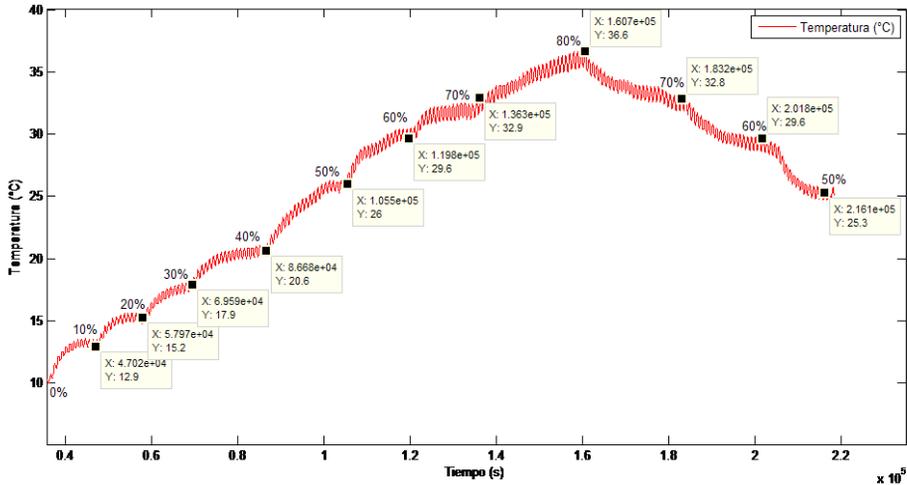


Figura 42. Curva dinámica de la resistencia de 310 W de calefacción.

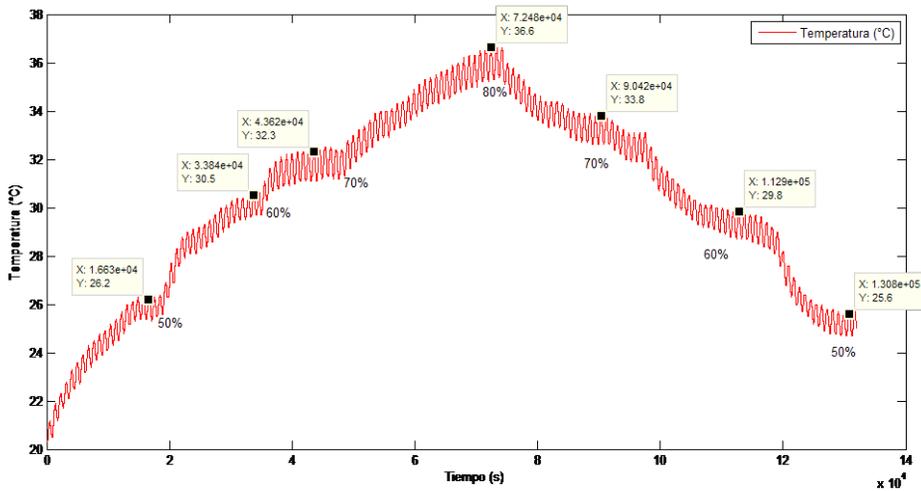


Figura 43. Curva dinámica de la resistencia de 310 W de calefacción en la zona de operación.

### 5.2.3 Prueba fallida modelamiento resistencia del humidificador

Como se mencionó anteriormente, la resistencia del sistema de humidificación es controlada por medio de un PWM, sin embargo, el comportamiento oscilatorio presente en la humedad relativa en el interior de la Cámara de ambiente controlado, significó nuevas problemáticas, que llevaron a realizar cambios en el *hardware* existente, los cuales ayudaron a simplificar el control implementado. Este actuador es sometido a las mismas condiciones de trabajo a las que fue sometida la resistencia del sistema de calefacción, en lo relacionado al funcionamiento del sistema de refrigeración y del sistema de ventilación.

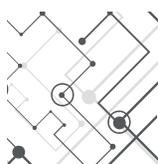
Para trabajar adecuadamente con el sistema de humidificación, se debe asegurar que el depósito de agua se encuentre lleno y, por lo tanto, el piloto que indica el nivel del agua se encuentre apagado, con el fin de evitar el daño de la resistencia de este sistema por sobrecalentamiento. Si el piloto se encuentra encendido, este sistema no funcionará a pesar de que el *software* de control le envíe la orden de actuar.

Algo que se tenía claro antes de pasar a determinar un ciclo de trabajo adecuado para la resistencia del sistema de humidificación era que, después de encender dicho actuador durante un tiempo determinado y apagarlo posteriormente, la humedad relativa en el interior del recinto aumentaba,

debido a que a pesar de que la resistencia del sistema de humidificación se encontraba apagada, el agua del depósito en donde esta se encontraba, aún permanecía caliente, lo que llevó a aumentar, poco a poco, la humedad relativa del sistema, sin la necesidad de encenderlo nuevamente. Esto dio a entender que el tiempo de encendido debe ser pequeño en comparación con el tiempo de apagado.

Vale la pena mencionar que las variaciones en la humedad relativa, gracias al sistema de humidificación, se dan mucho más rápido que los cambios en la temperatura ocasionados por el sistema de calefacción, observación válida solo cuando ambos actuadores funcionan por separado; es decir, los dos no se encuentran encendidos o están sometidos a un ciclo de trabajo al mismo tiempo. Razón por la cual, el ciclo de trabajo de este actuador debe ser menor al ciclo de trabajo al cual es sometida la resistencia del sistema de calefacción. La resistencia del sistema de humidificación funciona bajo un ciclo de trabajo de tres minutos.

Inicialmente, se buscó el valor máximo del *duty cycle* al cual se sometería este actuador, debido a que se podría dar el caso de que valores inferiores al 100 % fueran lo suficientemente altos, como para llevar la humedad relativa del sistema a un valor del 99.9 %, valor máximo dado por el sensor. En primer lugar, se realizaron pruebas con un *duty cycle* del 60 % (ver Figura 44). El comportamiento de la humedad relativa durante esta prueba mostró resultados



importantes, al ser comparada con los resultados obtenidos bajo las condiciones normales de operación del sistema (ver Fi-

gura 45), en donde es posible observar el amplio rango de oscilación, con una magnitud del 30 % de la variable en cuestión.

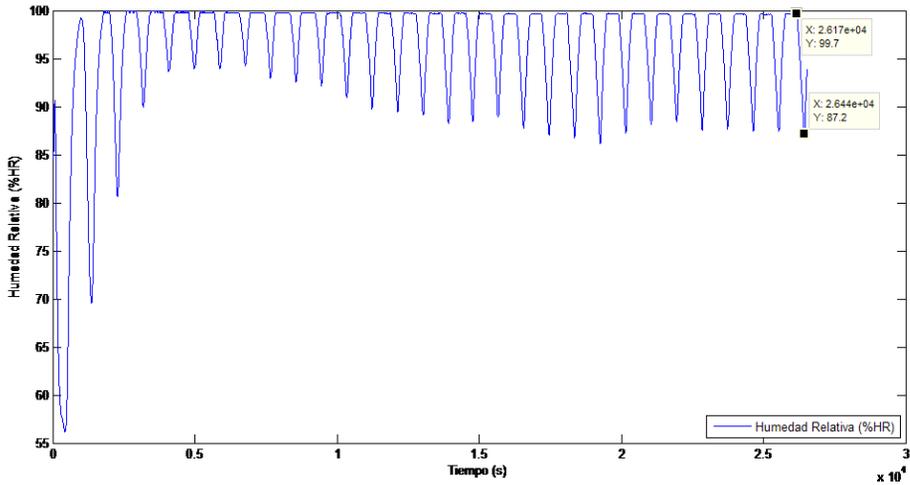


Figura 44. Comportamiento de la humedad relativa con un duty cycle del 60 %.

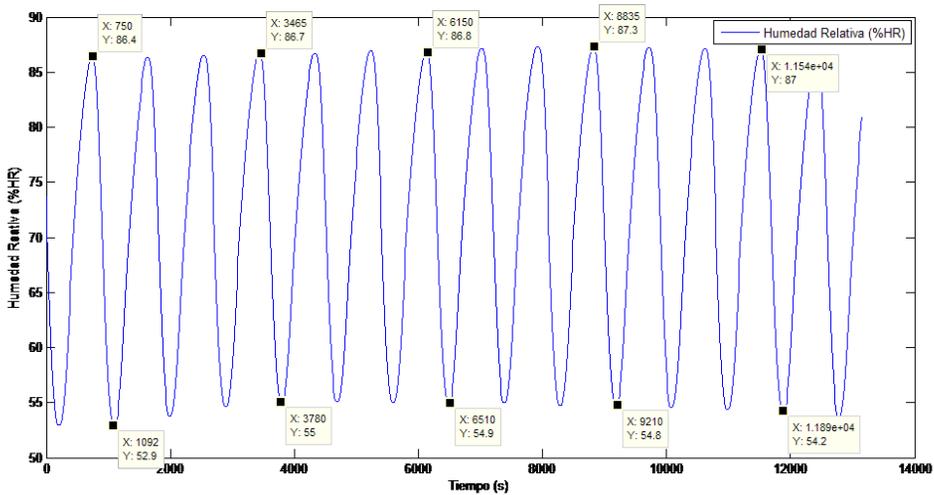


Figura 45. Comportamiento de la humedad relativa bajo las condiciones normales de operación del sistema.

Se tenía pensado que el sistema de humidificación se encargaría de disminuir el rango de variación de la humedad relativa, con el fin de hacer que esta variación solo se dé dentro del rango requerido por los ácaros. Sin embargo, el humidificador solo aumenta la humedad relativa, no la disminuye, por lo que al momento de usarlo, la gran oscilación inicial disminuía, al aumentar tanto su límite inferior como superior, lo que la hacía llegar cada vez más a valores cercanos del 99.9 %. Esto dio a entender que, a medida que se aumente el *duty cycle*, la variación de la humedad relativa va a ser cada vez menor, pero más cercana a valores superiores al 90 %, valores inaceptables para garantizar la supervivencia del ácaro *Tetranychus Urticae* Koch.

Esta variación en la humedad relativa se debe al ciclo intermitente al cual se encuentra sometido el sistema de refrigeración, debido a que mientras este se encuentra encendido, la humedad relativa logra alcanzar los valores requeridos por los ácaros, sin embargo, durante los próximos ocho minutos que permanece apagado, la humedad relativa en el interior del recinto vuelve a aumentar, hasta alcanzar valores por encima del 90 %. Este comportamiento oscilatorio no se presenta cuando el sistema de refrigeración se encuentra encendido todo el tiempo, pues la humedad relativa se logra estabilizar en un valor determinado o presenta variaciones aproximadamente de  $\pm 1\%$  (ver Figura 46).

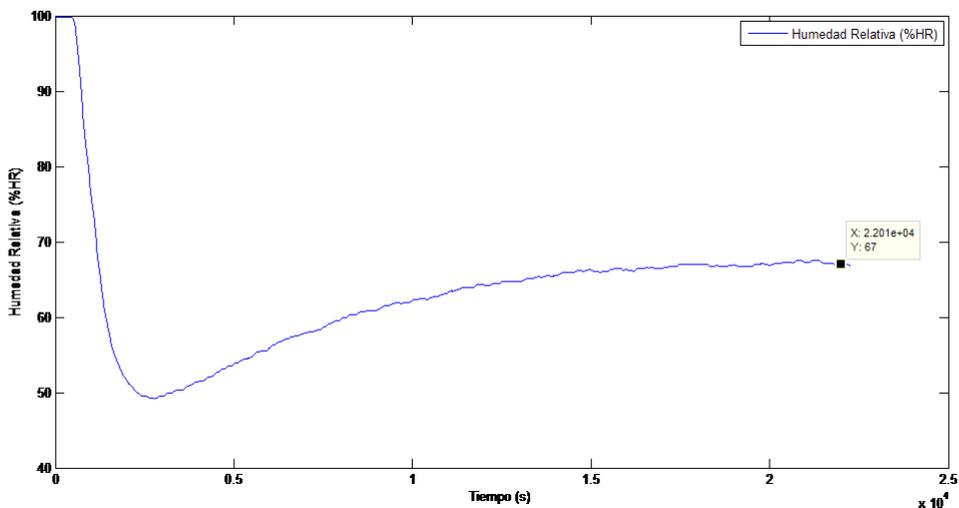


Figura 46. Comportamiento de la humedad relativa bajo un funcionamiento continuo del sistema de refrigeración y ventilación.

Lo anterior llevó a retomar una idea que se había planteado inicialmente, la cual incluye modificar las condiciones normales de operación del sistema ya establecidas y el reemplazo de la resistencia de 310 W del sistema de calefacción, con el fin de lograr alcanzar las condiciones de humedad y temperatura necesarias por los ácaros para garantizar su supervivencia, bajo un funcionamiento continuo del sistema de refrigeración, lo que implica valores de humedad y temperatura más estables.

El compresor ya no sería sometido a un ciclo de trabajo intermitente, sino, que, se encontraría encendido todo el tiempo, al igual que los ventiladores. Gracias a estas nuevas condiciones normales de operación, el sistema de humidificación solo sería necesario para llevar la humedad relativa a un valor determinado por medio de un PWM, con un ciclo de trabajo de un mi-

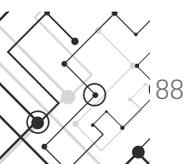
nuto y un *duty cycle* del 50 %. Este sistema solo va a ser activado cuando la humedad relativa es inferior a un valor determinado escogido por el usuario, entre un rango del 40 %HR y el 60 %HR, lo que simplifica el control implementado al solo controlar la resistencia del sistema de calefacción.

#### 5.2.4 Resistencia de calefacción de 1500 W. Curva estática y dinámica

La curva estática y dinámica de este nuevo actuador se obtuvo de la misma manera que la resistencia de 310 W, bajo las nuevas condiciones normales de operación de la Cámara de ambiente controlado (ver Tabla 15). Estas pruebas no se tuvieron en cuenta el aumento de temperatura ocasionada por el sistema de humidificación, cuando se encontraba en funcionamiento.

Tabla 15. Nuevas condiciones normales de operación de la Cámara de ambiente controlado.

Actuador	Ciclo de trabajo	Tiempo de encendido	Tiempo de apagado
Compresor	-	Todo el tiempo	-
Ventiladores	-	Todo el tiempo	-



La curva estática no cubre todos los valores hasta el 100 % del *duty cycle*, debido a que los valores por encima del 60 % superaban fácilmente los 45 °C, temperaturas que pueden llegar a causar un daño en el evaporador del sistema de refrigeración, al ser sometido a altas presiones de trabajo. Se tomó la decisión de no trabajar con temperaturas superiores a los 47 °C.

Al realizar el registro de la curva estática (ver Tabla 16) de este actuador, se tuvo en cuenta la temperatura ambiente, al momento de tomar el valor de estado estable de la temperatura en el interior de la Cámara de ambiente controlado, pues de esta manera, fue posible explicar la diferencia en algunos valores tomados de la temperatura ya estable, en un mismo valor de *duty cycle*, cuando se llegaba a él desde el 0 % o desde el 60 %.

La temperatura en el interior del recinto se ve afectada no solo por la propia inercia de los diferentes sistemas y materiales que conforman la cámara ya acondicionada, sino, también, por el medio ambiente. Este último permite que la cámara alcance un valor determinado, el cual tiene una pequeña variación al depender de qué tan caliente o frío sea ese día.

La curva estática (ver Figuras 47 y 48) obtenida permite determinar la zona de ope-

ración (ver Tablas 17 y 18) y el punto Q, en los cuales va a trabajar la nueva resistencia de calefacción de 1500 W. El punto Q equivale a un valor de *duty cycle* del 40 %, lo que da un valor de temperatura aproximadamente entre 29 °C y 30 °C, rango que satisface las condiciones de temperatura requerida por los ácaros.

Esta zona de operación posee valores de humedad relativa cercanos a los deseados, solo necesita de un pequeño “empujón” por parte del sistema de humidificación, para garantizar las condiciones de temperatura y humedad relativa, las cuales permiten la supervivencia del ácaro *Tetranychus Urticae* Koch.

La curva dinámica (ver Figuras 49 y 50) que se obtuvo, en este caso, polarizó lentamente el sistema, hasta el punto de operación definido anteriormente, al aumentar el valor del *duty cycle* desde el 0 % hasta el 40 % en paso del 10 % cada cuatro horas, a partir de valores cercanos al valor mínimo de temperatura alcanzado en el interior del recinto. Al llegar al punto Q, se aplicó un paso positivo, luego, uno negativo, a continuación, otro negativo y, después, otro más positivo, en el cual se dejó estabilizar en cada caso. Los pasos aplicados a partir del punto de operación fueron de una amplitud del 10 %.



Tabla 16. Registro de la curva estática de la resistencia de calefacción de 1500 W.

Duty cycle (%)	Rango de temperatura (°C)	Rango de humedad (%HR)	Temperatura ambiente (°C)
0	5.1 - 5.2	57.8 - 58.4	23.4
10	18.1	51 - 51.1	22.9
20	22.7	43.2 - 43.3	24.4
30	26	39.3 - 39.4	23.8
40	29.2	35.7 - 36.1	23
50	36.9 - 37	32.6 - 35.4	19.9
60	45.2 - 45.3	34.3 - 30.8	24.4
50	36.5 - 36.6	31 - 32.7	27.6
40	30.1 - 30.2	34 - 34.3	20.7
30	25.2	38.5 - 39	19.3
20	20.8	42.7 - 42.8	24
10	16.1	47.2 - 47.8	26.7
0	10.5	56.8 - 57.7	27

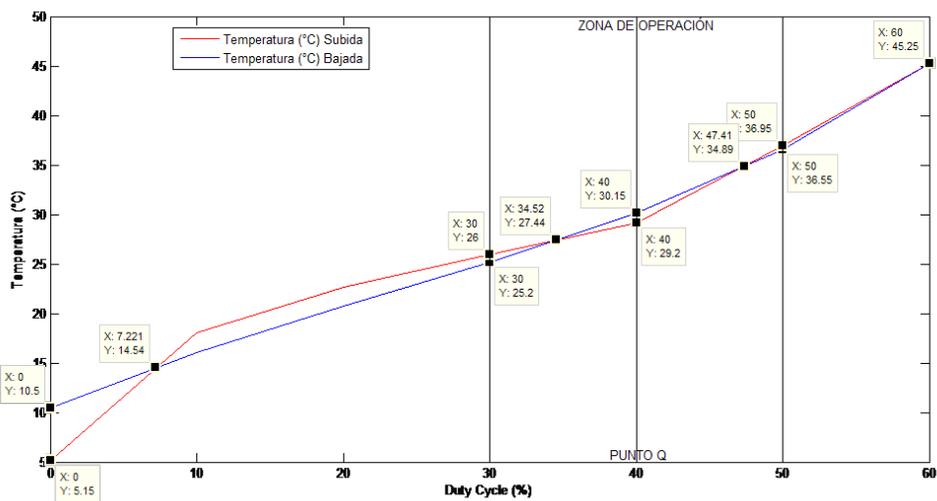
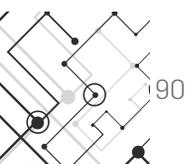


Figura 47. Curva estática de la resistencia de 1500 W del sistema de calefacción.



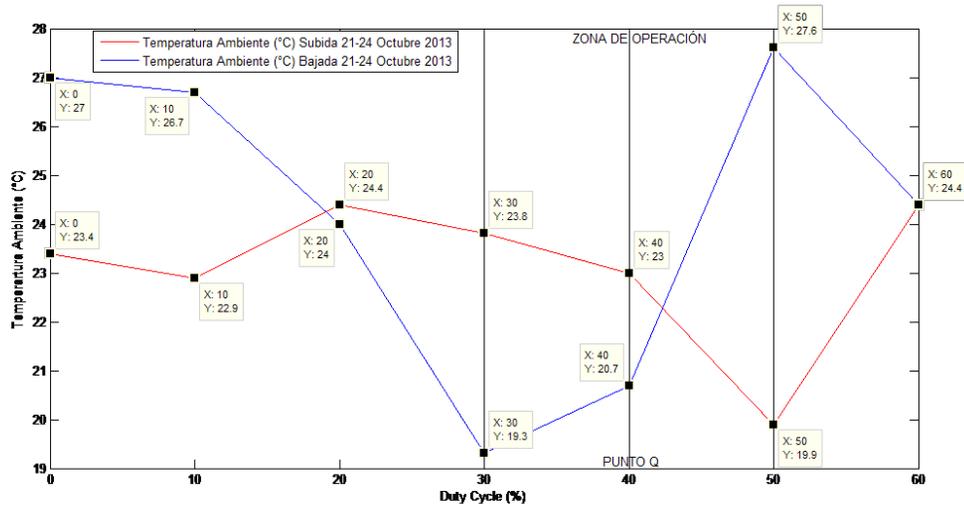


Figura 48. Curva estática de la resistencia de 1500 W del sistema de calefacción al restar la temperatura ambiente en cada duty cycle.

Tabla 17. Zona de operación de la resistencia de calefacción de 1500 W. Resultados al aumentar el duty cycle desde el 0 %.

Duty cycle (%)	Rango de temperatura (°C)	Rango de humedad (%HR)	Temperatura ambiente (°C)
30	26	39.3 - 39.4	23.7
40	29.2	35.7 - 36.1	22.4
50	36.9 - 37	32.6 - 35.4	20.9

Tabla 18. Zona de operación de la resistencia de calefacción de 1500 W. Resultados al disminuir el duty cycle desde el 60 %.

Duty cycle (%)	Rango de temperatura (°C)	Rango de humedad (%HR)	Temperatura ambiente (°C)
50	36.5 - 36.6	31 - 32.7	26.2
40	30.1 - 30.2	34 - 34.3	18.2
30	25.2	38.5 - 39	22.7



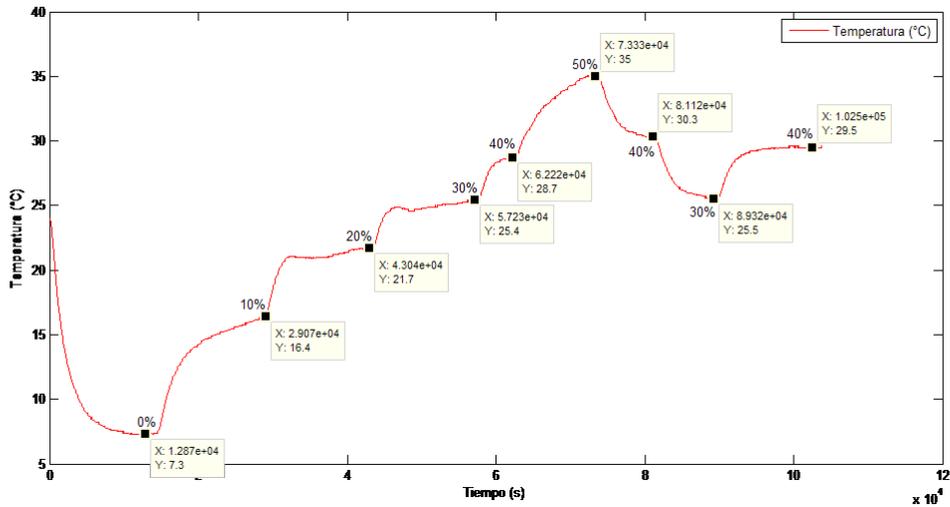


Figura 49. Curva dinámica de la resistencia de 1500 W del sistema de calefacción.

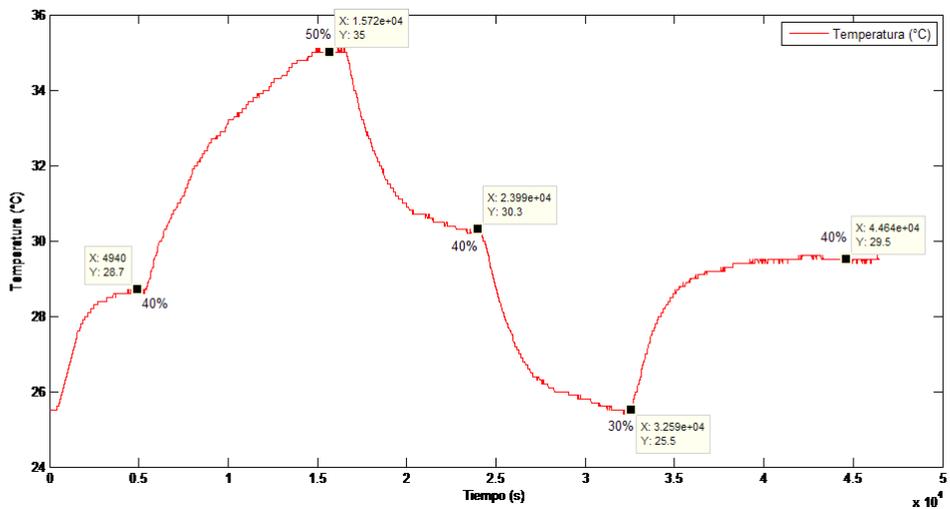


Figura 50. Curva dinámica de la resistencia de 1500 W del sistema de calefacción en la zona de operación.

Esta curva dinámica se realizó alrededor de un punto determinado, a diferencia de la curva dinámica obtenida con la resistencia de 310 W, la cual se enfocó en recorrer toda la zona de operación, al aplicar tanto escalones de subida como de bajada, pruebas que incluyeron la noche y la madrugada, en donde se dieron bajas temperaturas, debido a que estas disminuciones no afectaron mucho el sistema, gracias a la nueva resistencia de calefacción instalada. La noche y la madrugada lograron disminuir la temperatura en el interior del recinto aproximadamente unos 0.5 °C.

Este nuevo actuador y las nuevas condiciones normales de operación muestran un comportamiento más estable de la temperatura y de la humedad relativa en el interior de la Cámara de ambiente controlado, además de incluir, para ambas variables, el rango deseado para asegurar la supervivencia de los ácaros con los cuales se va a experimentar.

### 5.3. Modelo en tiempo continuo de la resistencia de calefacción de 1500 W

La resistencia del sistema de calefacción presenta una curva característica de un sistema de primer orden con retardo (ver Figura 51), cuya función de transferencia es:

$$G_1(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-Ts},$$

en donde,  $K$ ,  $\tau$  y  $T$  son, respectivamente, la ganancia en estado estacionario, la constante de tiempo y el tiempo del retardo del sistema, datos tomados de las pruebas realizadas en lazo abierto. Estos parámetros se calculan en función de las características físicas del sistema.

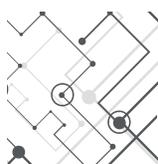
“Se denomina ganancia estática de un sistema lineal estable a la relación entre su salida y entrada, cuando ambas ya se han estabilizado” (Campoy, 2010). Se obtiene al aplicar la siguiente ecuación,

$$K = \frac{Y_{SS}}{X_{SS}},$$

en donde,  $Y_{SS}$  y  $X_{SS}$  son, respectivamente, el valor de la salida y la entrada en estado estable.

“La constante de tiempo del sistema expresa un atraso dinámico” (Sin autor, 2007) y se define como el tiempo que tarda el sistema en alcanzar el 63 % de su salida en estado estable (Control de Procesos, 2006). Entre más pequeña es la constante de tiempo, la respuesta del sistema es más rápida.

Los retardos deben ser considerados en la fase de diseño, debido a que su presencia reduce tanto el margen de fase como el margen de ganancia, lo que puede llegar a inestabilizar la respuesta del sistema en lazo cerrado (González, 2011).



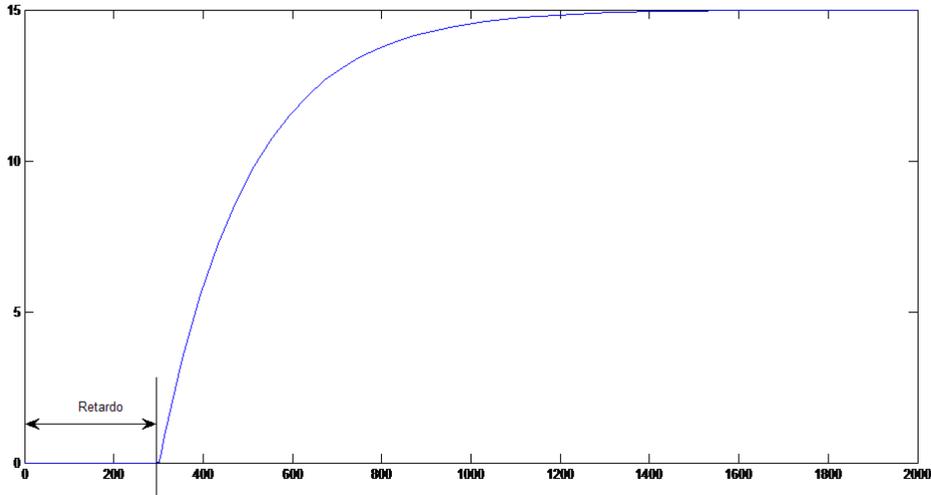


Figura 51. Curva característica de un sistema de primer orden con retardo.

Como el término utilizado para representar un retardo es no lineal, este debe ser aproximado, mediante alguna función lineal, si se desea utilizarlo en algún sistema lineal (Flores, 2006a). Este es el propósito de la aproximación de McLaurin utilizada en este caso, la cual se muestra a continuación,

$$e^{-Ts} = \frac{1}{1 + Ts + \frac{T^2s^2}{2}}$$

en donde T representa el instante en el que el sistema cambia significativamente

de su valor de reposo, un tiempo después de la aplicación de un cambio a la entrada.

En las diferentes simulaciones realizadas se muestra el comportamiento del modelo matemático, sin el retardo aproximado y con su respectiva aproximación, esto con el fin de verificar cuál de los dos asemeja mejor el comportamiento real del sistema. Se debe tener en cuenta que si la magnitud del retardo es muy grande, las aproximaciones ya no son válidas y se debe de trabajar con estructuras de control, que explícitamente tomen en cuenta la presencia del retardo en el diseño del controlador (Flores, 2006b).

Al utilizar la aproximación de McLaurin para el retardo, se obtiene la siguiente función de transferencia:

$$G_{2(s)} = \left( \frac{K}{\tau_s + 1} \right) \left( \frac{1}{1 + Ts + \frac{T^2s^2}{2}} \right)$$

Los parámetros a reemplazar en (1) y en (4) se obtienen a través de los escalones de subida y bajada aplicados a la resistencia del sistema de calefacción, al encontrarse ya polarizada (ver Tabla 19), valores que son promediados (ver Tabla 20) con el fin de obtener las funciones de transferencia mostradas en (5) y en (6).

**Tabla 19.** Parámetros del modelo matemático de la resistencia del sistema de calefacción.

<i>Duty cycle (%)</i>	$X_{ss}$	$Y_{ss}$	K	t(s)	T (s)
Del 40 % al 50 %	100	6.3	0.063	3861	182
Del 50 % al 40 %	100	4.7	0.047	2080	195
Del 40 % al 30 %	100	4.8	0.048	1924	182
Del 30 % al 40 %	100	4	0.04	1690	182

**Tabla 20.** Promedio de los parámetros del modelo matemático de la resistencia del sistema de calefacción.

$X_{ss}$	$Y_{ss}$	K	t(s)	T (s)
100	4.95	0.0495	2388.75	185.25

$$G_{1(s)} = \frac{0.0495}{2388.75s + 1} e^{-185.25s}$$

$$G_{2(s)} = \left( \frac{0.0495}{2388.75s + 1} \right) \left( \frac{1}{1 + 185.25s + \frac{185.25^2 s^2}{2}} \right)$$

$$G_{2(s)} = \frac{0.0495}{4.099 \times 10^7 s^3 + 4.597 \times 10^5 s^2 + 2574s + 1}$$

Se utilizó el *software* MATLAB® y Simulink® para verificar que el modelo matemático obtenido sí coincidiera con la respuesta real del sistema, razón por la cual, se simuló la prueba realizada experimentalmente para obtener la curva dinámica, gráfica que se superpuso con los resultados experimentales (ver Figuras 52 y 53), para mostrar qué tan fiel es el modelo al comportamiento real del sistema. Hay que resaltar que las simulaciones realizadas no tienen en cuenta ningún tipo de perturbación, motivo por el cual, en algunos casos, la respuesta real del sistema puede alcanzar valores mayores o menores a los esperados por la simulación. Las simulaciones se realizan con el sistema ya polarizado.

Al comparar las gráficas obtenidas por medio de la simulación con los resultados ex-

perimentales, es posible observar su gran similitud en la zona de operación, debido a que por fuera de ella no se consideraron los escalones de subida y bajada, dentro del promedio de los parámetros de la función de transferencia, sin embargo, muestran comportamientos similares, aunque su valor de estado estable sea diferente. Tanto la función de transferencia, que incluye el retardo puro, como la que incluye su aproximación se asemejan al comportamiento real del sistema, dentro de la zona de operación, lo que da a entender que cualquiera de las dos funciones de transferencia pueden ser utilizadas para diseñar el control PID implementado. En este caso, se optó por utilizar la función de transferencia, que utiliza la aproximación de McLaurin.

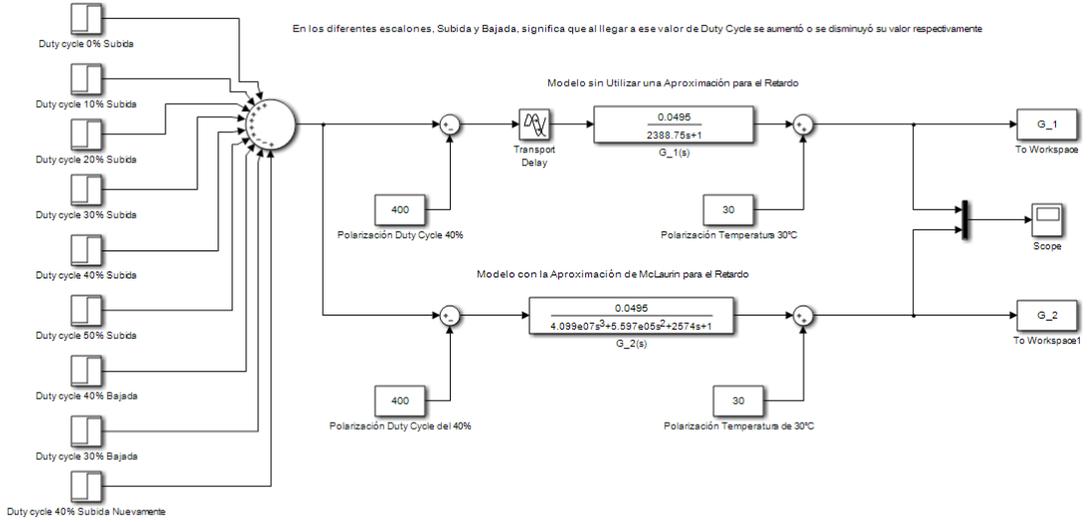


Figura 52. Diagrama de bloques implementado en Simulink® para obtener la curva dinámica.

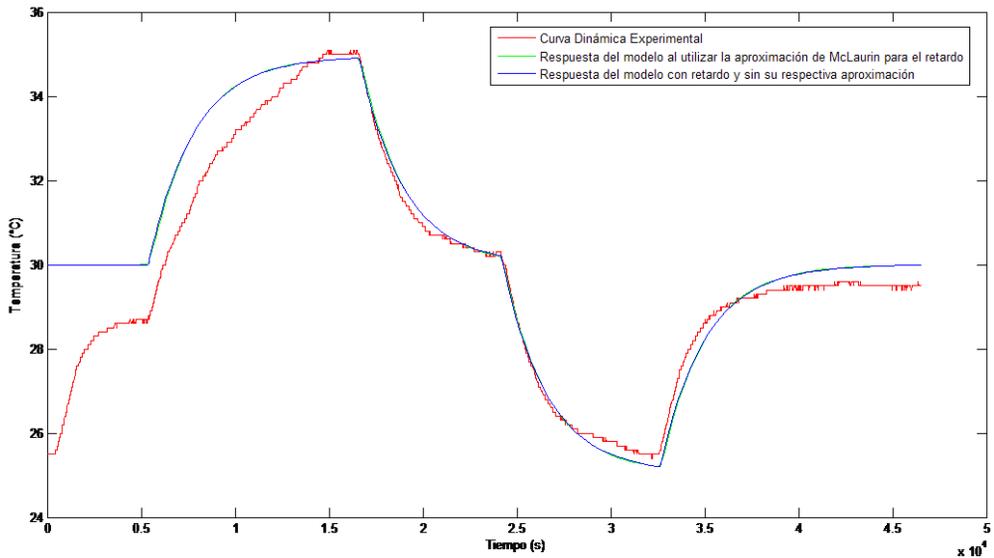


Figura 53. Comparación entre curva dinámica experimental y curvas dinámicas simuladas.

## 6. Técnicas de control clásico implementadas



Las técnicas de control implementadas sobre la resistencia de calefacción de la Cámara de ambiente controlado se basaron en técnicas de control clásicas, se hizo uso del control PID, con el cual se buscó estabilizar la temperatura en los valores deseados, sin dejar de tomar en cuenta la humedad relativa que, con ayuda de la resistencia de calefacción y del humidificador, se logró estabilizar en los valores que se requieren.

### 6.1. Control PID

Un control PID (Proporcional Integral Derivativo) es un sistema de control realimentado que, mediante un actuador, es capaz de mantener una variable de un proceso en un punto deseado, dentro del rango de medición del sensor que la mide, y que para su funcionamiento, le aplica al error las operaciones matemáticas de integración, derivación y multiplicación por constantes,

como se muestra en la Figura 54. Dada su sencillez, este tipo de solución es la que más se encuentra en el ámbito industrial, para el control de procesos continuos univariados (Botero, 2009).

El propósito de un control PID es hacer que el error en estado estacionario entre la señal de referencia y la señal de salida de la planta sea cero, de manera asintótica en el tiempo, lo que se logra mediante el uso de la acción integral. Además, el controlador tiene la capacidad de anticipar el futuro, a través de la acción derivativa que tiene un efecto predictivo sobre la salida del proceso.

La acción proporcional (P) genera un cambio en la entrada (variable manipulada) directamente proporcional a la desviación, con respecto al punto de ajuste (error). La acción integral (I) genera un cambio en la entrada proporcional a la integral del error y su principal propósito es eliminar las llamadas desviaciones del estado estacionario (*offset*). La última acción y, comúnmente, menos usada, es la derivativa (D), la cual es utilizada en algunos casos para incrementar la velocidad de respuesta del sistema. Esta acción produce un cambio en la entrada proporcional a la derivada del error, otorgándole al controlador la capacidad de anticiparse a la trayectoria del mismo. La salida total del controlador es la suma de las contribuciones de las tres acciones ya mencionadas. Para la sintonía de un controlador de este tipo es necesario, entonces, definir las constantes de pro-

porcionalidad que están ligadas a cada una de las acciones (Améstegui, 2001).

La ecuación en el dominio del tiempo del controlador PID, al excluir la polarización, es:

$$u(t) = u_p(t) + u_i(t) + u_d(t)$$

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_{-\infty}^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt},$$

donde  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  son, respectivamente, las constantes proporcional, integral y derivativa.

La parte proporcional aporta a la variable manipulada una cantidad equivalente al error multiplicado por la constante proporcional. De persistir el error, la integral actúa sobre este, con el cual se trataba de llevarlo a cero. Por último, la parte derivativa mide la velocidad de los cambios en la señal de error, lo que permite regular la velocidad de respuesta a la acción de control.

A pesar de que los controladores PID tienen solo tres parámetros, no es fácil, sin un procedimiento sistemático hallar unos buenos valores para los parámetros. De hecho, una visita a una planta de procesos, usualmente, podría mostrar que un gran número de controladores PID se encuentran pobremente sintonizados (Calderón, 2009).

Los controladores PID son suficientes para resolver el problema de control de muchas



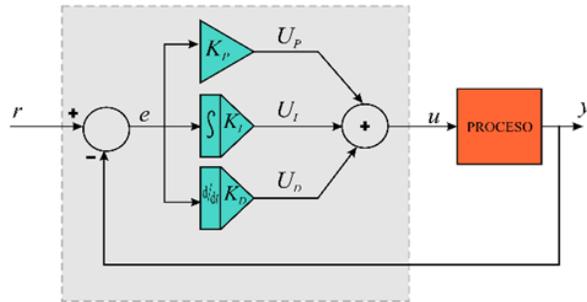


Figura 54. Control PID en lazo de realimentación. Reproducida con permiso de Botero (2009).

aplicaciones en la industria, particularmente, cuando la dinámica del proceso lo permite (en general, procesos que pueden ser descritos por dinámicas de primer y segundo orden) y los requerimientos de desempeño son modestos (generalmente, limitados a especificaciones del comportamiento del error en estado estacionario y a una rápida respuesta a cambios en la señal de referencia) (Calderón, 2009).

En la actualidad, el control PID dispone de una serie de prestaciones, que en el pasado han sido consideradas como secretos de los fabricantes. Un par de ejemplos típicos de este tipo de prestaciones son las técnicas de conmutación de modos de control y el *antiwindup* del integrador.

Los controladores PID han sobrevivido a muchos cambios en la tecnología a lo largo de su historia. Desde los antiguos reguladores de *Watt*, de la época de la Revolución Industrial, los controladores neumáticos, los controladores analógicos eléctricos y

electrónicos (primero, implementados con válvulas y, luego, con circuitos integrados), hasta los modernos controladores basados en microprocesadores que proporcionan una mayor flexibilidad, debido a su fácil programación. El microprocesador ha tenido una influencia dramática sobre el desarrollo del controlador PID; ha permitido brindar nuevas oportunidades, para implementar funciones adicionales, como el ajuste automático de parámetros y los cambios de modos de control (Améstegui, 2001).

El desarrollo de los sistemas de control PID está también influenciado por el desarrollo en el área de la comunicación de datos de campos, lo que ha permitido su inserción como módulos importantes en los esquemas de control distribuido. En este sentido, la capacidad de comunicación de estos dispositivos con otros dispositivos de campo, como PLCs y otros sistemas de control de niveles superiores, es una función necesaria en los modernos controladores PID (Calderón, 2009).

### 6.1.1 Instrumentación necesaria para el correcto funcionamiento de un controlador PID

- Un sensor, que mida la salida del sistema. Puede ser, por ejemplo, un termómetro, un sensor óptico y un caudalímetro, entre otros.
- Un controlador, que genere la señal que gobierna al actuador.
- Un actuador que modifique al sistema de manera controlada. Puede ser, por ejemplo, una válvula, resistencia eléctrica y motor, entre otros (Botero, 2009).

“Cuando los modelos matemáticos del sensor y del actuador no incluyen dinámicas importantes, es común incluirlos dentro del modelo general del proceso” (Botero, 2009).

#### 6.1.1.1 Sensor

El sensor proporciona una señal, analógica o digital, al controlador, la cual representa el punto actual en el que se encuentra la salida del proceso o sistema. Para transmitir la señal, normalmente, se efectúa una transformación a algún protocolo estandarizado, p.ej. en forma de tensión eléctrica (p. ej. 0-10 VCD), intensidad de corriente eléctrica (p. ej. 4-20 mA), frecuencia o como un número en un canal digital (p.ej. Modbus) (Botero, 2009).

#### 6.1.1.2 Actuador

“El actuador permite manipular la entrada de un proceso; para hacerlo debe controlar el flujo de ingreso de materia o energía al sistema” (Botero, 2009). Es el componente que recibe la señal de control del controlador y produce la variación deseada en la variable manipulada.

#### 6.1.1.3 Controlador

El controlador lee una señal externa que representa el valor que se desea alcanzar. Esta señal recibe el nombre de punto de referencia o SetPoint (SP), el cual debe ser de la misma naturaleza y del mismo rango de valores, que la señal que proporciona el sensor. El controlador resta la señal de salida, es decir, la variable controlada, a la señal de punto de referencia (SP), lo que permite obtener así la señal de error, que determina en cada instante la diferencia que hay entre el valor deseado y el valor medido. Al usar dicho error y un algoritmo apropiado, el controlador calcula el comando que se envía al actuador, usualmente, transformada mediante algún protocolo, para ser transmitida hasta el lugar distante donde se ubique el actuador” (Botero, 2009).

Las tres componentes de un controlador PID son: acción *Proporcional* (P), acción *Integral* (I) y acción *Derivativa* (D). La señal



de error es utilizada por cada una de las tres componentes de un controlador PID propiamente dicho, para generar las tres señales que, sumadas, componen la señal que el controlador va a utilizar para gobernar al actuador.

El peso de la influencia que cada una de estas partes tiene en la suma final viene dado por constantes de sintonía, las cuales se explicarán a continuación:

### 6.1.2 Acción proporcional

La acción proporcional consiste en el producto entre la señal de error y la constante proporcional. La acción de este componente del PID únicamente se encuentra activa, cuando el error es diferente de cero. Al tratar con sistemas tipo cero sometidos a referencias tipo escalón, la acción proporcional por sí sola nunca es capaz de eliminar por completo el error en estado estable, cuya magnitud dependerá del valor de esta constante. Entre mayor sea el valor de la constante proporcional, menor será el error. Sin embargo, esto no afirma que es posible trabajar con valores muy altos, que se encarguen de eliminar por completo el error permanente, debido a que para cualquier caso real existe un valor límite para esta constante, a partir del cual, el sistema se comporta de manera inestable al oscilar indeseablemente (Botero, 2009).

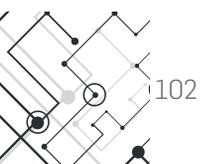
La acción proporcional no tiene memoria, por tanto, la mejor manera de solucionar el error permanente y hacer que el sistema

contenga alguna componente que tenga en cuenta la historia del error, es incluir y configurar la acción integral y, si al agregar dicha acción fuese necesario proveer otra para evitar la inestabilización del sistema, entonces, se debe incluir la componente derivativa. La acción integral y la acción derivativa constituyen la componente dinámica del control PID, mientras que la acción proporcional es la componente estática.

Industrialmente, es común expresar la constante de acción proporcional como una banda, la banda proporcional (*BP*), la cual resulta tener una relación inversa con la constante proporcional, es decir:

$$BP \propto \frac{1}{Kp} \times 100 \%,$$

Físicamente, la *BP* se interpreta como aquella región alrededor del SP, por fuera de la cual el controlador proporcional saturará al actuador, es decir, que llevará el comando de salida del controlador al 100 % si el error es positivo y está por fuera de la banda o al -100 % (léase 0 %, si el sistema no permite al actuador reversar su acción), si el error es negativo y por fuera de la banda. En otras palabras, el controlador solamente se comportará linealmente, si el error del proceso se encuentra dentro de la banda proporcional, lo cual es equivalente a decir que la salida del proceso se encuentra en la vecindad del punto de operación, lo que



permite entender que el tamaño de dicha vecindad es precisamente la banda proporcional (Botero, 2009).

La constante de proporcionalidad se puede ajustar como el valor de la ganancia del controlador o como el porcentaje de banda proporcional. Puede entenderse la banda proporcional como el valor del error tal que, al multiplicarlo por  $Kp$ , genera una acción de control igual al máximo valor comandable al actuador.

### 6.1.3 Acción integral

El modo de control integral tiene como propósito disminuir y eliminar el error en estado estacionario. El error es multiplicado por una constante ( $Ki$ ), luego, es integrado, posteriormente, la respuesta integral es adicionada al modo *Proporcional*, para formar el control P+I, con el propósito de obtener una respuesta estable del sistema sin error estacionario, incluso, en sistemas tipo cero (0) ante entradas tipo escalón (Botero, 2009), además de mejorar la respuesta transitoria del sistema, al reducir el sobrepaso máximo, gracias a la acción proporcional.

Nótese que, en sistemas tipo uno (1), el integrador ya hace parte del proceso.

En ese caso es posible que no sea necesario agregarlo en el controlador, a menos

que sea de interés lograr un error estacionario nulo, ante entradas tipo rampa.

En la práctica industrial es común anular este modo de control, cuando el error se encuentra por fuera de la banda proporcional, para evitar efectos no lineales de saturación del integrador (i.e. *windup*). También es común expresar esta constante como un tiempo, el tiempo integral, bajo el supuesto de que al alterar la constante proporcional esta debe afectar también a la constante integral, pero debe ser respetado el tiempo de integración del error (Botero, 2009).

El tiempo integral es inversamente proporcional a la constante de integración.

La ecuación que los relaciona es:

$$Ki = \frac{Kp}{Ti},$$

El tiempo integral puede entenderse como el tiempo que tardaría la integral, si el error permaneciera constante, en igualar el valor de la acción proporcional.

### 6.1.4 Acción derivativa

La acción derivativa se agrega con propósito de estabilización y se manifiesta cuando hay un cambio en el



valor absoluto del error; es decir, que si el error es constante, solamente actúan los modos proporcional e integral. El error se deriva con respecto al tiempo y se multiplica por una constante ( $K_d$ ) y luego, se suma a las señales (P+I) para conformar el P+I+D o a la señal (P) para conformar el (P+D), en el caso en el cual el proceso sea tipo I (Botero, 2009), control que aumenta la estabilidad del sistema, gracias a la acción de la parte derivativa y proporcional, aumenta la rapidez de la respuesta con la parte derivativa y, finalmente, da más exactitud por medio de la parte integral, al eliminar el error de estado estable.

La función de la acción derivativa es la de estabilizar, al mantener los cambios en el error al mínimo; es decir, lo corrige proporcionalmente con la velocidad de su cambio; de esta manera pretende evitar que el error se inestabilice.

Industrialmente, es común expresar esta constante como un tiempo, el tiempo derivativo, bajo el supuesto de que al alterar la constante proporcional, esta debe afectar también a la constante derivativa, la cual es directamente proporcional al tiempo derivativo. La ecuación que los relaciona es:

$$K_d = K_p T_d$$

### 6.1.5 Consideraciones prácticas de un controlador PID, para ser programado en una máquina de cómputo

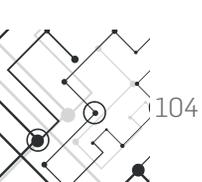
Para programar un controlador PID en una máquina de cómputo, este se debe expresar con una ecuación en diferencias, cuya solución sea aproximada a la de la ecuación íntegro-diferencial propia del PID.

Para encontrar dicha ecuación en diferencias, se hace necesario hallar una aproximación discreta de la integral (*Integral Rectangular hacia Adelante*, *Integral Rectangular hacia Atrás* e *Integral Trapezoidal*), así como de la derivada. Es, entonces, necesario referirse a los métodos numéricos, los cuales retoman el significado básico de la integral, hallar el área bajo la curva y, de la derivada, hallar la pendiente de la recta tangente a la curva. Se parte del supuesto de que las señales se muestrearán en instantes,  $t_k$ , uniformemente separados, *Período de Muestreo* (PM), en el tiempo.

### 6.1.6 Consideraciones prácticas con actuadores reales

#### 6.1.6.1 Windup

Es un fenómeno indeseado que se presenta cuando las integrales del controlador no se limitan y crecen o decrecen fuera de los límites (hardware saturado) y, por tanto,



el actuador no responde a las órdenes del controlador. Esto implica que la realidad se va a comportar distinto a lo que predeciría la teoría lineal, puesto que en las matemáticas lineales se presume que no existe la saturación (Betancur y Lennis, 2009).

Si el actuador está saturado y el error persiste, entonces una integral lineal seguirá creciendo indefinidamente. Este crecimiento, cuando ya no puede ser seguido por el actuador, se llama *windup*.

El efecto práctico del *windup* se manifiesta cuando, al retornar la referencia del sistema a una zona en la cual el actuador normalmente, podría responder; es decir, que no estaría saturado, aun así, la integral sigue comandando el actuador a seguir saturado. Lo anterior debido al error acumulado durante el *windup*. Solamente, después de que desaparece el *windup*, el sistema regresa a la normalidad, o sea que, el registro de la integral se encuentre dentro de los límites de operación.

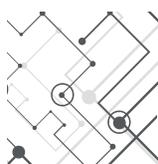
Tiempo real no es sinónimo de rapidez; tiempo real quiere decir respetar el tiempo

que se tiene asignado, para hacer los cálculos de control (en función de la velocidad de respuesta del proceso controlado) y, aún así, dejar dos tercios o más, de tiempo libre, hasta que se cumpla el período de muestreo, para iniciar la próxima iteración del algoritmo de control (Betancur y Lennis, 2009).

En otras palabras, si la salida se satura y el controlador no se da cuenta de dicha saturación, continúa al integrar el error, lo que ocasiona que la salida del integrador crezca demasiado, sin que este crecimiento tenga efecto en el actuador ya saturado. Una vez que esto haya pasado, toma tiempo retornar a las condiciones normales de operación del control (Ogata, 1987).

#### 6.1.6.2 Antiwindup

Para prevenir el fenómeno no lineal e indeseado del *windup*, basta con limitar el crecimiento de las integrales por fuera de los límites de operación, en la rutina de control.



## 7. Diseño, simulación y resultados experimentales del control PID implementado

Para el diseño y simulación del control PID implementado en la resistencia de calefacción para controlar la temperatura de la Cámara de ambiente controlado, se hizo uso del *software* MATLAB® y Simulink® que, por medio del modelo obtenido con los experimentos estáticos y dinámicos sobre este actuador, se logró diseñar y, posteriormente, implementar el control ya mencionado. El método de sintonía de controladores por Ziegler-Nichols para sistemas en lazo abierto, fue el método utilizado para el diseño y sintonización del control PID, debido a que la planta posee un retardo considerable y con este método se logró describir de manera más exacta, pero, después, fue mejorado al utilizar el método de Chien, Hrones y Reswick. No se utilizó el método del lugar de las raíces, porque este no logra describir de manera exacta el retardo que la planta posee.

## 7.1. Diseño y simulación del control PID por el método de Ziegler-Nichols

### 7.1.1 Métodos de Ziegler-Nichols

Son métodos heurísticos (basados en la experimentación) para diseñar controladores PID, con base en la respuesta al paso del sistema a controlar. Según la forma de la respuesta, se miden parámetros de la misma, que se utilizan para proponer valores para las constantes de control. Después de proponer los valores, es posible ajustarlos de acuerdo a la respuesta obtenida para el sistema (Osorio, 2011).

#### 7.1.1.1 Método 1. Lazo abierto

Este método consiste en hallar el tiempo de retardo ( $L$ ) y la recta tangente a la curva que, medida desde cero en "y" hasta el cruce con el eje "y" nos da como resultado el parámetro "a", todo lo anterior se halla de la respuesta al paso del sistema (ver Figura 55). Con esto se pudieron hallar los diferentes controladores (ver Tabla 21) y verificar cómo se comportaba el sistema, luego de implementarlos.

#### 7.1.1.2 Método 2. Lazo cerrado.

Este método consiste en hallar la ganancia crítica del sistema, para lograr una respuesta oscilatoria sostenida, con esto se

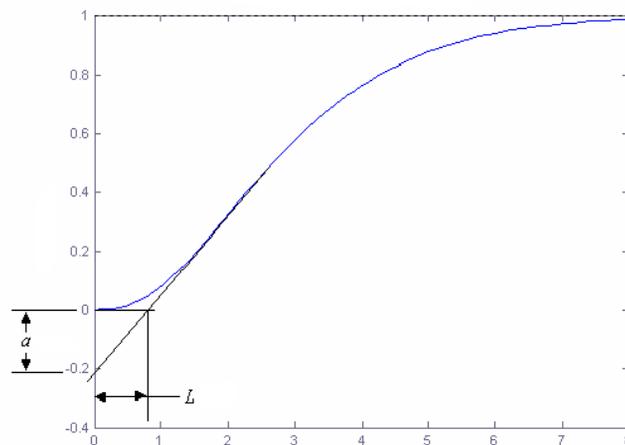


Figura 55. Parámetros respuesta al paso del sistema método 1 Ziegler-Nichols.

Tabla 21. Valores de los parámetros método 1 de Ziegler-Nichols.

Técnica de control	$K_p$	$T_i$	$T_d$
Control P	1/a	-	-
Control PI	0.9/a	3L	-
Control PID	1.2/a	2L	L/2

a: Pendiente de la recta.

L: Tiempo de retardo.

encuentra el período de oscilación y se hacen cálculos similares a los del método anterior, para obtener los controladores P, PI y PID (ver Tabla 22).

El método en lazo cerrado es recomendable, cuando el sistema tiene respuesta en lazo abierto oscilatoria, pero también se puede aplicar a sistemas con respuesta en lazo abierto sigmoideal. Se realimenta el sistema y se encuentra su ganancia crítica (última)  $K_u$ . Sobre la respuesta oscilatoria se mide el período de la oscilación  $T_u$ . Con estos dos valores se proponen valores para los parámetros del controlador PID (Osorio, 2011).

### 7.1.2 Diseño y simulación del control PID método 1 Ziegler-Nichols

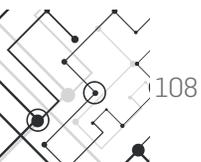
Para el diseño y simulación del control PID por el método 1 de Ziegler-Nichols se utilizó la respuesta del sistema ante pasos de subida y de bajada, al aumentar el *duty cycle* 10 % y al disminuirlo 10 % (ver Figuras 56, 57, 58 y 59), alrededor del punto Q (40 % de *duty cycle*, 30 °C) en lazo abierto. De esta respuesta se obtuvo un promedio de cada parámetro para

Tabla 22. Valores de los parámetros método 2 de Ziegler-Nichols.

Técnica de control	$K_p$	$T_i$	$T_d$
Control P	0.5 $K_u$	-	-
Control PI	0.4 $K_u$	0.8 $T_u$	-
Control PID	0.6 $K_u$	0.5 $T_u$	0.125 $T_u$

$K_u$ : Ganancia crítica (última).

$T_u$ : Período de oscilación sostenida.



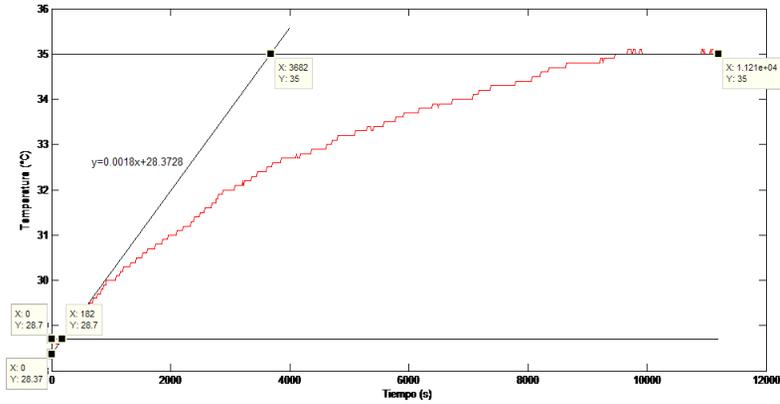


Figura 56. Duty cycle 40 % - 50 %.

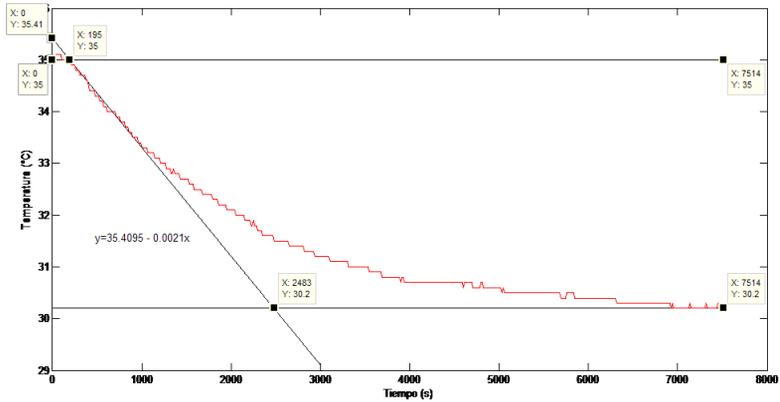


Figura 57. Duty cycle 50 % - 40 %.

el diseño del control PID por el método 1, al utilizar la Tabla 23 se hallaron las constantes  $K_p$ ,  $K_i$  y  $K_d$  de los controladores, en la cual se puso especial atención en el PID obtenido.

Constantes obtenidas del control PID por el método 1 de Ziegler-Nichols:

$K_p$ : 3.4286

$K_i$ : 0.0093

$K_d$ : 317



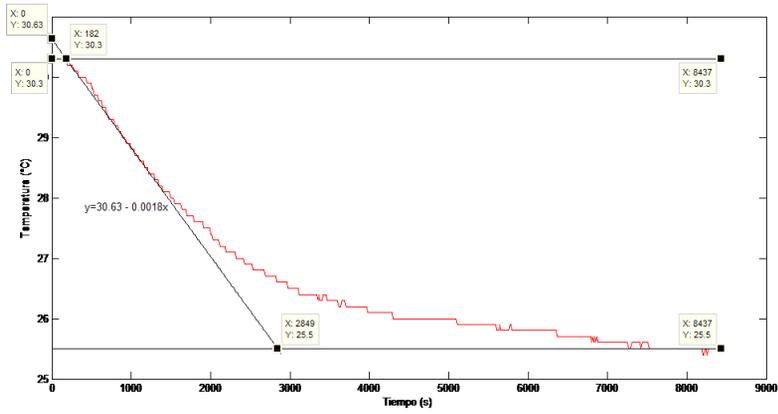


Figura 58. Duty cycle 40 % - 30 %.

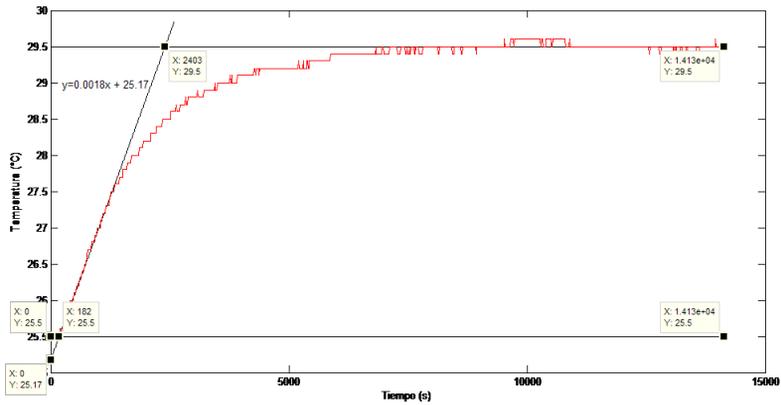


Figura 59. Duty cycle 30 % - 40 %.

Tabla 23. Parámetros método 1 Ziegler-Nichols promediados

a	L
0.35	185.25

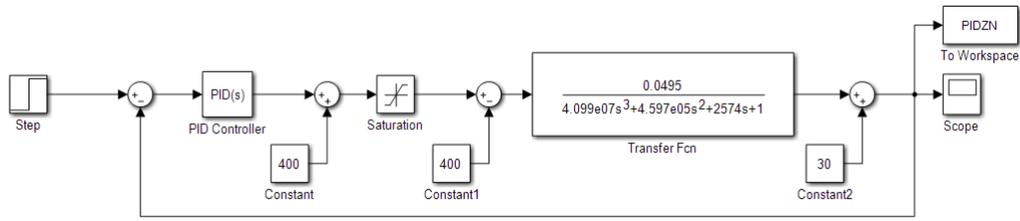


Figura 60. Diagrama de bloques control PID método 1 Ziegler-Nichols.

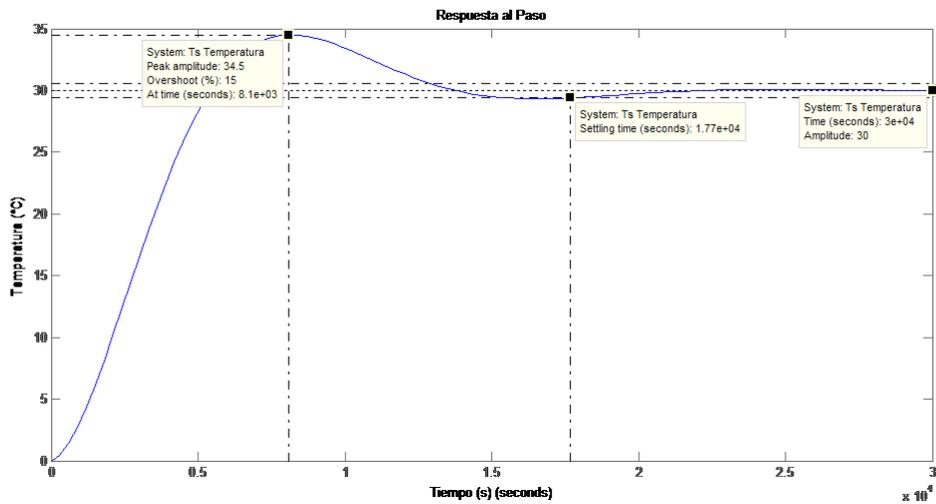


Figura 61. Respuesta al paso 40 % de duty cycle (30 °C) del sistema controlado por método 1 Ziegler-Nichols.

La respuesta de este control, con su respectivo diagrama de bloques (ver Figura 60), ante un paso de 40 % de *duty cycle* (30 °C) se puede observar en la Figura 61.

Al ajustar las constantes del control PID obtenidas anteriormente, debido a que se poseía un sobrepaso menor del 20 % y un tiempo de estabilización muy lento, se obtiene una mejor respuesta (ver Figura 62) del sistema controlado:

$K_p$ : 21.4286  
 $K_i$ : 0.0093  
 $K_d$ : 3.5714

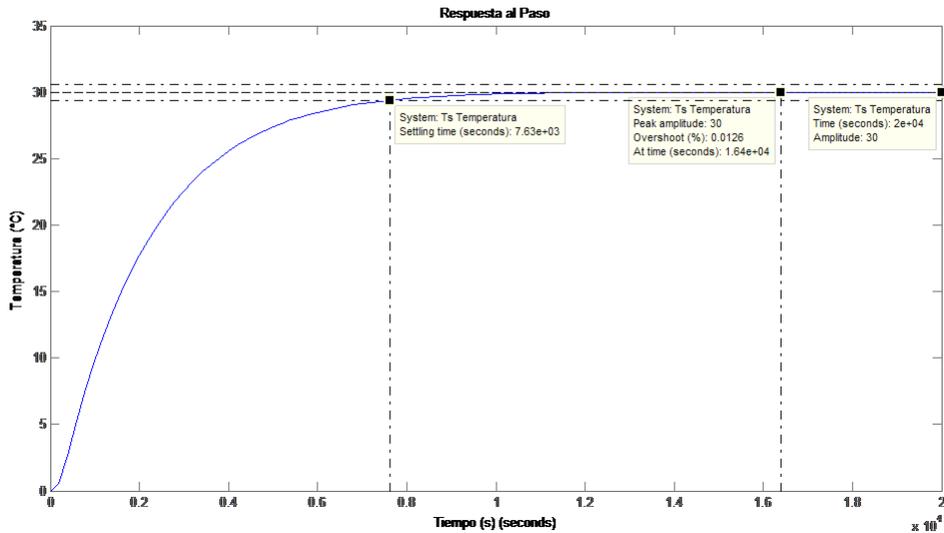


Figura 62. Respuesta Control PID ajustado método 1 Ziegler-Nichols.

Este control no fue implementado en la Cámara de ambiente controlado, debido a que la respuesta ante un paso de 40 % de *duty cycle* (30 °C) presenta un tiempo de estabilización lento, lo cual no es óptimo para el control adecuado del sistema.

### 7.1.3 Diseño y simulación del control PID método 2 Ziegler-Nichols

El control PID por este método no es posible diseñarlo, debido a que al hallar la ganancia crítica ( $K_u$ ) por medio del diagrama del lugar de las raíces, esta resulta ser 563.05, es una ganancia muy alta y no es posible implementarla experimentalmente, pues esto encendería la resistencia de calefacción a más del 100 % y podría generar altas temperaturas, por consiguiente, altas presiones, logra satu-

rar el sensor y, posiblemente, afecte los demás actuadores.

## 7.2. Diseño y simulación del control PID por el método de Chien, Hrones y Reswick

El método de diseño de controladores por Chien, Hrones y Reswick (CHR) se deriva del método 1 de Ziegler-Nichols. El método de Chien, Hrones y Reswick se lleva a cabo en lazo abierto, con la intención de obtener la respuesta más rápida y sin sobrepaso (ver Tabla 24) y la respuesta más rápida con 20 % de sobrepaso (ver Tabla 25). Para sintonizar el controlador de acuerdo con el método CHR, los parámetros  $a$ ,  $L$ , y  $T$  (constante de la función de transferencia de la planta, que es el tiempo

Tabla 24. Valores de los parámetros método CHR sobrepaso 0 %.

Técnica de control	$K_p$	$T_i$	$T_d$
Control P	0.3/a	-	-
Control PI	0.35/a	1.2T	-
Control PID	0.6/a	T	0.5/L

Tabla 25. Valores de los parámetros método CHR sobrepaso 20 %.

Técnica de control	$K_p$	$T_i$	$T_d$
Control P	0.7/a	-	-
Control PI	0.6/a	T	-
Control PID	0.95/a	1.4T	0.47/L

que toma para que el sistema alcance el 63 % de su valor final) se deben determinar de la misma forma que en el método 1 de Ziegler-Nichols (Youney, 2007).

Para el diseño y simulación del control PID, por medio de este método, se utilizaron los parámetros que generaran en la respuesta del sistema un sobrepaso del 0 %, debido a que en términos de diseño y, de acuerdo con las necesidades presentadas, es el método más adecuado para lograr un buen control de la planta, no es el caso del diseño con sobrepaso del 20 %. Para obtener estos parámetros, simplemente, se usaron los mismos hallados para el método 1 de Ziegler-Nichols, con el agregado del parámetro T, el cual es el Tau (t) más rápido del sistema (ver Tabla 26).

Constantes obtenidas del control PID por el método CHR sobrepaso 0 %:

$K_p$ : 1.7143  
 $K_i$ : 0.001  
 $K_d$ : 0.0046

La respuesta de este control, con su respectivo diagrama de bloques (ver Figura 63), ante un paso de 40 % de *duty cycle* (30 °C) se puede observar en la Figura 64. Al ajustar las constantes del control PID obtenidas anteriormente, debido a que se poseía un tiempo de estabilización muy lento, se obtuvo una mejor respuesta (ver Figura 65) del sistema controlado:

$K_p$ : 32  
 $K_i$ : 0.0189  
 $K_d$ : 0.0864

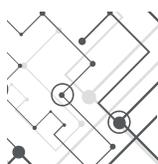


Tabla 26. Parámetros método CHR sobrepaso 0 %.

a	L	T
0.35	185.25	1690

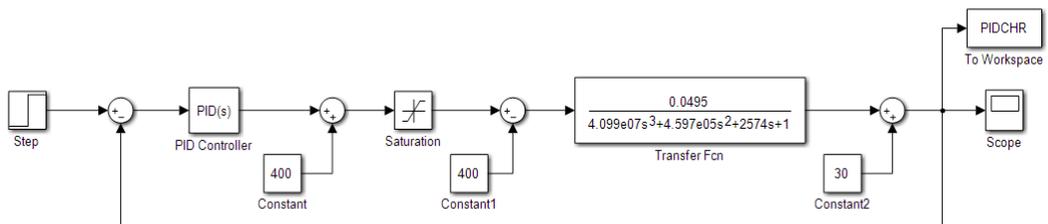


Figura 63. Diagrama de bloques control PID método CHR sobrepaso 0 %.

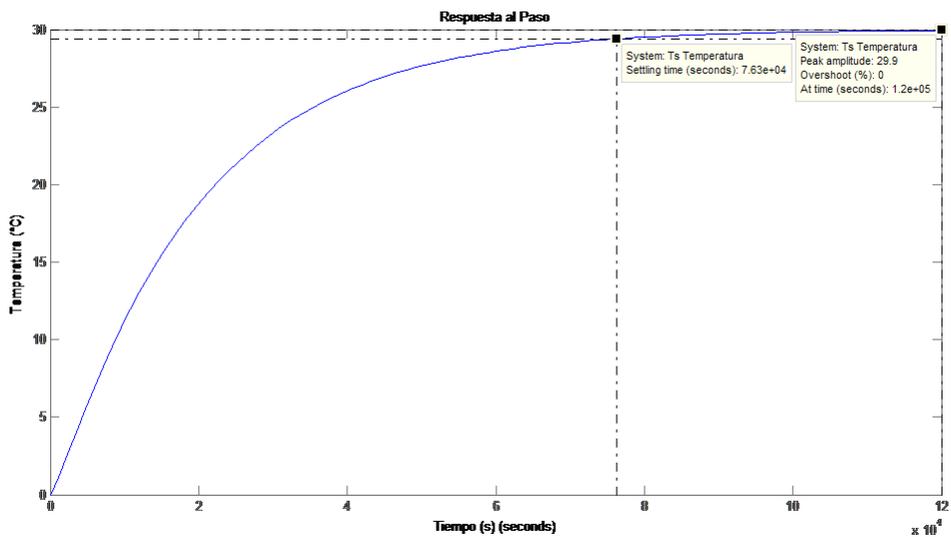


Figura 64. Respuesta al paso 40 % de duty cycle (30 °C) del sistema controlado por método CHR sobrepaso 0 %.

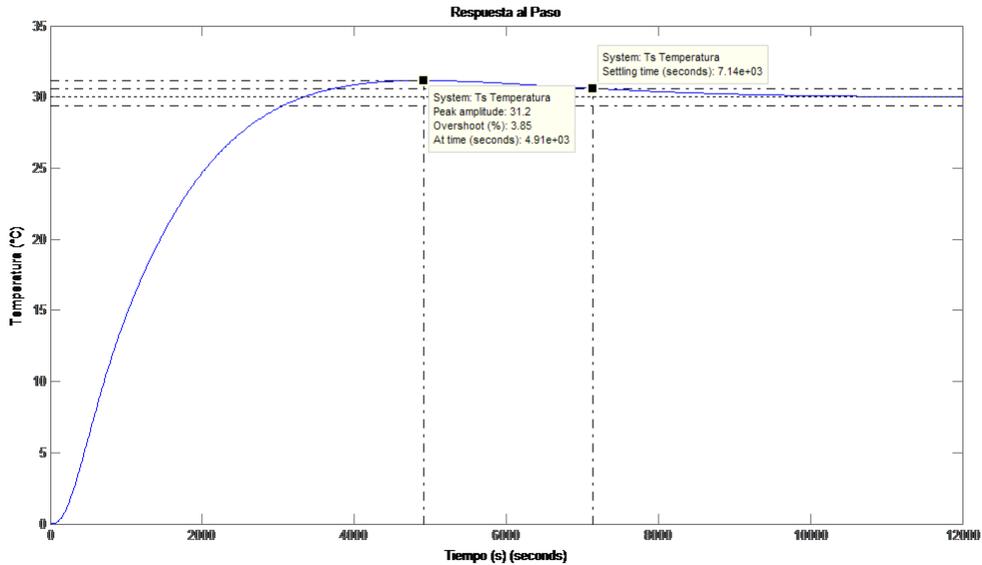


Figura 65. Respuesta Control PID ajustado método CHR sobrepaso 0 %.

Este control se implementó en la Cámara de ambiente controlado, debido a que la respuesta ante un paso de 40 % de *duty cycle* (30 °C) presenta un tiempo de estabilización rápido, con respecto al comportamiento de la planta y un sobrepaso muy pequeño, este sobrepaso se encuentra entre los parámetros establecidos en el diseño del controlador, el cual es que no se tenga un sobrepaso mayor al 5 %.

### 7.3. Resultados experimentales del control PID implementado. Método de Chien, Hrones y Reswick

El control PID que se implementó y al cual se le realizaron pruebas experimentales en la Cámara de ambiente controlado fue el

control PID que, en la simulación previamente hecha, se ajustó de manera tal, que fuera rápido y el sobrepaso no fuera mayor al 5 %. Estas pruebas se realizaron en el día y en la noche, con el objetivo de determinar si la variación de la temperatura ambiente a cualquier hora del día no lograba perturbarlo. Las constantes que determinaron la acción proporcional, la acción integral y la acción derivativa fueron las siguientes:

$$K_p: 32$$

$$K_i: 0.0189$$

$$K_d: 0.0864$$

A este control se le realizaron pruebas experimentales sin perturbación alguna (ver Figuras 66 y 67), con la perturbación del humidificador (ver Figuras 68, 69 y 70), el

cual tiene un control *ON-OFF* con variación del 40 %HR al 60 %HR, con la perturbación del encendido de las lámparas fluorescentes (ver Figuras 71, 72 y 73) y con la perturbación de la apertura de la puerta (ver Figuras 74, 75 y 76) de la Cámara de ambiente controlado durante 30 s.

El control PID de temperatura implementado, sin aplicarle las debidas perturbaciones, tiene un rango aproximado de actuación entre 15 °C y 47 °C, con el sistema

polarizado previamente en 30 °C, pero al aplicarle las perturbaciones que tienen que ver con el humidificador y el encendido de las lámparas fluorescentes, el rango aproximado de actuación del control PID de temperatura está entre 17 °C y 47 °C. Con lo anterior se demuestra que las condiciones de humedad, temperatura y luz, para que el ácaro *Tetranychus Urticae* Koch sobreviva dentro de la Cámara de ambiente controlado son las adecuadas.

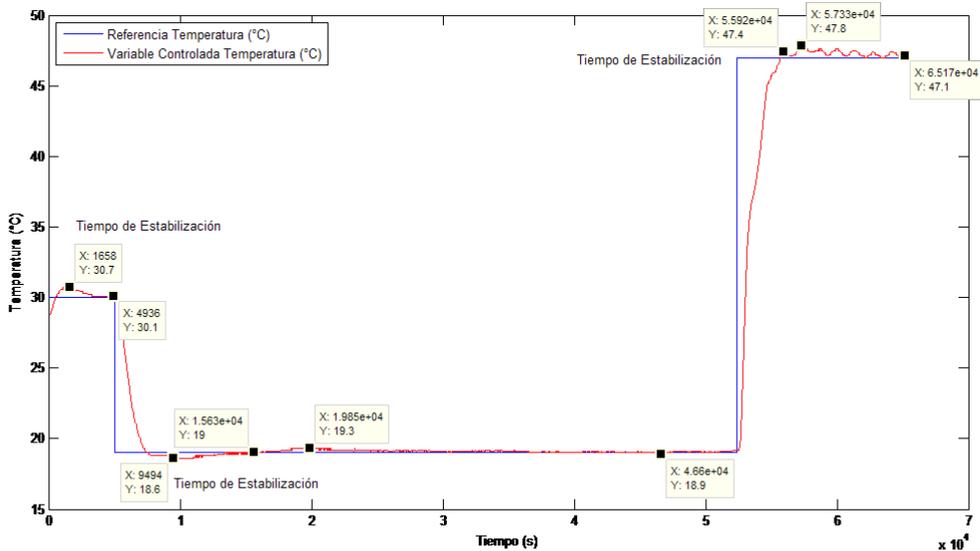


Figura 66. Control PID temperatura sin perturbación con referencia 30 °C, 19 °C y 47 °C (día y noche).

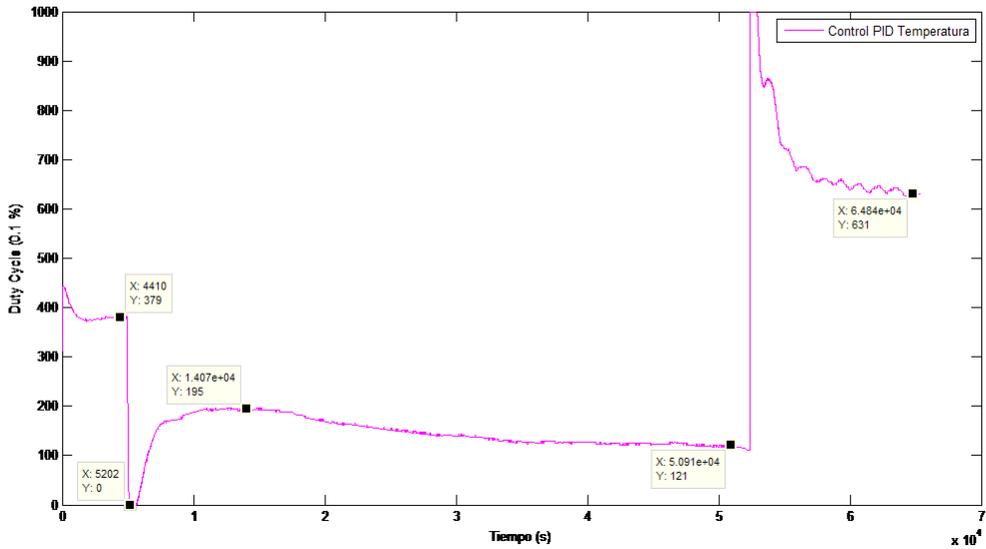


Figura 67. Duty cycle control PID temperatura sin perturbación (día y noche).

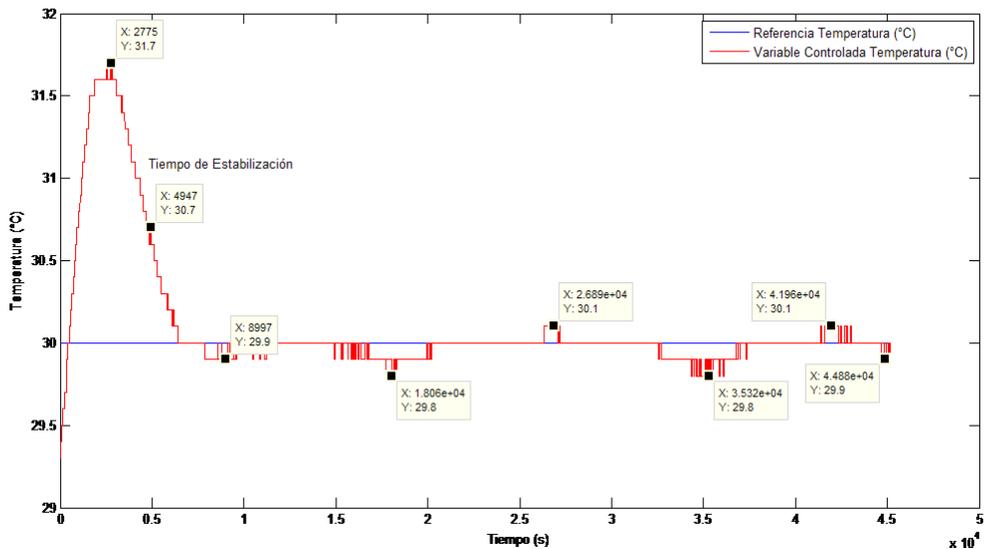


Figura 68. Control PID temperatura referencia 30 °C con perturbación control ON-OFF humedad relativa referencia 50 %HR (día y noche).



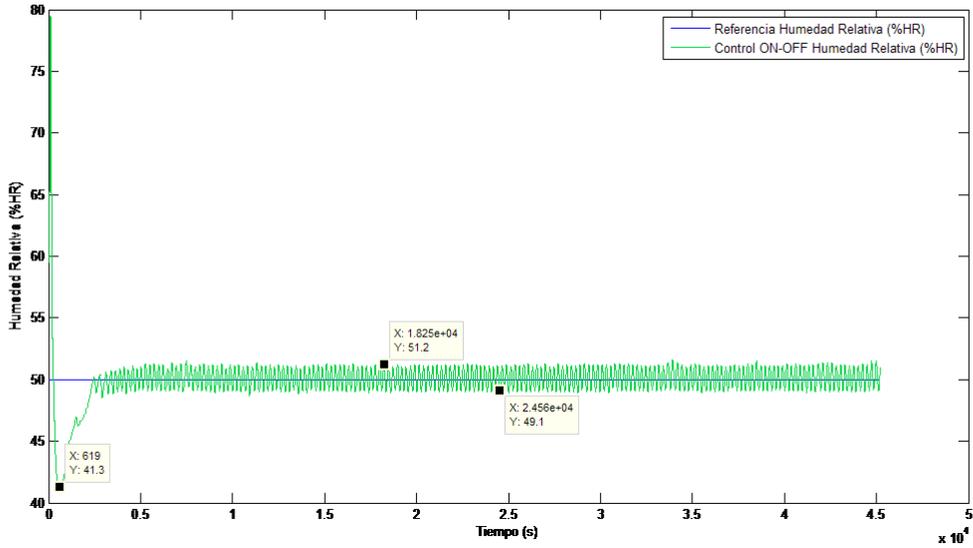


Figura 69. Control ON-OFF humedad relativa referencia 50 %HR (día y noche).

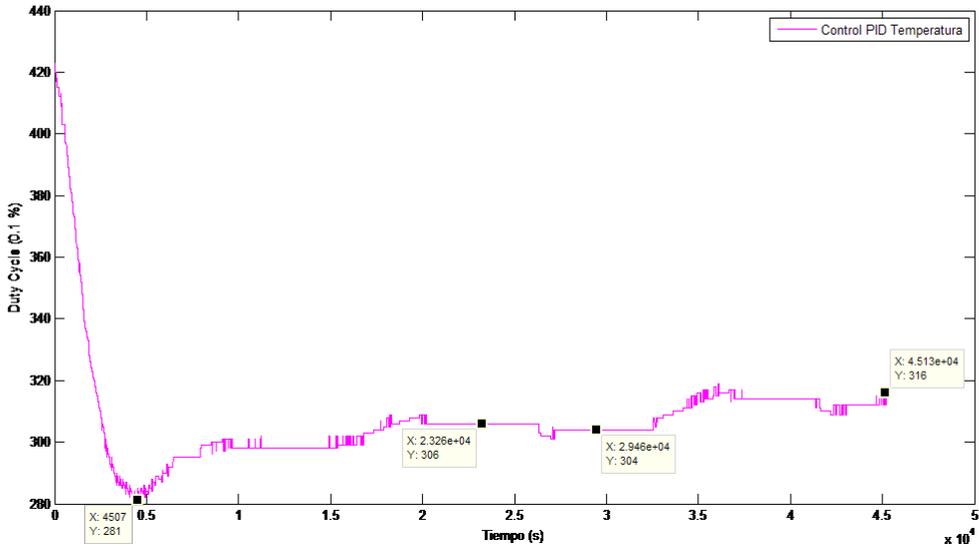


Figura 70. Duty cycle control PID temperatura con perturbación humidificador 50 %HR (día y noche).

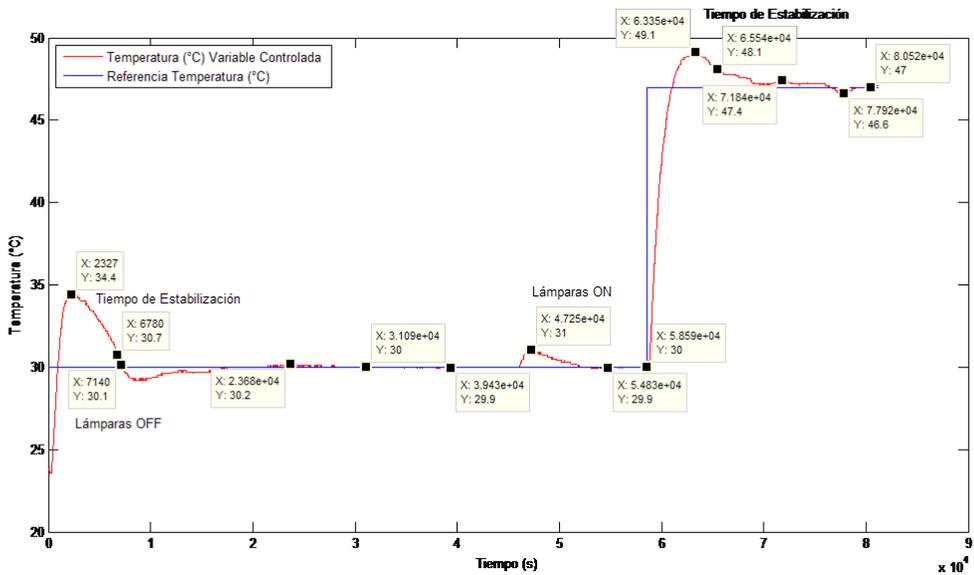


Figura 71. Control PID temperatura referencia 30 °C (día y noche) y 47 °C con perturbación control ON-OFF humedad relativa 50 %HR y lámparas fluorescentes encendidas.

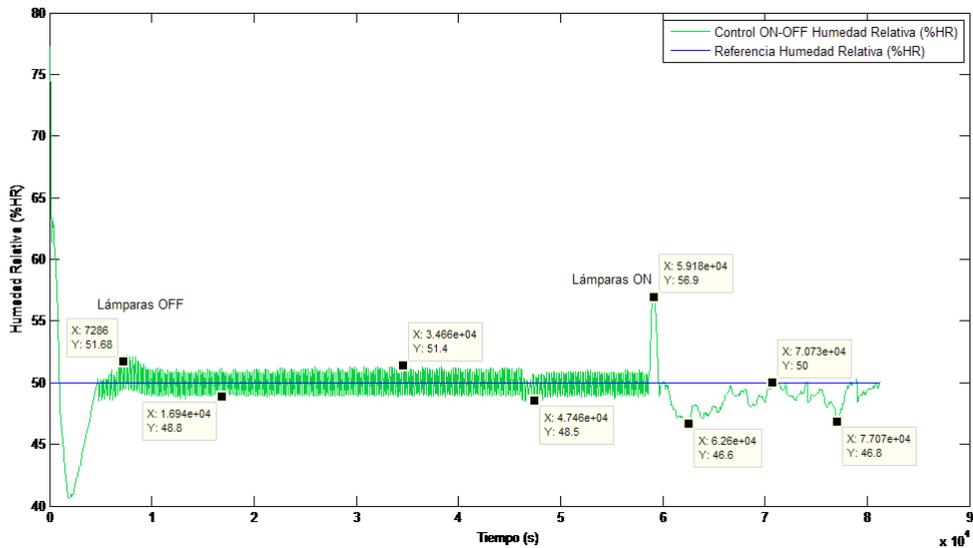


Figura 72. Control ON-OFF humedad relativa 50 %HR con perturbación lámparas fluorescentes encendidas (día y noche).



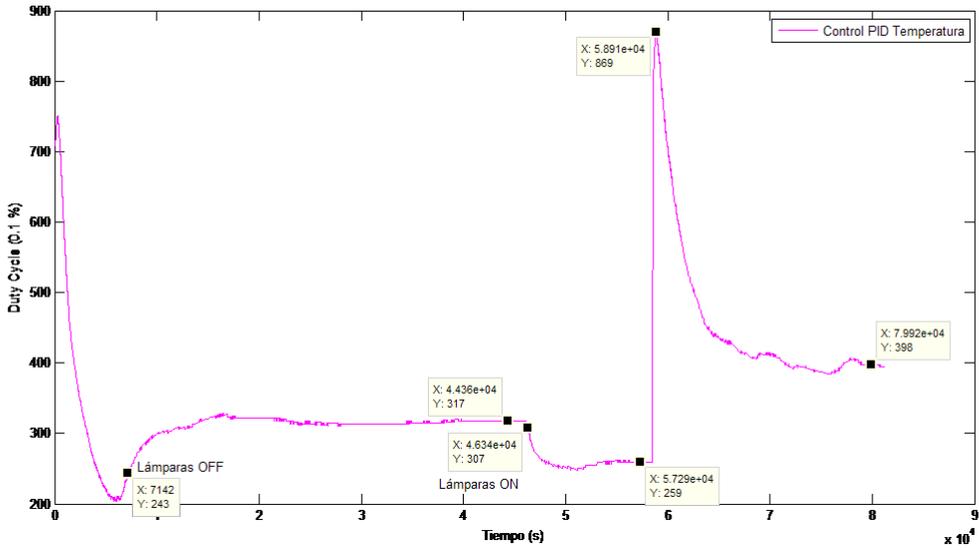


Figura 73. Duty cycle control PID temperatura con perturbación humidificador 50 %HR y lámparas fluorescentes encendidas (día y noche).

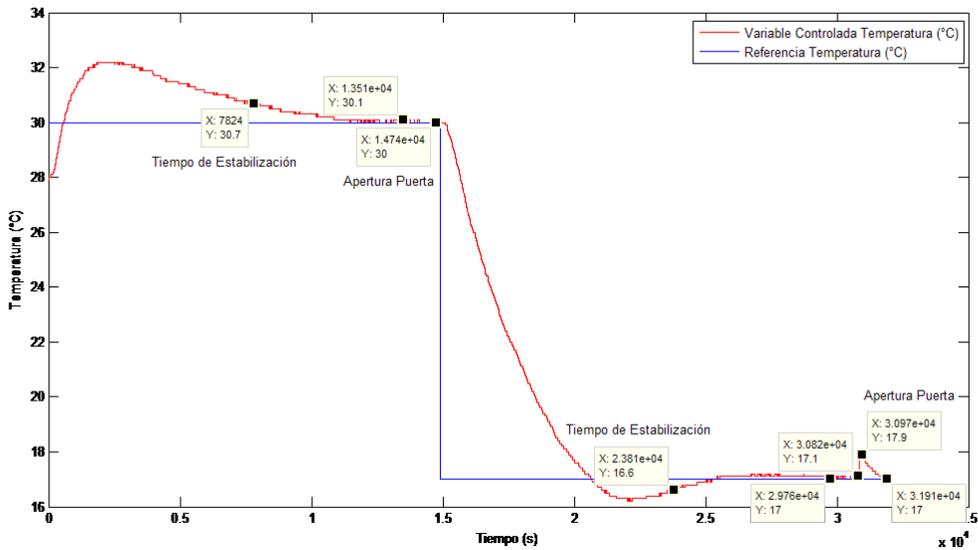


Figura 74. Control PID temperatura referencia 30 °C y 17 °C con perturbación control ON-OFF humedad relativa 60 %HR, lámparas fluorescentes encendidas y apertura de puerta.

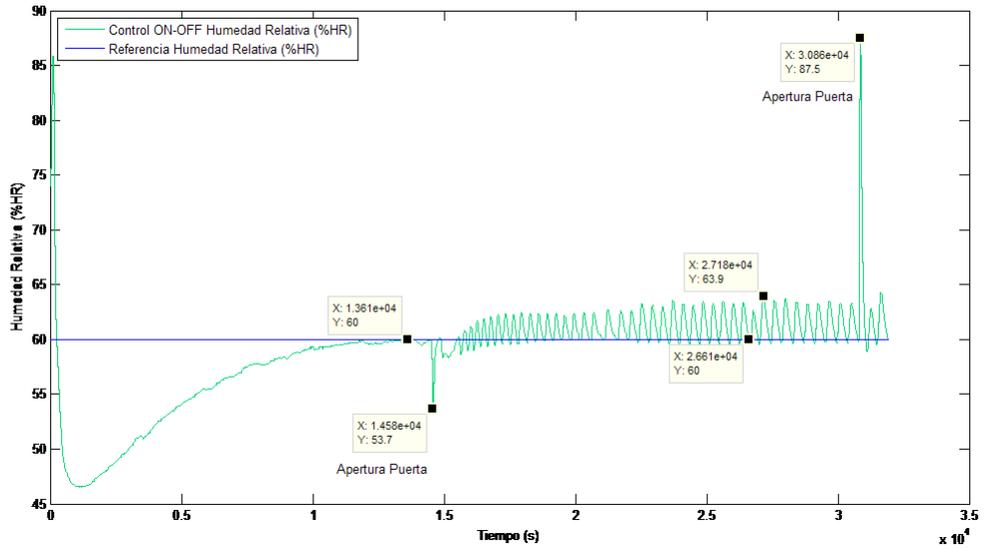


Figura 75. Control ON-OFF humedad relativa 60 %HR con perturbación lámparas fluorescentes encendidas y apertura de puerta.

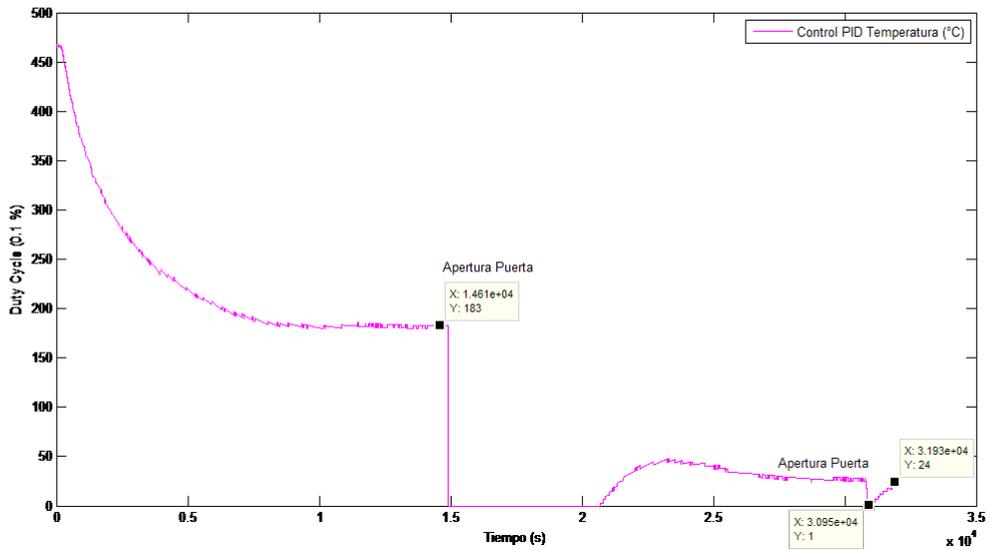


Figura 76. Duty cycle control PID temperatura con perturbación humidificador 60 %HR, lámparas fluorescentes encendidas y apertura de puerta.



## 8. Comunicación PC-PLC

### 8.1 Protocolo *Modbus*

Para la comunicación del PC con el PLC *Unitronics Vision 230* se utilizó el protocolo de comunicación *Modbus*. "*Modbus* es un protocolo de comunicación serie desarrollado y publicado por Modicon en 1979. En su origen el uso de *Modbus* estaba orientado exclusivamente al mundo de los controladores lógicos programables o PLCs de Modicon" (Xmcarne, 2013). El protocolo *Modbus*, actualmente, es el más utilizado en entornos industriales, sistemas de telecontrol y monitorización. Lo que implica de forma implícita que, tanto en el ámbito local como de red, en su versión TCP/IP, seguirá siendo uno de los protocolos de referencia en los sistemas de información (Bartolomé, 2011).

El protocolo *Modbus* tiene como objeto la transmisión de información entre distintos equipos electrónicos conectados a un

mismo bus. Al existir en dicho bus un solo dispositivo maestro (*master*) y varios equipos esclavos (*slaves*) conectados, en este caso, el dispositivo maestro es el PC y el dispositivo esclavo es el PLC (Tecdigitaldelbajo, 2012).

En su origen estaba orientado a una conectividad a través de líneas serie como pueden ser RS-232 o RS-485, pero, con el paso del tiempo han aparecido variantes como la de *Modbus* TCP, que permite el encapsulamiento del *Modbus* serie en tramas Ethernet TCP/IP de forma sencilla. Esto sucede porque desde un punto de vista de la torre OSI, el protocolo *Modbus* se ubica en la capa de aplicación, en el caso de este trabajo de grado, se utilizó *Modbus* RTU sobre RS-232 (Bartolomé, 2011).

### 8.1.1 Modos de transmisión del protocolo *Modbus*

Según Tecdigitaldelbajo (2012), los modos de transmisión de envío de datos entre maestros y esclavos del protocolo *Modbus* son:

- *Modbus* RTU (*Remote Termini Unit*). "La comunicación entre dispositivos se realiza por medio de datos binarios. Esta es la opción más usada del protocolo y es la que se implementó en este caso".
- *Modbus* ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*). "La

comunicación entre dispositivos se hace por medio de caracteres ASCII".

### 8.1.2 Funcionamiento y elementos de una red *Modbus*

El funcionamiento tiene una base muy sencilla, el maestro pregunta y los esclavos responden o actúan en función de lo que este diga.

Un dispositivo conectado al bus ejerce de maestro, al solicitar información del resto de dispositivos conectados, que ejercen como esclavos y son quienes suministran la información al primero (ver Figura 77). Según el estándar *Modbus* y dada su implementación, en una red *Modbus* habrá un maestro y hasta un máximo de 247 dispositivos esclavos (Bartolomé, 2011).

Lo dicho, en una red *Modbus* todos los dispositivos esclavos deben tener una dirección asignada que debe estar comprendida entre la 1 y la 247. Desde un punto de vista práctico, no pueden coexistir dos dispositivos esclavos con la misma dirección *Modbus*. Dentro de la trama *Modbus* RTU, la dirección del esclavo corresponde al primer *byte*. En una red *Modbus*, el maestro no solo puede ejercer la función de recompilar información de los esclavos mediante preguntas, si no, que puede interactuar con ellos o alterar su estado, en el cual se puede escribir, además de leer información (Xmcarne, 2013).

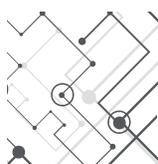




Figura 77. Funcionamiento Modbus PC (Maestro) - PLC (Esclavo).

### 8.1.3 Representación de datos en *Modbus*

El protocolo *Modbus* usa el concepto de tablas de datos para almacenar la información en un esclavo (Xmcarne, 2013). Una tabla de datos no es más que un bloque de memoria usado para almacenar datos en el esclavo, las tablas de datos que usa en *Modbus* son cuatro (ver Tabla 27):

Se observa que hay dos direcciones: una es usada para diferenciar entre las tablas de datos, la llamamos dirección *Modbus* y la otra es la dirección usada en la comunicación entre el maestro y el esclavo, esta es la dirección usada en la trama o paquetes de datos enviados entre maestros y esclavos, en otras lecciones se hablará más de estas direcciones, para que queden más claros estos conceptos. Por lo pronto, solo entraremos en detalle sobre dos elementos de *Modbus*, los *coils* y los registros *holding* (Xmcarne, 2013).

Tabla 27. Tabla de datos protocolo Modbus.

Dirección <i>Modbus</i>	Dirección usada en el protocolo	Nombre de la tabla de datos
1 - 9999	0000 - 9998	<i>Output Coils</i> (lectura/escritura)
10001 - 19999	0000 - 9998	<i>Inputs Contact</i> (lectura)
30000 - 39999	0000 - 9998	<i>Inputs Registers</i> (lectura)
40001 - 49999	0000 - 9998	<i>Holding Registers</i> (lectura/escritura)

### 8.1.3.1 Output coils

En *Modbus*, un coil representa un valor booleano típicamente usado para representar una salida, solo hay dos estados para el coil el *ON* y el *OFF*. Por ejemplo, la tarjeta de relevadores usa dos coils, para activar o desactivar precisamente dos relevadores (Bartolomé, 2011).

El *coil*, entonces, puede verse como una celda o un bloque pequeño de memoria, que me permite almacenar el estado de un bit, que puede tener solo dos valores como se vio arriba, el *ON* o el *OFF*, o en lógica binaria, un 1 o un 0, o más cerca de la realidad física, tierra (0 voltios) y voltaje (5 voltios), como el lector quiera verlo, eso sí, debe quedar claro que son solo dos valores por cada *coil* (Xmcarne, 2013).

### 8.1.3.2 Holding registers

“Los registros holding representan cantidades de 16 bits, se puede ver cada registro como un bloque o celda de memoria, que es capaz de almacenar números entre 0 y 65535” (Tecdigitaldelbajo, 2012).

“Las direcciones usadas para los registros holding inician en la dirección 40001, pero puede usarse cualquiera de las mencionadas en la tabla, para los registros *holding*” (Tecdigitaldelbajo, 2012).

Estos registros son de lectura/escritura, es decir, que el maestro puede hacer peticiones de información para leer el dato que está

almacenado o puede enviar peticiones para escribirle un valor al registro *holding*, en el momento que se requiera (Bartolomé, 2011).

### 8.1.4 Comunicación *Modbus* a través del programa en *LabVIEW*® (PC) y *Unitronics Visilogic* (PLC)

Para establecer la comunicación entre el PC (maestro) y el PLC *Unitronics Vision 230* (esclavo) se utilizaron los programas *LabVIEW*® y *Visilogic*, en estos se configuró de manera correcta el protocolo *Modbus*.

En *Visilogic* se hizo uso de bloques de inicialización, comunicación y escaneo, al utilizar el puerto 1 del PLC, por este se hizo uso del protocolo *Modbus* sobre RS-232, en este caso, no se utilizó RS-232 plano, porque a una velocidad de 115 200 bps no se garantiza una buena transmisión de datos, debido a que este protocolo brinda un código de error muy burdo y, simplemente, es un bit de paridad, a diferencia de *Modbus*, que proporciona un campo en la trama, para un código de error un poco más robusto que es el CRC (código de redundancia cíclica) de *Modbus*, para comprobar la trama enviada. Lo ideal en un caso industrial es que *Modbus* estuviera sobre una interfaz RS-485, pero el PC no posee el puerto.

En *LabVIEW*® se utilizó la librería *nimodbus*® para el manejo de comunicaciones *Modbus*, que se puede encontrar en la página de National Instruments bajo licencia libre, con esta librería se pudieron utilizar los bloques necesarios para hacer la res-



pectiva inicialización del protocolo, una lectura y una escritura hacia los registros establecidos en el programa *Visilogic*, que en el capítulo 9 se explicarán.

Los parámetros de la comunicación serial se ilustran en la Tabla 28 a continuación:

**Tabla 28.** Parámetros de la comunicación serial.

Parámetro	Valor
Velocidad de transmisión de datos	115200 bps
Bit de paridad	ninguno
Control de flujo	ninguno
Tiempo de latencia	1 s
Modo	RTU (8 bits de datos)

## 9. *Software* de control



El PLC permite controlar tanto la temperatura como la humedad relativa en el interior de la Cámara de ambiente controlado, con y sin la necesidad de utilizar un computador externo, gracias a que su pantalla LCD facilita la interacción entre el usuario y la máquina controlada, al mostrar una serie de opciones, que permiten establecer las condiciones deseadas en el interior del recinto, para un experimento determinado por el mismo usuario, dentro de unos rangos establecidos.

Se recomienda leer el manual de operación antes de proceder a utilizar la Cámara de ambiente controlado, con el fin de tener en cuenta las diferentes recomendaciones allí mencionadas, junto con la explicación de-



tallada de cada una de las opciones mostradas en los diferentes *displays*, que se visualizan en la pantalla LCD del PLC.

## 9.1. Software de control PLC

El PLC *Unitronics Vision 230* utilizado fue programado gracias al *software Unitronics Visilogic*.

Por medio del PLC es posible visualizar y modificar los parámetros del control PID diseñado, programar el encendido y apagado de los tubos fluorescentes a una hora determinada, modificar cada cuánto tiempo se deben almacenar los datos y, además de esto, escoger si se dispone o no de un computador externo para realizar el control. Todo esto es posible gracias a los diferentes *displays* mostrados en la pantalla LCD del PLC.

Inicialmente, al momento de encender el PLC se muestran cuatro *displays* diferentes. Los tres primeros tienen una duración de cinco segundos cada uno, para realizar el cambio entre el primero y el segundo, el segundo con el tercero y este último con el cuarto. En el primero de ellos es posible visualizar el logo de la Universidad Pontificia Bolivariana, luego se muestra el nombre del trabajo de grado realizado, seguido por el nombre de los estudiantes que llevaron a cabo este proyecto, junto con su respectiva directora y, finalmente, se muestra el menú principal (ver Figura 78), el cual le brinda la posibilidad al usuario de escoger

entre tres opciones diferentes. Para ingresar a cada una de ellas, se debe presionar el número en el teclado que la representa. Para regresar al menú principal, solo basta con presionar ESC del teclado del PLC.

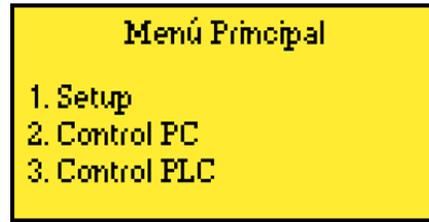


Figura 78. Menú principal.

Ya sea que el control lo realice el PLC o un computador externo, siempre se tiene en cuenta el estado del detector de nivel del sistema de humidificación, el cual, al momento de activarse espera cinco minutos para revisar su estado de nuevo. Si sigue activado, a pesar de haber pasado este tiempo, aparece un nuevo *display* que le indica al usuario que debe llenar el depósito del agua del humidificador, con el fin de poder hacer uso de este sistema. Si pasado los cinco minutos el detector de nivel ya se ha desactivado, se permite el uso de este sistema.

En todo momento se encuentra activada una rutina de alarma, la cual apaga inmediatamente la resistencia del sistema de calefacción, cuando la temperatura supera los 55 °C. Sin embargo, en caso de que ocurra un congelamiento del PLC, el sistema

de calefacción cuenta con un interruptor límite de alta temperatura, que se encarga de desconectar y apagar la resistencia del sistema de calefacción, sin importar la orden que el PLC le envíe a este actuador.

### 9.1.1 Menú principal. *Setup*

Es posible ingresar a esta opción, al presionar el número uno del teclado del PLC, una vez que se encuentra en el menú principal (ver Figuras 79 y 80).

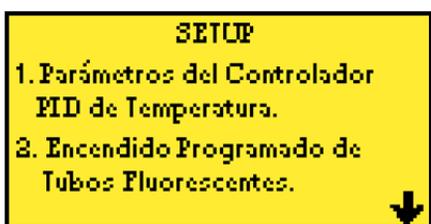


Figura 79. Setup. Opciones 1 y 2.

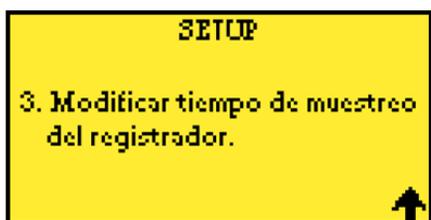


Figura 80. Setup. Opción 3.

Este *display* da a conocer tres nuevas opciones, a través de las cuales, el usuario tiene la posibilidad de modificar (ver Tabla

29) y visualizar los parámetros del control PID de temperatura diseñado, modificar la hora de encendido y apagado de los tubos fluorescentes de 3500K, 4100K y 6500K respectivamente y, finalmente, de modificar el tiempo de muestreo definido para almacenar los datos. Para moverse entre las dos pantallas, en las cuales se muestran los diferentes parámetros que pueden ser modificados por el usuario, solo debe presionarse la tecla indicada en la parte inferior derecha, en cada una de ellas.

Para modificar los parámetros del control PID, se debe ingresar correctamente una contraseña, con el fin de evitar que cualquier persona no autorizada pueda realizar algún cambio que, en el peor de los casos, lleve a inestabilizar el sistema. En caso de ingresar una contraseña incorrecta se da la opción de volver a intentarlo o de regresar al menú principal.

Para modificar la hora de encendido y apagado de un par de tubos fluorescentes determinados, se debe ingresar la hora en el campo correspondiente en formato militar. Para confirmar la hora ingresada, solo debe presionarse *enter* del teclado del PLC.

Para modificar el tiempo en el que se van a registrar los datos, solo basta con ingresar el tiempo de muestreo deseado por el usuario, en el campo destinado para ello. De nuevo, para confirmar el valor ingresado, se debe presionar la tecla *enter*.



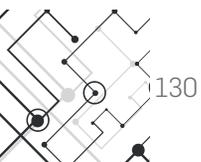
Tabla 29. Parámetros que pueden ser modificados por el usuario.

Registro PLC	Parámetro	Rango de valores	Valores <i>default</i>
MI 40	<i>BP</i>	(0 -999) x (0.1 %)	800
MI 41	<i>Ti</i>	0 s - 9999 s	1693
MI 42	<i>Td</i>	0 s - 99 s	0
MI 43	PM	(0-99999) x (10 ms)	100
MI 88	Referencia humedad relativa	40 %HR - 60 %HR	50 %HR
MI 90	Hora de encendido de los tubos fluorescentes de 6500K	00:00 - 23:59	16:00
MI 91	Hora de apagado de los tubos fluorescentes de 6500K	00:00 - 23:59	19:00
MI 92	Hora de encendido de los tubos fluorescentes de 4100K	00:00 - 23:59	11:00
MI 93	Hora de apagado de los tubos fluorescentes de 4100K	00:00 - 23:59	16:00
MI 94	Hora de encendido de los tubos fluorescentes de 3500K	00:00 - 23:59	6:00
MI 95	Hora de apagado de los tubos fluorescentes de 3500K	00:00 - 23:59	11:00
TD 5	Tiempo de muestreo del registrador	99:99:99.99	00:00:15.00

### 9.1.2 Menú principal. Control PC

Para ingresar a esta opción, solo se debe presionar el número dos del teclado del PLC en el menú principal (ver Figura 81). En este caso, el control de la temperatura

y la humedad relativa es realizado por medio de un computador externo, el cual se encarga de modificar unos registros determinados del PLC. El PLC funciona como un intermediario entre los diferentes actuadores y el computador externo.



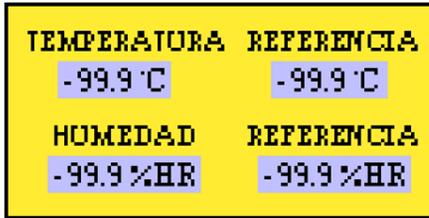


Figura 81. Menú control PC.

Los datos tomados durante una prueba determinada pueden ser descargados al computador, en un archivo de *Microsoft Excel*<sup>®</sup>, con la ayuda de *LabVIEW*<sup>®</sup>, el *software* encargado de realizar el control en el computador.

### 9.1.3 Menú principal. Control PLC

Con solo presionar el número tres en el menú principal, es posible ingresar a esta última opción. En este caso, el control de la temperatura y de la humedad relativa en el interior del recinto es realizado por el PLC. No es necesario utilizar un computador externo, para garantizar unas condiciones determinadas en el mismo.

Al presionar el pulsador de arranque, se ejecuta una rutina que se encarga de llevar el sistema a su punto de operación, la cual no permite modificar ningún parámetro por el usuario, mientras se encuentra en funcionamiento, solo cuando dicha rutina termine de ejecutarse, es posible modificar los valores de la referencia de la humedad relativa y de la temperatura, la hora de encendido y apagado de los tubos fluores-

centes y el tiempo de muestreo del registrador. Esta rutina de inicialización trabaja con un valor de 30 °C, para la referencia de la temperatura.

Cuando el sistema se encuentra alrededor de su punto de operación, aparece un nuevo *display*, el cual le permite visualizar al usuario los valores actuales de temperatura y de humedad relativa en el interior del recinto, junto con su respectiva referencia. En esta parte, es posible modificar la referencia de la humedad relativa, la referencia de la temperatura, el tiempo de muestreo del registrador y la hora de encendido y apagado de los tubos fluorescentes.

La fecha, la hora, el valor del *duty cycle* del PWM de la resistencia del sistema de calefacción, la temperatura y la humedad actual en el interior del recinto, junto con su respectiva referencia son valores que son almacenados en una tabla, la cual puede ser descargada en un computador externo, en un archivo de *Microsoft Excel*<sup>®</sup>, gracias a la ayuda del *software DataXport*<sup>®</sup>, programa incluido en el *software* gratuito proporcionado por *Unitronics*. El tiempo que se demora en tomar cada uno de los datos puede ser configurado por el propio usuario.

Si la tabla donde se almacenan los datos se llena, un nuevo *display* le informa su estado al usuario, para que este proceda a descargar los datos. Al presionar ESC del teclado del PLC, se regresa al *display* de control y se reinician los valores de la



tabla, para darle paso a almacenar nuevos datos, sin importar si estos han sido o no descargados.

## 9.2. Software de control PC

El *software* de control realizado para efectuar el control PID desde el PC fue llevado a cabo en *LabVIEW*<sup>®</sup>, en donde se implementó una rutina que permitiera la conexión entre el PLC y el PC, a través del protocolo de comunicación *Modbus* RTU y, posteriormente, se llevó a cabo el control PID previamente diseñado y simulado en *MATLAB*<sup>®</sup>. Para que este control pudiera efectuar de manera correcta las acciones necesarias para controlar la variable de interés, la cual es la temperatura, se realizaron cada una de las acciones (*Proporcional*, *Integral* y *Derivativa*) de manera minuciosa, de tal forma, que al proceder a ejecutarlo en la cámara ya acondicionada tuviera un comportamiento óptimo. Para el control de la humedad relativa se implementó un control *ON-OFF* en *LabVIEW*<sup>®</sup> y para el control de la iluminación, desde este *software* se configuran las horas en las que se deseen encender y apagar. El *software* de control llevado a cabo en *LabVIEW*<sup>®</sup>, a través del protocolo de comunicación *Modbus*, para efectuar los cálculos respectivos y realizar la acción de control necesaria para mantener los valores deseados de temperatura y de humedad, requirió de la lectura (ver Tabla 30) y escritura (ver Tabla 31) de los registros necesarios, para que el control PID lograra tener un adecuado comportamiento.

### 9.2.1 Menú control PID temperatura

Este menú es catalogado como el menú principal de la aplicación (ver Figura 82), debido a que en este se visualiza el comportamiento del control PID, que realiza su acción sobre la temperatura (con un rango de actuación entre 17 °C y 47 °C) de la Cámara de ambiente controlado, se configuran las constantes que determinan la acción PID, de igual forma, la referencia deseada de temperatura, se visualiza la temperatura actual del sistema (en indicador numérico y termómetro), también, el estado de encendido y apagado de los ventiladores, compresor y calefacción, así mismo, la acción de control, el error y el *duty cycle* escrito al PLC, del mismo modo, y de manera gráfica, la temperatura actual de la cámara y la referencia deseada por el usuario, así, como también, la hora y la fecha actual, se da la orden al controlador para realizar la acción de control y para registrar los datos que intervienen en el control (*duty cycle*, referencia de temperatura, temperatura), con la hora y fecha.

El control PID que se implementó tiene un *antiwindup*, seleccionado a través de la experimentación, lo cual permite que la acción de control no se desborde y permita una estabilización más fiable de la variable controlada (temperatura), además de esto, posee un período de muestreo, el cual permite que la acción de control se ejecute en el tiempo adecuado, para el control de la planta.

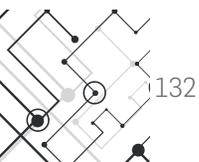


Tabla 30. Registros del PLC leídos por el PC.

Registro PLC	Parámetro
MI 48	Lectura de temperatura del sensor
MI 49	Lectura de la humedad relativa del sensor
MI 50	<i>Duty cycle</i> del PWM de la resistencia calefacción
MI 51	Estado del sistema de ventilación
MI 52	Estado del sistema de refrigeración
MI 53	Estado del sistema de calefacción
MI 54	Estado del sistema de humidificación
MI 55	Estado de los tubos fluorescentes de 6500K
MI 56	Estado de los tubos fluorescentes de 4100K
MI 57	Estado de los tubos fluorescentes de 3500K

Tabla 31. Registros del PC, escritos en el PLC.

Registro PLC	Parámetro	Rango de valores	Valores <i>default</i>
MI 87	<i>Duty cycle</i> del PWM de la resistencia calefacción	0 - 800	0
MI 88	Referencia humedad relativa	40 %HR - 60 %HR	50 %HR
MI 89	Referencia temperatura	17 °C - 47 °C	30 °C
MI 90	Hora de encendido de los tubos fluorescentes de 6500K	00:00 - 23:59	16:00
MI 91	Hora de apagado de los tubos fluorescentes de 6500K	00:00 - 23:59	19:00
MI 92	Hora de encendido de los tubos fluorescentes de 4100K	00:00 - 23:59	11:00

Continúa



Registro PLC	Parámetro	Rango de valores	Valores <i>default</i>
MI 93	Hora de apagado de los tubos fluorescentes de 4100K	00:00 - 23:59	16:00
MI 94	Hora de encendido de los tubos fluorescentes de 3500K	00:00 - 23:59	6:00
MI 95	Hora de apagado de los tubos fluorescentes de 3500K	00:00 - 23:59	11:00

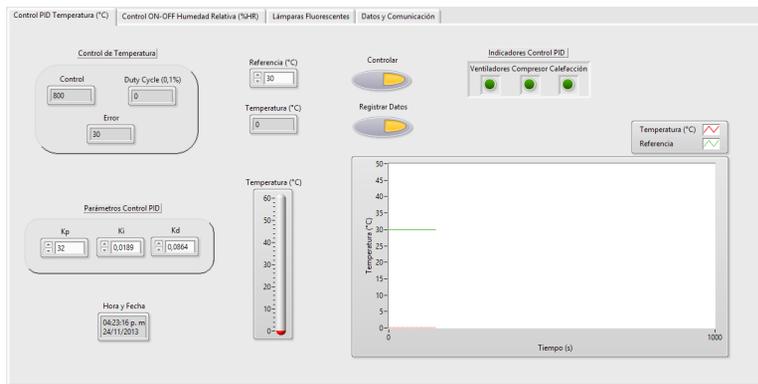


Figura 82. Menú control PID temperatura (°C).

### 9.2.2 Menú control *ON-OFF* humedad relativa

En este menú (ver Figura 83) se observa el comportamiento del control *ON-OFF* de humedad relativa (con un rango de actuación entre 40 %HR y 60 %HR), debido a que se observa, tanto en un indicador numérico como gráficamente (comportamiento en el tiempo o en un termómetro), además de esto, es posible configurar la referencia de humedad relativa (entre 40 %HR y 60 %HR) deseada por el usuario y observarla

gráficamente, se puede visualizar el estado de encendido y apagado de la nebulización, así, como también, la hora y fecha actual.

### 9.2.3 Menú lámparas fluorescentes

En este menú se configura el encendido y apagado de las lámparas fluorescentes (ver Figura 84), para que en el día pueda simularse el ciclo del sol dentro de la Cámara de ambiente controlado, entonces, para las horas de la mañana, se encienden las lámparas de 3500K, en las horas

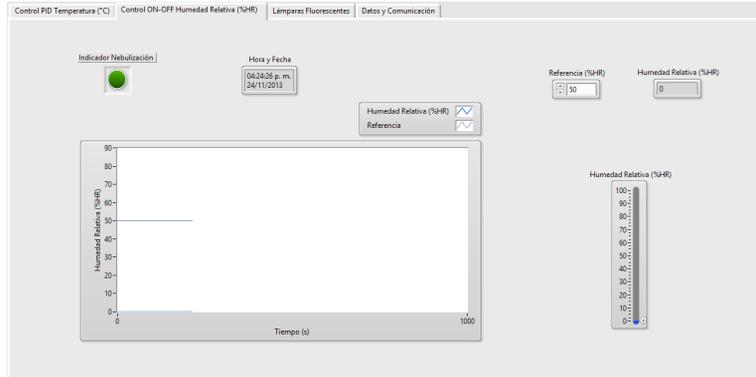


Figura 83. Menú control ON-OFF humedad relativa (%HR).

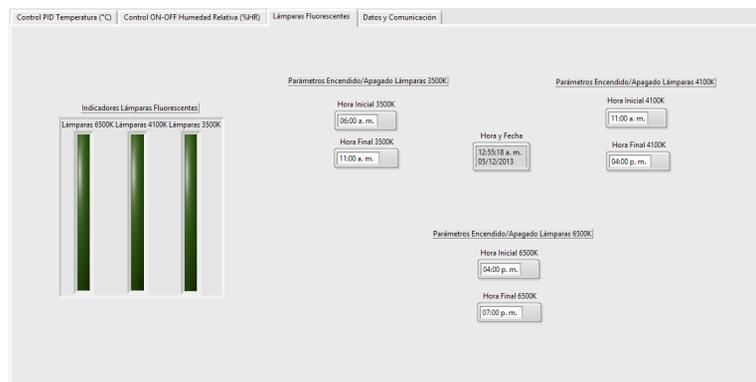


Figura 84. Menú lámparas fluorescentes.

de la tarde, las lámparas de 4100K y, en la tarde/noche, las lámparas de 6500K, además de esto, se puede visualizar la hora y la fecha actual.

#### 9.2.4 Menú datos y comunicación

En este menú (ver Figura 85) se establece el puerto de comunicación del PC, para

ser comunicado con el PLC, se configura el modo de transmisión del protocolo *Modbus* (RTU o ASCII) y la dirección del esclavo (PLC), se configura la ruta y el nombre del archivo, en donde se almacenan las variables controladas, sus respectivas referencias y la acción de control, también, se visualiza la inicialización de la comunicación por medio del protocolo *Modbus*, así



mismo, el tiempo de ejecución de la aplicación, se descargan los datos registrados y se puede parar la ejecución de la aplicación.

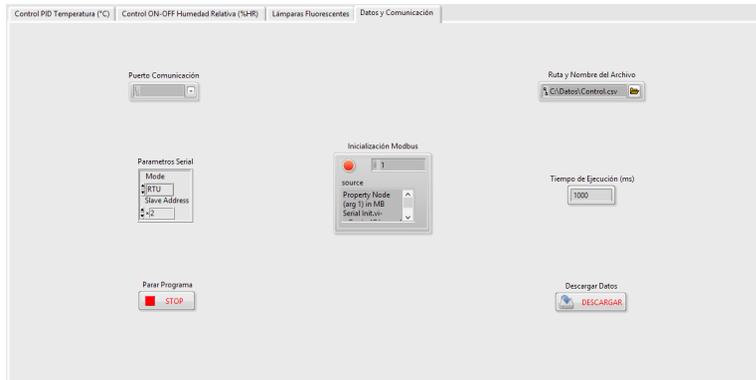


Figura 85. Menú datos y comunicación.

## 10. Productos obtenidos



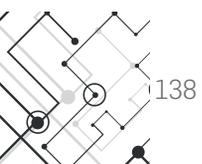
Además de este documento, como resultado del proyecto, se obtuvieron los siguientes productos:

- *Software* de control para la versión a escala de una Cámara de ambiente controlado, en la cual van a habitar y supervivir plantas e insectos.
- *Software* de control implementado en PLC *Unitronics*<sup>®</sup>.
- *Software* de control implementado en *LabVIEW*<sup>®</sup> desde el PC.
- Modelo matemático de la versión a escala de la Resistencia de Calefacción.
- Modelo matemático de la Resistencia de Calefacción implementado en *Simulink*<sup>®</sup>.
- Simulación del modelo matemático de la planta en *Simulink*<sup>®</sup>, junto con la im-



plementación de un controlador PID.

- Interfaz gráfica con el usuario.
- Interfaz gráfica en PLC *Unitronics*<sup>®</sup>.
- Interfaz gráfica en *LabVIEW*<sup>®</sup>.
- Artículo publicable en revista de divulgación, que detalle los pormenores del trabajo realizado.
- Manual de operación del sistema controlado.
- Guía de Laboratorio: *Diseño y Sintonización de un Control P+I+D para Temperatura*.



## 11. Trabajo futuro



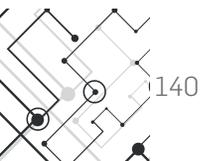
Estos son los algunos de los proyectos que están en convocatoria como temas de trabajo de grado, relacionados con el proyecto conjunto (*software* y *hardware*) de la *Cámara de ambiente controlado para la supervivencia de plantas e insectos*. Estos proyectos están dispuestos para estudiantes de pregrado.

Propuestos:

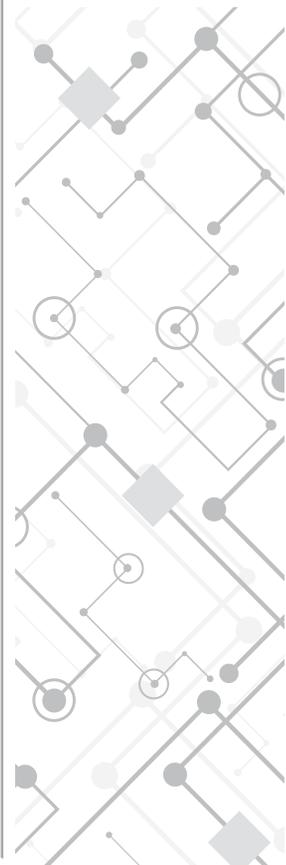
- Control de Flujo de Aire de Ventiladores (esto puede incluir modificación del cableado existente en la cámara y cambio de ventiladores).
- Control con Lógica Difusa para Humedad y Temperatura.
- Control con Redes Neuronales para Humedad y Temperatura.



- Control *Feedforward* para Humedad y Temperatura.
- Control por Espacio de Estados Multivariable para Humedad y Temperatura.



## 12. Potencial



El trabajo de grado titulado: *Cámara de ambiente controlado para la Supervivencia de Plantas e Insectos*, es un proyecto en el que se evidencia la aplicación de una nueva idea, que puede contribuir a brindar una ventaja competitiva al acondicionar una Cámara de maduración de productos cárnicos, para ser utilizada en el crecimiento controlado de plantas e insectos. Esta nueva idea puede ser el comienzo de la producción de este tipo de cámaras en Colombia, debido a que en el país, las pocas que existen no logran estabilizar la humedad y temperatura en los valores deseados por el usuario, por lo que se recurre a la importación, acción que implica un costo elevado, lo cual le da mucha más importancia a este proyecto, puesto que ya sería posible fabricarlas en el país, tanto con fines investigativos y didácticos como para incrementar la independencia tecnológica y, de esta manera, poder desarrollar e implementar, cada día, nuevas tecnologías en el país.

## 13. Conclusiones

Los sistemas de refrigeración y climatización, en lo que se refiere a cambios de temperatura, ya sean altas o bajas son, en su mayoría, sistemas lentos, en lo que respecta a las alteraciones que se puedan producir en las condiciones del ambiente o recinto en donde aplique, razón por la cual, los controles a realizar se basan en un PWM lento.

Al momento de acondicionar la cámara existente, se debe tener en cuenta que las diferentes señales que van a ser conectadas al PLC, no deben conectarse directamente, deben pasar, en primer lugar, por una bornera, de esta manera, si se desea realizar algún cambio, solo sería necesario desconectar el cable de la bornera, sin necesidad de tocar el cableado ya establecido en el interior del gabinete.

No es recomendable conectar señales directamente al PLC, en este caso, la señal del detector de nivel y de los diferentes actuadores y sensores pasan en primer lugar por un relé de interface y de dicho relé se conectan al PLC.

Para un óptimo desarrollo del trabajo de grado llevado a cabo y al tener en cuenta el constante cambio en la industria, se prefirió utilizar dos tipos de comunicaciones para que este proyecto tuviera la facilidad de acomodarse a futuros cambios, por esto es permitido trabajar con una comunicación digital *Modbus*, que permite acoplar nuevos dispositivos al mismo bus y una comunicación analógica 4-20 mA, que es punto a punto y de fácil implementación.

La variación de encendido y apagado de los actuadores de la Cámara de ambiente controlado, caso específico del compresor, hace que la humedad relativa y la temperatura tengan variaciones, en el caso de la temperatura son controlables, pero en el caso de la humedad relativa son totalmente incontrolables, por lo que las condiciones normales del sistema deben incluir el compresor encendido todo el tiempo, para obtener valores más estables de temperatura y valores deseados de humedad relativa.

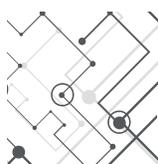
La temperatura ambiente afecta el comportamiento de la temperatura en el interior de la Cámara de ambiente controlado, debido a que sus fuertes variaciones pueden llegar a producir un aumento o disminución en la temperatura en el interior del recinto, convir-

tiéndose en una perturbación sobre la salida del proceso. El sistema de control diseñado actúa ante esta y logra disminuir el efecto de esta perturbación. La temperatura ambiente, por el simple hecho de ser variable, afecta tanto positiva como negativamente al sistema controlado.

Con el fin de conocer la dinámica de un sistema o proceso desconocido, se debe determinar su respectiva función de transferencia, la cual se obtiene por medio de una serie de pruebas, que buscan estimular el sistema y registrar su respectiva respuesta ante diferentes entradas, dentro de una zona y punto de operación determinado. Gracias a esta función de transferencia es posible diseñar un sistema de control adecuado, para el sistema en cuestión.

El control PID implementado en la resistencia de calefacción, al aplicar las acciones *Proporcional*, *Integral* y *Derivativa*, permite estabilizar la temperatura en los valores deseados y actuar contra perturbaciones no muy grandes, si las perturbaciones son de gran magnitud, el control actúa con la intención de eliminarlas, pero no asegura vencerlas y no ser perturbado.

El antiwindup representa un elemento de gran importancia para tener en cuenta en los sistemas de control, debido a que permite brindar mayor estabilidad ante posibles perturbaciones o desbordamiento de las acciones de control, por algún suceso interno, además, su implementación es sencilla y eficaz.



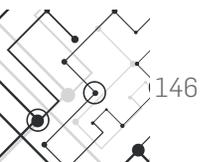
## 14. Referencias

- Abbott, M. M., Smith, J. M., y Van Ness, H. C. (2007). *Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química*. México: Mc Graw Hill.
- Acosta, A., Acosta, O., Díaz , L., y Yépez, M. (2001). Ciclo biológico de *Tetranychus cinnabarinus* Boisduval y *Tetranychus urticae* Koch en rosa, clavel y alstroemeria bajo siete ambientes. *Asociflores* 60, 25 - 39.
- Acosta, G. A. (1994). Biología y manejo de *Tetranychus* spp Flores. *Revista Acopaflor* 1 (2), 5 - 10.
- Álvarez, M., Corp, S., y Vásquez, L. (31 de 07 de 2011). *Carga térmica en las cámaras del clima controlado que utilizan la energía solar*. Obtenido de Cubasolar: [http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar ar 12/HTML/articulo04.htm](http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar%20ar%2012/HTML/articulo04.htm)
- Améstegui, M. (2001). *Apuntes de control PID*. La Paz, Bolivia: Universidad Mayor de San Andrés.

- Aponte, F., y Aponte, O. R. (1990). Daño de *Tetranychus urticae* Koch y su influencia en el cultivo de la caraota (*Phaseolus vulgaris* L.). *Boletín Entomológico de Venezuela* 5 (20), 197 - 204.
- ASL S.A IBERCEX. (28 de 08 de 2011). *Cámaras IBERCEX Fitotron* . Obtenido de Ibercex: [http://www.ibercex.com/index\\_archivos/Page614.htm](http://www.ibercex.com/index_archivos/Page614.htm)
- Ayala, O., Ferreto, R., Goitia, M., Marinich, J., Níquen- Bardales, E., y Passenheim, A. (2002). Determinación de *Tetranychus urticae* (Koch) en *Arachis hypogaea* L . *XIII Reunión de Comunicaciones Científicas y Técnicas* . Facultad de Ciencias Agrarias UNNE.
- Barrios, J. P., y Uribe, D. (2012). *Diseño y construcción de una cámara de fermentación para la obtención de productos cárnicos madurados. Tesis de pregrado*. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Bartolomé. (09 de 05 de 2013). *El protocolo modbus* . Obtenido de Tolaemon: <http://www.tolaemon.com/docs/modbus.htm>
- Betancur, M. J., y Lennis, L. F. (2009). *El PID digital básico*. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Bitsingenio. (11 de 06 de 2013). *¿Qué es un indicador luminoso?* Obtenido de Bitsingenio: <http://www.bitsingenio.com/que-es-un-indicador-luminoso>
- Bolland, H. R., Flechtmann, C. W., y Gutiérrez, J. (1998). *World catalogue of the spider mite family (Acari Tetranychidae), with references to taxonomy synonymy, host plants and distribution*. Leiden: Brill Academic Publishers.
- Bolton, W. (2006). *Ingeniería de control ( 2da Ed)*. México: Alfaomega.
- Bonet. (08 de 05 de 2013). *De lámparas más usuales*. Obtenido de Arqhys: <http://www.arqhys.com/contenidos/lamparas-uso.html>
- Botánica Morfológica. (19 de 01 de 2013). *Morfología de las plantas vasculares*. Obtenido de Biología: <http://www.biologia.edu.ar/botanica/tema1/glosario1.htm>
- Botero, M. E. (2009). *Elaboración de las notas de clases y material audiovisual del curso control digital*. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana.



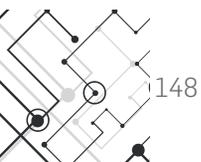
- Bricos. (01 de 15 de 2012). *Interruptores Componentes y clasificación*. Obtenido de Bricos: <http://bricos.com/2013/03/interruptores-electricos-clasificacion-y-componentes/>
- Brodsky, A. B., y Naranjo, C. (1976). Introducción a la fisiología de insectos. *Serie 111.968, No 1*, 275.
- Calderón, J. C. (2009). *Control de procesos multivariables mediante un sistema de control distribuido modificado*. Tesis de maestría. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Calderón, L. A., Guzmán, M. A., y Rodríguez, E. (20 de 10 de 2013). *Reporte de práctica sobre controlador PWM*. Obtenido de Slideshare: <http://www.slideshare.net/guest-db8ea2b/pwm>
- Campoy, P. (02 de 11 de 2012). *Control de procesos industriales*. Obtenido de <http://ocw.upm.es/ingenieria-de-sistemas-y-automatica/control-de-procesos-industriales/Contenidos/Documentos/capitulo-3>
- Carel. (02 de 12 de 2011). *Humidificadores por resistencias eléctricas*. Obtenido de <http://www.humidification-for-life.com/Carel/showVoc eMenu.2puntOT?id=129>
- Carles-Tolrá, M. (2002). Catálogo de los Díptera de España, Portugal y Andorra (Insecta). *Monografías SEA Zaragoza vol 8*, 323.
- Carmen, J. (22 de 10 de 2013). *Introducción a los modelos dinámicos*. Obtenido de Geofísica: <http://mmc.geofisica.unam.mx/Bibliografia/Matematicas/ODE/Introduccion%20a%20los%20modelos%20dinamicos.pdf>
- Casanova, J. M. (19 de 01 de 2013). *Coleópteros*. Obtenido de <http://miblogdebichos.wordpress.com/coleopteros/>
- CCI. (04 de 08 de 2011). *Cámaras de ambiente controlado*. Obtenido de <http://cci-calidad.blogspot.com/2009/08/camaras-de-ambiente-controlado.html>
- CCI. (20 de 11 de 2011). *Cámaras de simulación climática y envejecimiento ambiental acelerado*. Obtenido de CCI: [http://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos\\_y\\_documentos/2669/01-36.pdf](http://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/2669/01-36.pdf)



- CCI. (25 de 11 de 2012). *Cámara climática con regulación CO2*. Obtenido de CCI: <http://cci-calidad.blogspot.com/2011/10/camara-climatica-con-regulacion-de-co2.html>
- CCI. (15 de 11 de 2012). *Cámaras climáticas* . Obtenido de CCI: <http://cci-calidad.blogspot.com/2010/07/camara-climaticas.html>
- CCI. (10 de 03 de 2012). *Cámaras climáticas* . Obtenido de CCI: <http://www.cci-calidad.com/camara02.htm>
- CCI. (01 de 11 de 2012). *Cámaras Walk-in*. Obtenido de <http://cci-calidad.blogspot.com/2008/11/camaras-walk-in.html>
- CCI. (17 de 09 de 2012). *Cámaras Walk-in*. Obtenido de CCI: <http://cci-calidad.blogspot.com/2010/05/camaras-walk-in.html>
- CCI. (21 de 10 de 2012). *Grandes cámaras visitables, climáticas y de ensayos*. Obtenido de CCI: <http://www.cci-calidad.com/camara08.htm>
- Cogliatti, J. I. (2011). *Control automático de temperatura e iluminación*.
- Congote, L., y Rincón, E. (2008). *Modelo didáctico de control de tensión para proceso textil. Tesis de pregrado*. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Construmática. (19 de 01 de 2013). *Estanqueidad*. Obtenido de Construmática: <http://www.construmatica.com/construpedia/Estanqueidad>
- Control de procesos. (17 de 10 de 2013). *Glosario de términos. Terminología básica en control de procesos*. Obtenido de <http://istcatalina.blogspot.com/>
- Cooperativa de Mejoramiento Genético. (03 de 12 de 2011). *Refrigeración mecánica*. Obtenido de <http://www.icytal.uach.cl/efmb/asignaturas/Unidad%201%20286/Refrigeracion%20mec%C3%A1nica/Refrigeraci%C3%B3n%20Mec%C3%A1nica%20-%20Conceptos.pdf>
- Corredor, D., Páramo, G., y Sánchez, M. (27 de 02 de 2012). *Tabla de vida y parámetros poblacionales fundamentales de tetranychus urticae koch (acarí: tetranychidae)*. Obtenido de Revista UNAL: <http://www.revista.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/viewFile/20884/21802>



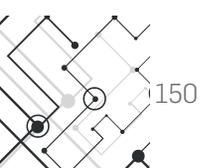
- Culturaagraria. (12 de 11 de 2012). *Araña roja tetranychus urticae*. Obtenido de Culturaagraria: <http://culturaagraria.blogspot.com/2012/03/arana-roja-tetranychus-urticae.html>
- Cyclopaedia. (12 de 09 de 2012). *Quelicero*. Obtenido de Cyclopaedia: <http://es.cyclopaedia.net/wiki/Quelicero>
- Diccionarios- Online. (19 de 01 de 2013). *Diapausa*. Obtenido de Diccionarios- Online: <http://www.diccionarios-online.com.ar/largo/diapausa.html>
- Dorkeld, F., y Migeon, A. (18 de 09 de 2013). *Spider Mites Web: a comprehensive database for the Tetranychidae*. Obtenido de <http://www.montpellier.inra.fr/CBGP/spmweb>
- Dycometal. (21 de 11 de 2012). *Construcción compacta*. Obtenido de Dycometal: [http://www.dycometal.com/Gallery.aspx?t=compacta\\_dycometal](http://www.dycometal.com/Gallery.aspx?t=compacta_dycometal)
- Educarchile. (20 de 06 de 2013). *Términos relacionados con la hidrografía y el estudio del agua*. Obtenido de Educarchile: [http://ww2.educarchile.cl/portal.herramientas/nuestros\\_sitios/bdrios/sitio/glosario/glosario.htm](http://ww2.educarchile.cl/portal.herramientas/nuestros_sitios/bdrios/sitio/glosario/glosario.htm)
- eléctrico, T. (12 de 06 de 2013). *Tablero eléctrico*. Obtenido de Scribd: <http://es.scribd.com/doc/59206879/TABLERO-ELECTRICO>
- El-Halawany, A. S., y El-Wahed, N. (2012). Effect of Temperature Degrees on the Biology and Life Table Parameters of *Tetranychus urticae* Koch on Two Pear varieties. *Egypt. Acad. J. Biolog. Sci* 4(1), 103 - 109.
- Elhuertoderamon. (25 de 10 de 2012). *La Araña roja tetranychus urticae*. Obtenido de Elhuertoderamon: <http://elhuertoderamon.blogspot.com/2011/02/la-arana-roja-tetranychus-urticae.html>
- Flores, A. (01 de 11 de 2012). *Control de procesos con retardo*. Obtenido de <http://200.13.98.241/~antonio/cursos/control/notas/isiso/cpddif.pdf>
- Flores, A. (01 de 11 de 2012). *Repuesta dinámica de sistemas lineales de primer orden*. Obtenido de <http://200.13.98.241/~antonio/cursos/control/notas/dynamics/1order.pdf>



- García, J., y Palacio, C. (2010). Control de temperatura utilizando lógica difusa . *Revista colombiana de física Vol. 42, No 3, 378 - 382.*
- Gas Natural Fenosa. (02 de 11 de 2012). *Refrigeración mediante el ciclo de absorción.* Obtenido de Empresa Eficiente: <http://www.empresaeiciente.com/es/catalogo-de-tecnologias/refrigeracion-mediante-el-ciclo-de-absorcion#ancla>
- Gipcitricos. (28 de 11 de 2012). *Araña roja.* Obtenido de Gipcitricos: <http://gipcitricos.ivia.es/area/plagas-principales/tetraniquidos/arana-roja>
- Gómez, J. M. (1958). Los "antocoritos" de las islas Canarias . *Anuario de estudios atlánticos Vol. 4, 85 - 101.*
- González, A. (01 de 11 de 2012). *Sistemas dinámicos con retardos temporales.* Obtenido de <http://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/14859/tesisUPV3695.pdf?sequence=1>
- González, J. A. (16 de 09 de 2013). *Modelamiento matemático de procesos industriales.* Obtenido de Univalle: <http://www.univalle.edu.co/~automatizacion/Cursos/ControlProcesos/Material/Modelamiento.ppt>]
- González, M. J. (24 de 11 de 2012). *Alteración de la superficie ocular tras la exposición a un ambiente adverso creado en una Cámara de Ambiente Controlado (CAC).* Obtenido de <http://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/75/1/TESIS25-090715.pdf>
- Guía verde. (20 de 11 de 2012). *Festuca glauca.* Obtenido de Guía verde: [http://guiaverde.com/plant\\_guide/festuca\\_glauca\\_676](http://guiaverde.com/plant_guide/festuca_glauca_676)
- Guirao, V. (19 de 10 de 2012). *Recinto para ensayos climáticos controlado por Ethernet.* Obtenido de <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/7329/1/pfcvictor.pdf>
- Haque, M., Islam, W., Khalequzzaman, M., y Naher, N. (2005). Study on the developmental stages of spider mite (*Tetranychus urticae* Koch) infesting country bean. *Journal of Bio- Science, 16*, 109 - 114.
- Hincapié, C. A. (2013). *Ácaro Tetranychus Urticae Koch (Fotografía de alta resolución).* Medellín, Colombia: Carlos Augusto Hincapié Llanos.



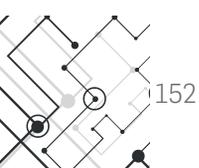
- Hruska, A., y Gladstone, S. (02 de 10 de 2012). *Una Guía para promover el manejo de plagas más seguro y más eficaz con los pequeños agricultores: una contribución al cumplimiento ambiental de la USAID - APP*. Obtenido de [http://www.nisperal.org/docs/Guia\\_MIP\\_esp.pdf](http://www.nisperal.org/docs/Guia_MIP_esp.pdf)
- Hughes, H. G., Nicholas, F., Porceddu, E., y Zaid, A. (20 de 06 de 2012). *Glosario de biotecnología para la agricultura y la alimentación*. Obtenido de <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/004/y2775s/y2775s00.pdf>
- I.C.T SL Instrumentación Científico Técnica. (24 de 02 de 2012). *Cámara de crecimiento vertical "GROW/HR"*. Obtenido de I.C.T SL Instrumentación Científico Técnica: <http://www.ic.tsl.net/productos/aparatos/0000009bf60b7670b.html>
- Infoagro. (27 de 01 de 2012). *Control climático en invernaderos*. Obtenido de Infoagro: [http://www.infoagro.com/industria\\_auxiliar/control\\_climatico.htm](http://www.infoagro.com/industria_auxiliar/control_climatico.htm)
- Infoagro. (19 de 06 de 2012). *Diccionario agrícola: Radiación PAR*. Obtenido de Infoagro: [http://www.infoagro.com/diccionario\\_agricola/traducir.asp?i=1&id=546&id-t=1&palabra=radiaci%F3n%20PAR\\_\\_radiacion%20par\\_radiaciones%20par\\_](http://www.infoagro.com/diccionario_agricola/traducir.asp?i=1&id=546&id-t=1&palabra=radiaci%F3n%20PAR__radiacion%20par_radiaciones%20par_)
- Infojardín. (19 de 01 de 2013). *Estilote- Estiletos*. Obtenido de Infojardín: <http://www.infojardin.net/glosario/estaque/estilote-estiletos.htm>
- Intrave. (22 de 01 de 2013). *Unitronics*. Obtenido de Intrave: <http://www.intrave.com/unitronics.htm>
- Isaza, C. A. (2011). *Cámara de fermentación para la obtención de productos cárnicos madurados. Trabajo de grado*. Medellín, Colombia: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Isaza, C. A. (2012). *Cámara de Maduración para productos cárnicos existente (Fotografía)*. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana.
- JLC. (22 de 10 de 2013). *Planteo general de la simulación*. Obtenido de [http://www.frsf.utn.edu.ar/matero/visitante/bajar\\_apunte.php?id\\_catedra=150&id\\_apunte=3045](http://www.frsf.utn.edu.ar/matero/visitante/bajar_apunte.php?id_catedra=150&id_apunte=3045)
- Juárez, A. (19 de 06 de 2012). *Humedad Ambiente*. Obtenido de <http://www.oni.escuelas.edu.ar/2008/CORDOBA/1324/trabajo/humedadambiente.html>



- Kalipedia. (19 de 01 de 2013). *La Biocenosis*. Obtenido de Kalipedia: [http://co.kalipedia.com/ecologia/tema/biocenosis.html?x=20070418klpcnaecl\\_15.Kes](http://co.kalipedia.com/ecologia/tema/biocenosis.html?x=20070418klpcnaecl_15.Kes)
- La Guía. (19 de 01 de 2013). *Fitoquímica*. Obtenido de La Guía: <http://biologia.laguia2000.com/botanica/fitoquimica>
- Laboratorio de Investigación Aplicada y Desarrollo. (23 de 11 de 2012). *Cámaras de ambiente controlado*. Obtenido de Laboratorio de Investigación Aplicada y Desarrollo: <http://www.liade.efn.uncor.edu/proyectos/camaras.htm>
- Lahura, E. (22 de 10 de 2013). *El Coeficiente de correlación y correlaciones espúreas*. Obtenido de <http://departamento.pucp.edu.pe/economia/images/documentos/DDD218.pdf>
- Lanfri, S. (20 de 10 de 2013). *Desarrollo de una metodología para la detección de cuerpos de agua mediante el análisis de imágenes SAR COSMO SkyMed y de DEMs*. Obtenido de [http://www2.famaf.unc.edu.ar/carreras/posgrado/documents/maestria\\_aearte/tesisSofiaLanfri.pdf](http://www2.famaf.unc.edu.ar/carreras/posgrado/documents/maestria_aearte/tesisSofiaLanfri.pdf)
- Marco, V. (02 de 11 de 2012). *Modernización de la tasa de desarrollo de insectos en función de la temperatura. Aplicación al manejo integrado de plagas mediante el método de grados - días*. Obtenido de <http://entomologia.rediris.es/aracnet/7/12entoaplicada/>
- Mejía, M. (2005). Calentamiento global y distribución de plagas. *Boletín de la NAPPO*, 5 - 6.
- Miliarium. (19 de 06 de 2012). *Glosario de arquitectura sostenible*. Obtenido de Miliarium: <http://www.miliarium.com/bibliografia/GlosarioArquitecturaSostenible.asp>
- Navajas, M. (1998). Host plant associations in the spider mite *Tetranychus urticae* (Acari Tetranychidae): insights from molecular phylogeography. *Experimental & Applied Acarology* 22, 201 - 214.
- Noemí, R. (15 de 06 de 2012). *Módulo "implementación de un vivero de especies frutales, enfocado al durazno", dirigido al CCODE de la comunidad Sacanillá, Cobán, Alta Verapaz*. Obtenido de [http://biblioteca.usac.edu.gt/EPS/07/07\\_1595.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/EPS/07/07_1595.pdf)



- Núñez, D. (19 de 01 de 2013). *Efecto de la temperatura en la capacidad depredadora de Neoseilus californicus (McGREGOR) sobre tres especies de ácaros fitófagos en laboratorio*. Obtenido de [http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2005/nunez\\_d/sources/nunez\\_d.pdf](http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2005/nunez_d/sources/nunez_d.pdf)
- Ogata, K. (1987). *Discrete-Time Control Systems*. New Jersey: Prentice Hall Inc.
- Osorio, M. (2011). *Métodos de sintonía de Ziegler-Nichols.. Sistmas Automáticos de Control*. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Osorio, M. (15 de 09 de 2013). *Modelación experimental*. Obtenido de <http://eav.upb.edu.co/banco/sites/default/files/files/2%20PROCESOS%20CONTINUOS%20%20MOMODELACION%20C3%93N.ppt>
- Parameter Generator y Control. (25 de 08 de 2011). *30 CF Calibration Chamber*. Obtenido de <http://humiditycontrol.com/product/30-cf-calibration-reach-in-chamber/>
- Pérez, M. A., Pérez, A., y Pérez, E. (16 de 09 de 2012). *Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo*. Obtenido de <http://dea.unsj.edu.ar/control1b/teoria/unidad1y2.pdf>
- Plcdev. (16 de 01 de 2013). *¿Qué es un PLC?* Obtenido de Plcdev: <http://www.plcdev.com/>
- QuimiNet. (27 de 11 de 2012). *Evite obstrucciones en su sistema de ductos y ventilación*. Obtenido de QuimiNet: <http://www.quiminet.com/articulos/evite-obstrucciones-en-su-sistema-de-ductos-y-ventilacion-2854100.htm>
- Quintero, P. (1991). El control de pulgones y ácaros y su incremento en la producción en el cultivo algodónero. *ASIAVA* 36, 11 - 16.
- Raffo, D. (31 de 05 de 2011). *Factores climáticos: Efecto de las altas temperaturas sobre la calidad de los frutos*. Obtenido de [http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-rompe40\\_raffo.pdf](http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-rompe40_raffo.pdf)
- Rebosio, N. (06 de 05 de 2013). *Niveles lumínicos y parámetros de calidad lumínica (Parte 1°) Temperatura del color y reproducción cromática*. Obtenido de Electromagazine No 12: <http://www.electromagazine.com.uy/antiores/numero12/iluminacion1.htm>



- Rosales, J. M. (19 de 06 de 2012). *Micropopagación de calahuala Phlebodium pseudoaureum (Cav) Lelling* con tres tipos de explantes en diferentes medios de cultivo in vitro. Obtenido de Biblioteca USAC: [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/01/01\\_2239.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/01/01_2239.pdf)
- Ross, C. W., y Salisbury, F. B. (1994). *Fisiología vegetal*. México D.F: Editorial Iberoamérica.
- Schneider Electric. (20 de 10 de 2013). *Preguntas técnicas frecuentes (FAQs)*. Obtenido de Schneider Electric: [http://www.schneiderelectric.es/sites/spain/es/sopORTE/faq/faq\\_main.page?page=content&country=ES&lang=es&locale=es\\_ES&viewlocale=es\\_ES&id=FA28227&redirect=true](http://www.schneiderelectric.es/sites/spain/es/sopORTE/faq/faq_main.page?page=content&country=ES&lang=es&locale=es_ES&viewlocale=es_ES&id=FA28227&redirect=true)
- Sistemas de calefacción . (14 de 11 de 2012). *Sistemas de calefacción* . Obtenido de Sistemas de calefacción : <http://www.sistemascalefaccion.com/>
- Sistemas lineales de primer orden*. (01 de 11 de 2012). Obtenido de <http://galeon.com/mcoronado/MODELAMIENTO/02PORDTI.pdf>
- Sodeca. (18 de 06 de 2011). *Información técnica: caudal y presión del ventilador*. Obtenido de Sodeca: <http://www.sodeca.com/tecnica.html>
- Tecdigitaldelbajo. (11 de 09 de 2013). *Modbus parte III, qué es el Modbus*. Obtenido de Tecdigitaldelbajo: <http://www.tecdigitaldelbajo.com/blog/27-modbus-parTE-iii-que-es-el-modbus.html>
- The free dictionary . (19 de 01 de 2013). *Ninfa*. Obtenido de The free dictionary : <http://es.thefreedictionary.com/ninfa>
- Toro, H. D. (2013). *Colonia de ácaro Tetranychus Urticae Koch (Fotografía de alta resolución)*. Medellín : Hernán Darío Toro Agudelo.
- Translimite. (09 de 11 de 2011). *Humidificación*. Obtenido de Translimite: <http://www.translimite.com.mx/humidificacion/>
- Universidad Salamanca. (09 de 11 de 2012). *Tisanópteros*. Obtenido de Universidad Salamanca: <http://dicciomed.eusal.es/palabra/tisanopteros>
- Villegas, C. A. (1996). *Biología 8*. México D.F: Mc Graww Hill.



Wikcionario. (03 de 10 de 2012). *Ecllosionar*. Obtenido de Wikcionario: <http://es.wiktionary.org/wiki/ecllosionar>

Wikipedia. (20 de 09 de 2012). *Maduración en carne de vacuno*. Obtenido de Wikipedia: [http://es.wikipedia.org/wiki/Maduraci%C3%B3n\\_en\\_carne\\_de\\_vacuno](http://es.wikipedia.org/wiki/Maduraci%C3%B3n_en_carne_de_vacuno)

Wikipedia. (29 de 11 de 2012). *Sistema frigorífico*. Obtenido de Wikipedia: [http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_frigor%C3%ADfico](http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_frigor%C3%ADfico)

Wikipedia. (22 de 11 de 2012). *Tetranychus urticae*. Obtenido de Wikipedia: [http://es.wikipedia.org/wiki/Tetranychus\\_urticae](http://es.wikipedia.org/wiki/Tetranychus_urticae)

Wikipedia. (19 de 01 de 2013). *Clorofila*. Obtenido de Wikipedia: <http://es.wikipedia.org/wiki/Clorofila>

Wikipedia. (19 de 01 de 2013). *Entropía*. Obtenido de Wikipedia: <http://es.wikipedia.org/wiki/Entrop%C3%ADa>

Wikipedia. (19 de 01 de 2013). *Festuca*. Obtenido de Wikipedia: <http://es.wikipedia.org/wiki/Festuca>

Wikipedia. (24 de 05 de 2013). *HMI*. Obtenido de Wikipedia: <http://es.wikipedia.org/wiki/HMI>

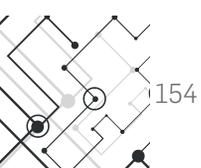
Wikipedia. (19 de 01 de 2013). *Incrustación*. Obtenido de Wikipedia: [http://es.wikipedia.org/wiki/Incrustación](http://es.wikipedia.org/wiki/Incrustaci%C3%B3n)

Wikipedia. (19 de 01 de 2013). *Larva*. Obtenido de Wikipedia: [<http://es.wikipedia.org/wiki/Larva>]

Wikipedia. (19 de 01 de 2013). *Staphylinidae*. Obtenido de Wikipedia: <http://es.wikipedia.org/wiki/Staphylinidae>

Wikipedia. (19 de 01 de 2013). *Sumidero*. Obtenido de Wikipedia: <http://es.wikipedia.org/wiki/Sumidero>

Wikipedia. (05 de 07 de 2013). *UTR*. Obtenido de Wikipedia: [http://es.wikipedia.org/wiki/Unidad\\_Terminal\\_Remota](http://es.wikipedia.org/wiki/Unidad_Terminal_Remota)

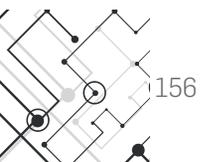


- WordReference. (19 de 01 de 2013). *Defoliación*. Obtenido de WordReference: <http://www.wordreference.com/definicion/defoliaci%C3%B3n>
- WordReference. (19 de 01 de 2013). *Herrumbroso*. Obtenido de WordReference: <http://www.wordreference.com/definicion/herrumbroso>
- Xmcarne. (11 de 09 de 2013). *Introducción Modbus*. Obtenido de Xmcarne: <http://www.xmcarne.com/blog-tecnico/introduccion-modbus>
- Youney, J. (30 de 10 de 2013). *Acomparison and evaluation of common pid tuning methods*. Obtenido de [http://etd.fcla.edu/CF/CFE0001716/Youney\\_Justin\\_J\\_2007\\_8\\_MS.pdf](http://etd.fcla.edu/CF/CFE0001716/Youney_Justin_J_2007_8_MS.pdf)
- Zaragoza, M. A. (12 de 12 de 2012). *Manejo integrado del ácaro de dos manchas*. Obtenido de [http://edialogo.ning.com/group/mpforum/topics/manejo-integrado-del-acaro-de-dos-manchas-tetranychus-urticae?xg\\_source=activity](http://edialogo.ning.com/group/mpforum/topics/manejo-integrado-del-acaro-de-dos-manchas-tetranychus-urticae?xg_source=activity)
- Zegarra, C. (18 de 06 de 2012). *Determinación del fotoperiodo en el Perú*. Obtenido de Scribd: <http://es.scribd.com/doc/95513211/fotoperiodo-teoria>



## 15. Anexos

Anexo A  
Planos Eléctricos Acondicionamiento  
Cámara de maduración





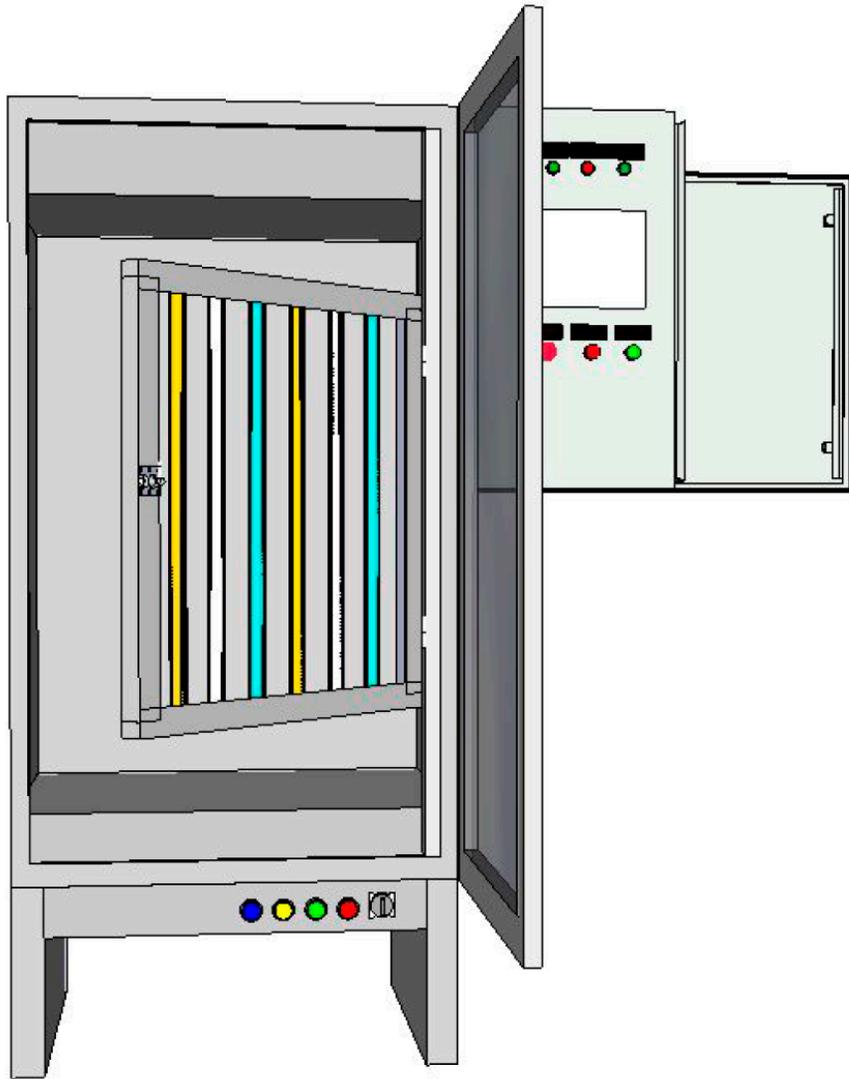


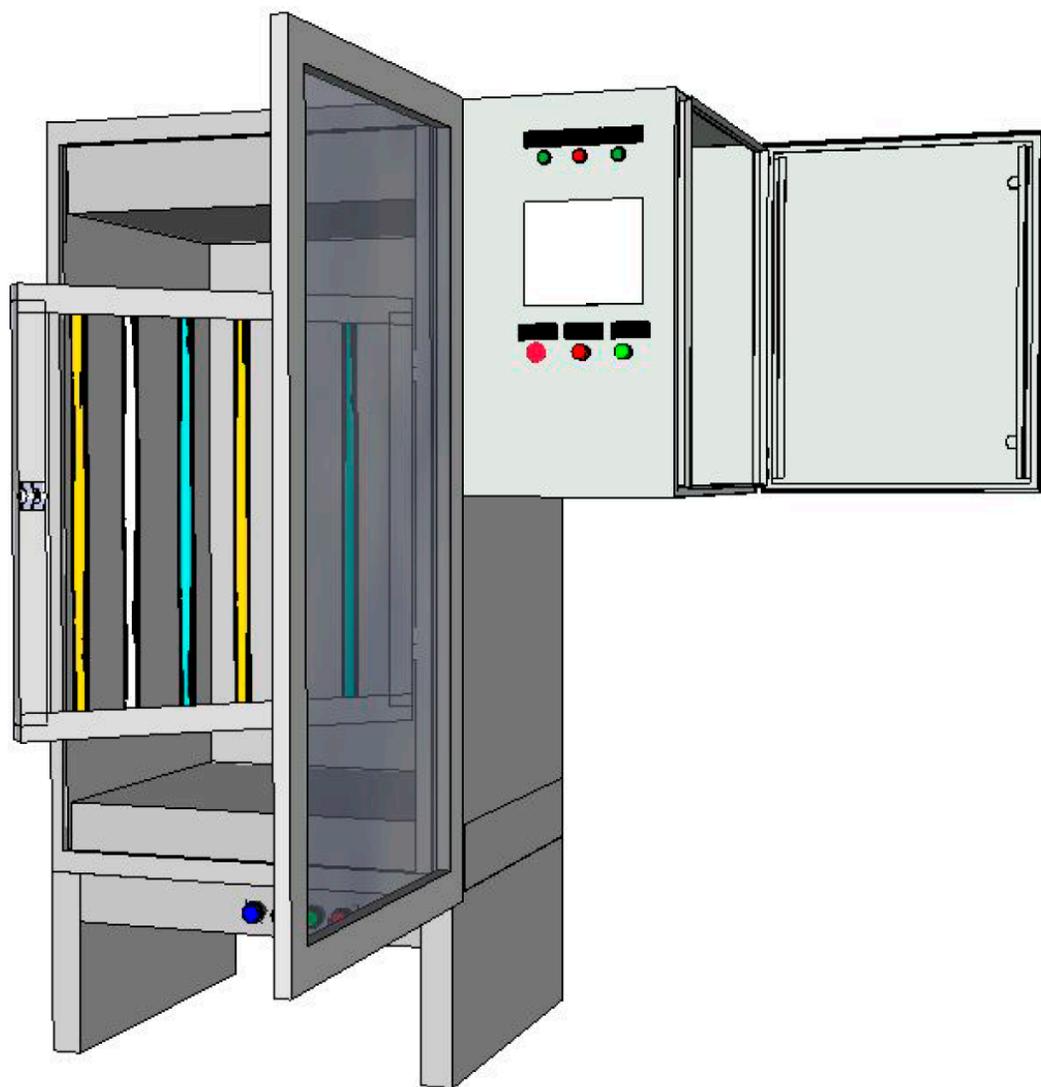


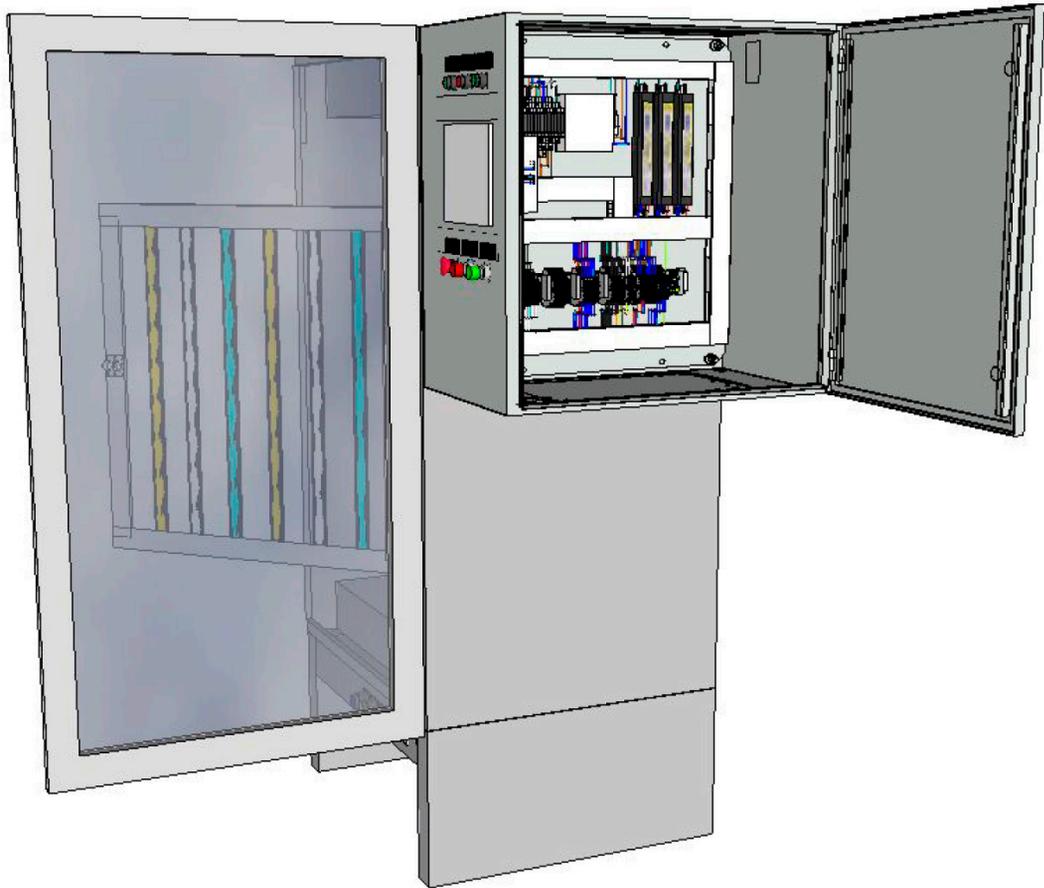


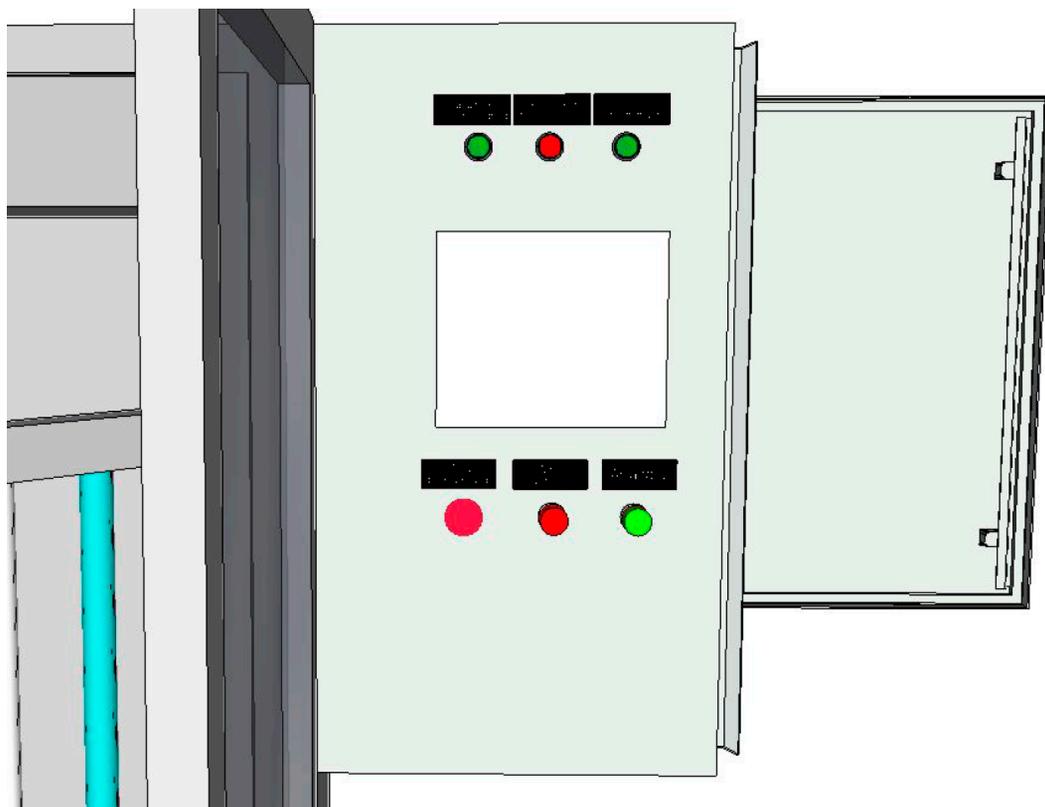
Anexo B  
Modelo 3D en *Google Sketchup*  
Acondicionamiento Cámara de maduración

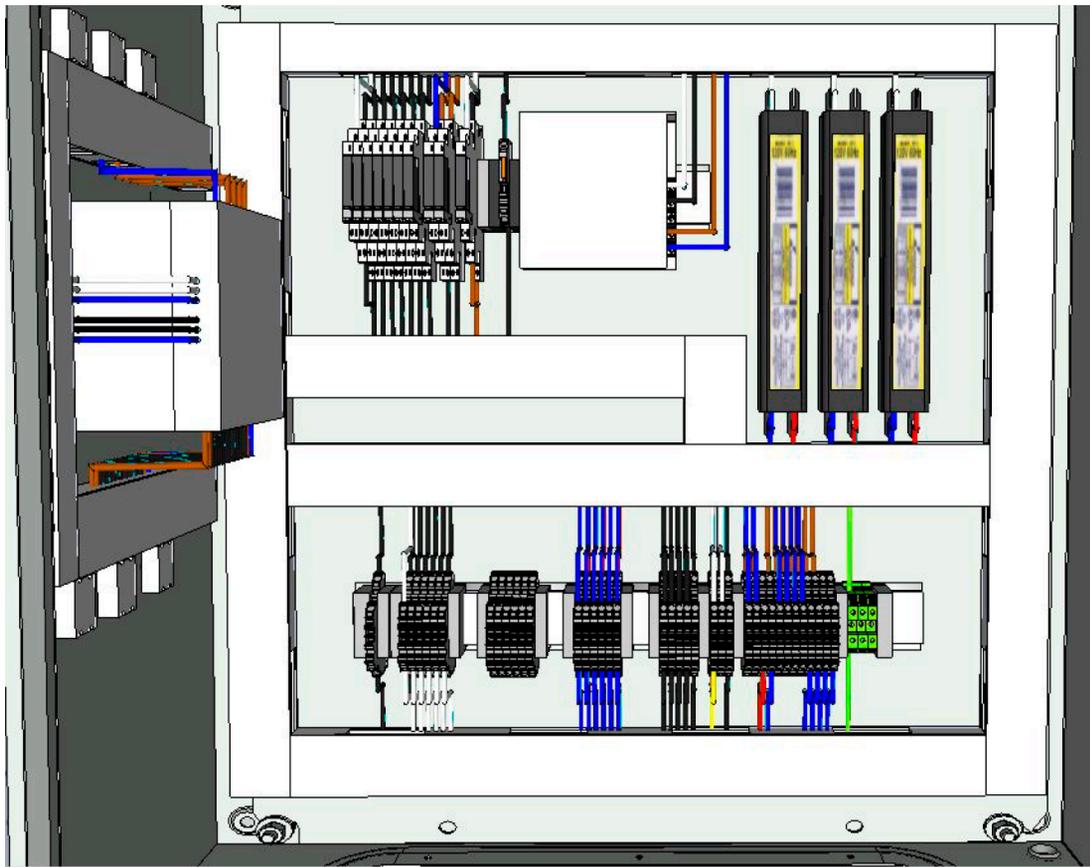


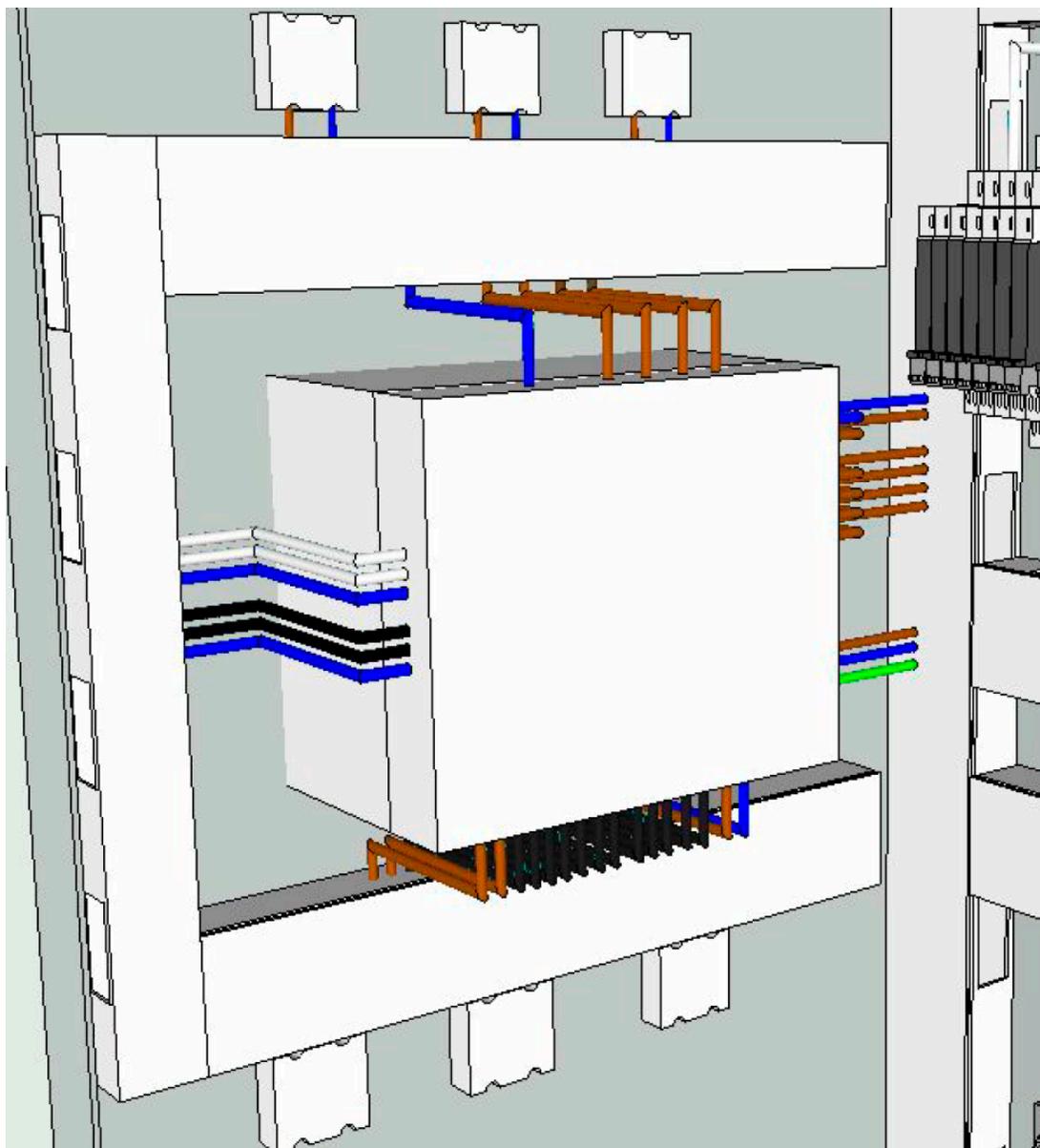


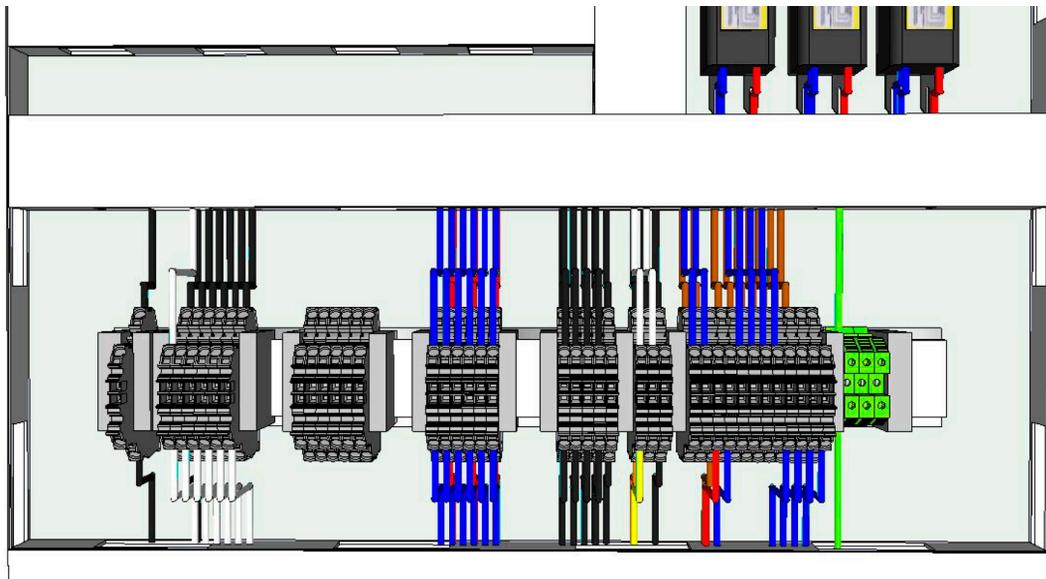
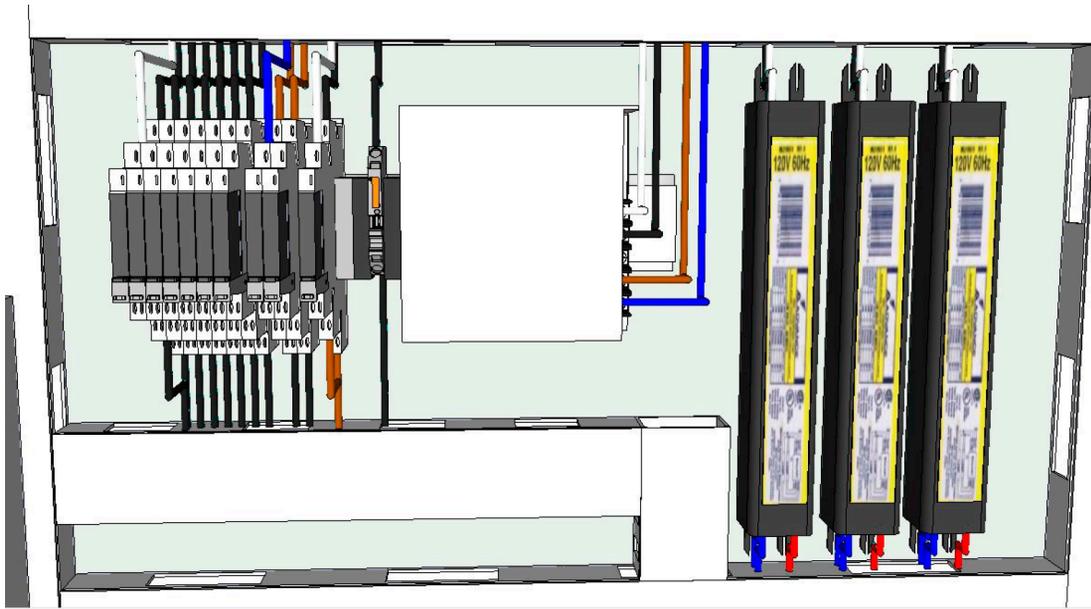












Anexo C  
Guía de Laboratorio



## Diseño y Sintonización de un Control P+I+D para Temperatura

Jorge A. CARDONA-GIL, Juan P. PAZOS-URREA,  
Marisol OSORIO

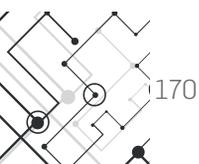
Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica; Universidad  
Pontificia Bolivariana; Cir.1 #70-01,  
Medellín, Colombia.  
jorgeandres.cardona@upb.edu.co

**Resumen:** En esta práctica se estudiará la sintonización del control P+I+D con el modelo de la resistencia de calefacción y de la experiencia. Para el análisis del control se usará la planta *Cámara de Ambiente Controlado para la Supervivencia de Plantas e Insectos*, con la cual es posible trabajar en el laboratorio de Sistemas Automáticos de Control (SAC). *Copyright © UPB 2013*

**Palabras clave:** Ambiente, control, sintonización, temperatura.

**Abstract:** In this lab, we will study the tuning P+I+D with the model of the heating resistor and the experience. For the analysis of the plant used control "*Cámara de Ambiente Controlado para la Supervivencia de Plantas e Insectos*", with which it is possible to work in the laboratory of Automatic Control Systems (SAC).

**Keywords:** Environment, control, temperature, tuning.  
UPB\_autoArt 2013-07-19, s2013-12-03



## 1. Introducción

El estudiante, en esta práctica, utilizará diferentes métodos, ya existentes, para la puesta a punto de controladores P+I+D en sistemas realimentados. Al realizar esta puesta a punto con cada método, se deberá analizar, cuál de los métodos utilizados para la sintonización del control P+I+D, aplicado sobre la resistencia de calefacción, es el adecuado y cuál no; y se estudiarán cuáles son los parámetros y los limitantes asociados.

Para la realización del laboratorio, es necesario que el estudiante tenga muy claros los conceptos referidos al diseño y la sintonización de controladores P+I+D, estudiados en el curso de Sistemas Automáticos de Control (SAC).

El objetivo del laboratorio será probar los diseños de controladores P+I+D, obtenidos mediante métodos de diseño de controladores, utilizando el modelo de la resistencia de calefacción de la *Cámara de Ambiente Controlado para la Supervivencia de Plantas e Insectos* (ver Trabajo de Grado). Con esto se buscará específicamente:

- Probar los controles P+I+D previamente diseñados.
- Aplicar un método de sintonía experimental.
- Aplicar perturbaciones sobre el control P+I+D de temperatura.
- Analizar cuál método es el adecuado y cuál es nocivo para la planta.

En la sección 2 se describirá el equipo necesario; en la sección 3 se especificará la metodología sugerida; en la sección 4 se explicará la manera de preparar el trabajo práctico; en la sección 5 se detallará el procedimiento a realizar durante la práctica y, en la sección 6, se esbozará el contenido mínimo que ha de llevar el informe.

## 2. Equipo

Para la práctica se utilizará la *Cámara de Ambiente Controlado para la Supervivencia de Plantas e Insectos*, el cual incluye un PLC y un computador. No será necesario solicitar, ni llevar equipo adicional.

## 3. Metodología

### 3.1. Metodología general de la práctica

Es indispensable seguir los procedimientos de operación y las consignas de seguridad del equipo, para lo cual el estudiante deberá repasar el documento *Seguridad & Metodología General*. Además de lo descrito en dicho documento, tendrá que considerar lo siguiente:

*Requisitos académicos.* El tiempo dedicado al laboratorio debe ser aprovechado de manera eficiente, utilizado para configurar los equipos y efectuar las pruebas necesarias. En ningún caso se repasará el tema del curso teórico dentro de la práctica de laboratorio. Dicho tema es un prerrequisito, sin el cual, el instructor, bajo ningun-



na circunstancia, debe permitir al alumno efectuar la práctica; tanto por la seguridad del estudiante y el equipo, como por el respeto a los objetivos y procedimientos en el laboratorio. Lo anterior aplica incluso si, por alguna razón de fuerza mayor, el tema necesario no ha sido visto aún en el curso teórico. En este caso se debe informar al profesor de la teoría y al coordinador del área; pero no se habrá de efectuar la práctica hasta no solucionar este requisito (Betancur *et. al*, 2010).

*Preparación de la sesión experimental.* Es indispensable que cada estudiante prepare personalmente, con anterioridad, los temas del laboratorio; que comprenda perfectamente el procedimiento a seguir durante el mismo, que tenga preparados los protocolos y los formatos para la toma de datos. Es de anotar que, en esta práctica en particular, el

peso del trabajo y del aprendizaje está en la preparación previa a la práctica, en las simulaciones. El trabajo experimental será corto y de carácter comprobatorio. Por tal razón se prestará especial atención al examen de preparación (Betancur *et. al*, 2010).

#### 4. Preparación previa

En la Tabla 2 se muestran las preguntas que se deben responder durante la preparación para la práctica. Se debe traer la Tabla 1, con los parámetros de los controles pedidos y se debe mostrar al instructor el procedimiento de diseño y los resultados de los controles simulados, impresos en el formato de preferencia del estudiante. Cada instructor podrá evaluar, individualmente, la preparación para la práctica, ya sea con preguntas orales o escritas.

**Tabla 1.** Parámetros del preinforme.

Exp.	ts(h)	%Mp	$e_{ss}$	$Kp$	$Ki$	$Kd$
Z-N						
CHR	2	5				
CHR	2	20				



Tabla 2. Contenido preinforme.

#	Secciones y subsecciones
1.	INTRODUCCIÓN
	Explique con sus palabras el objetivo y la metodología de la práctica.
2.	DESARROLLO
	Responda cada una de las siguientes preguntas.
2.1.	En un control P+I+D, ¿qué aporta cada acción para lograr estabilizar las variables a controlar en los valores deseados?
2.2.	¿Qué es una perturbación? ¿Cómo afecta al control P+I+D? ¿Con qué tipo de control se puede cancelar una perturbación?
2.3.	¿Cómo es el método de diseño de controladores por Ziegler-Nichols? ¿En qué casos se puede aplicar este método y en cuáles no?
2.4.	Obtenga el control P+I+D para la resistencia de calefacción, usando el método de Ziegler-Nichols en lazo abierto y grafique los resultados de las simulaciones.
2.5.	¿Cómo es el método de diseño de controladores por Chien, Hrones y Reswick? ¿En qué casos se puede aplicar este método y en cuáles no?
2.6.	Diseñe un control P+I+D para la resistencia de calefacción, usando el método de Chien, Hrones y Reswick, para que el comportamiento del sistema controlado tenga un sobrepaso menor al 5 % y el tiempo de estabilización no supere las dos horas. Grafique los resultados de las simulaciones.
2.7.	Diseñe un control P+I+D para la resistencia de calefacción, usando el método de Chien, Hrones y Reswick, para que el comportamiento del sistema controlado tenga un sobrepaso menor al 20 % y el tiempo de estabilización no supere las dos horas. Grafique los resultados de las simulaciones.

## 5. Procedimiento

Para realizar los diferentes experimentos, se utilizará un programa en la plataforma *LabVIEW*<sup>®</sup> que permite implementar el Control PID, requerido en la práctica de laboratorio. Para esto, solo es necesario abrir un archivo ejecutable llamado: *Control\_Cámara\_de\_Ambiente\_Controlado.exe*, modificar las respectivas constantes, colocar la referencia deseada y ejecutar el *software*.

Los experimentos que se realizarán, permitirán analizar el desempeño del control prediseñado, esto puede servir de punto de partida para, una vez terminado el laboratorio, aplicar un método manual de sintonización. Con la información extraída de cada una de las pruebas, se realizarán los análisis detallados del funcionamiento de los controles en la máquina real y se podrán comparar con los datos de la simulación.



### 5.1 Método Ziegler-Nichols

Ingrese los valores de los parámetros del controlador obtenidos a partir del método de Ziegler-Nichols, para sistemas en lazo abierto.

### 5.2. Método de Chien, Hrones y Reswick

Ingrese los valores de los parámetros del controlador obtenidos a partir del método de Chien, Hrones y Reswick, para sistemas en lazo abierto.

### 5.3. Ajuste manual del control P+I+D

Partiendo de la mejor combinación de control P+I+D, ajuste los parámetros del control para tratar de mejorar su desempeño.

### 5.4. Perturbaciones aplicadas al Control P+I+D sintonizado

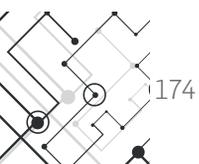
A partir del ajuste hecho al controlador, aplique perturbaciones al sistema:

- Utilice el control *ON-OFF*, aplicado al humidificador por resistencia eléctrica sumergida, colocando un valor de humedad relativa (%HR) entre 40 %HR y 60 %HR.
- Configure una hora determinada, de tal manera, que se enciendan, por un tiempo, alguno de los tres pares de lámparas.
- Abra la puerta de la Cámara de Ambiente Controlado por 30 segundos.

Tabla 3. Contenido del informe.

#	Secciones y subsecciones
1.	INTRODUCCIÓN
1.1.	Objetivo general
1.2.	Objetivos específicos (copiarlos igual, como están en la guía)
2.	DESARROLLO
	Grafique los datos experimentales y las simulaciones con el modelo de la resistencia de calefacción. En cada gráfica se debe observar el resultado experimental y el simulado para facilitar el análisis.

Continúa



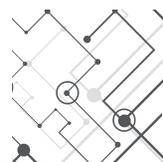
#	Secciones y subsecciones
2.1.	Método Ziegler-Nichols
2.2.	Método de Chien, Hrones y Reswick
2.3.	Sintonía manual
2.4.	Perturbaciones aplicadas al Control P+I+D sintonizado
	Grafique el comportamiento de la temperatura en cada perturbación aplicada.
3.	CONCLUSIONES (Concluya respecto a los objetivos de la práctica)
--	AGRADECIMIENTOS (esta sección es opcional y no se numera)
--	REFERENCIAS (esta sección es obligatoria y no se numera)
--	AUTOR(ES) (esta sección es obligatoria y no se numera)

## 6. Informe

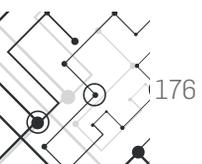
El informe escrito seguirá el formato *epaper UPB\_autoArt*, con el contenido estipulado en la Tabla 3.

## Referencias

Betancur, M. J.; Soto M. y C. Zuluaga (2010). *Diseño de control P+I+D y prealimentación proporcional*. Guía de Laboratorio Sistemas Automáticos de Control (SAC), Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.



Anexo D  
Manual de Operación del Sistema  
Controlado 2.0



# Manual de operación de una Cámara de ambiente controlado

Grupo de automática y diseño A+D

Universidad Pontificia Bolivariana

Escuela de Ingenierías

Facultad de Ingeniería Eléctrica-Ingeniería Electrónica

Medellín

2014

Los derechos morales pertenecen a:

- IEO, MSc. Jorge Andrés Cardona Gil, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Pontificia Bolivariana.
- IEO Juan Pablo Pazos Urrea, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Pontificia Bolivariana.
- Ph.D. Marisol Osorio, Docente investigadora TC, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Pontificia Bolivariana.
- Ph.D. César Alejandro Isaza, Docente investigador, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Bolivariana.

Los derechos de explotación pertenecen a:

- Universidad Pontificia Bolivariana.
- Pbro. Julio Jairo Ceballos Sepúlveda, Rector General, representante legal.
- Pbro. Jorge Iván Ramírez Aguirre, Rector del Liceo y la Institución Universitaria Salazar y Herrera.
- Ph.D. Piedad Felisinda Gañán, Docente investigadora, Facultad de Ingeniería Química.
- MSc. Juan Carlos Palacio Piedrahíta, Director, Facultad de Ingeniería Agroindustrial.
- MSc. Hugo Alberto Cardona, Director, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.
- Ph.D. Rafael Esteban Vásquez Moncayo, Coordinador, Grupo de Automática y Diseño A+D.



Este manual fue elaborado por:

- IEO, MSc. Jorge Andrés Cardona Gil, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Pontificia Bolivariana.
- IEO Juan Pablo Pazos Urrea, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Pontificia Bolivariana.

## Recomendaciones y precauciones

Para trabajar con la Cámara de ambiente controlado se debe tener en cuenta lo siguiente:

1. Conectar la Cámara de ambiente controlado a un regulador de voltaje con el fin de protegerla ante bajones de voltaje que se puedan presentar.
2. Si va a utilizar el sistema de humidificación, por favor verificar que el reci-

piente que almacena el agua de este sistema se encuentra lleno. Conectar al sistema de llenado automático de este recipiente a una manguera (ver Figura 1), en caso de no hacerlo, realizar el llenado de agua de manera manual para permitir el uso de este sistema.

3. Conectar una manguera a un desagüe que permita la evacuación del exceso de agua por parte del evaporador (ver Figura 1).
4. Si la resistencia del sistema de calefacción no funciona, a pesar de que el PLC le dé la orden de encendido, verificar el estado del interruptor límite de alta temperatura (termostato), es recomendable que la perilla de selección de la temperatura en la que va actuar este interruptor esté en 60 °C (ver Figura 2).



Figura 1. Conexión de mangueras para llenado automático y para permitir la evacuación del exceso de agua.



Figura 2. Ubicación y configuración del termostato en la Cámara de ambiente controlado.

5. Cuando la Cámara de Ambiente Controlado se encuentra en funcionamiento, trabaje siempre estando cerca del gabinete de control, y por ende, del botón de Paro Emergencia.
6. Si el control de temperatura y humedad relativa es realizado por medio de un computador externo, antes de seleccionar una temperatura cualquiera entre los 17 °C y 47 °C, por favor primero trabaje con un valor de 30 °C y espere aproximadamente 2 h hasta que la temperatura en el interior del recinto logre tener uno valor entre 30.7 °C y 29.7 °C, con el fin de llevar el sistema a su punto de operación. Luego de esto es posible trabajar con nuevos valores de temperatura dentro del rango mencionado inicialmente. Si no se realiza esto, no se garantiza el correcto funcionamiento del control.
7. Ante cualquier anomalía que se observe durante la operación de la Cámara de Ambiente Controlado, presione el botón Paro Emergencia ubicado en el gabinete de control.
8. Si detecta que alguno de los dispositivos de seguridad (interruptores, sensores y detectores) no funcionan correctamente, evite utilizar la Cámara de Ambiente Controlado.

## Operación general de la Cámara de ambiente controlado

Pasos para encender la Cámara de ambiente controlado:

1. Verificar que el recipiente que almacena el agua del humidificador se encuentra lleno si desea hacer uso de este sistema.



2. Revisar que el interruptor selector de tipo muletilla que se encarga de encender el PLC se encuentra en la posición *OFF*.
3. Conectar la cámara a un toma corriente estándar de tres hilos (fase, neutro y tierra) de 120 V @ 60 Hz.
4. Encender el PLC al cambiar la posición del interruptor selector de tipo muletilla a *ON*.
5. Revisar si el paro de emergencia se encuentra enclavado. Es posible verificar esto, si el piloto de color rojo ubicado en la parte superior del gabinete se encuentra prendiendo y apagando de manera intermitente. En caso de que esto ocurra, por favor proceda a desenclavar el pulsador al girar el hongo en sentido horario.
6. Para apagar el sistema, cambie la posición del interruptor selector a *OFF* y proceda a desconectar el cable que proporciona la alimentación.
7. En caso de emergencia, presione el pulsador Paro Emergencia ubicado en la parte inferior del gabinete, el cual se encargará de apagar inmediatamente todos los actuadores.

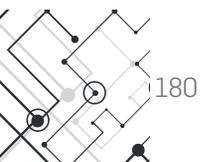
## Software Visilogic:: Interfaz de usuario

Por medio del PLC, es posible visualizar y modificar los parámetros del control PID diseñado, programar el encendido y apa-

gado de los tubos fluorescentes a una hora determinada, modificar cada cuánto tiempo se deben almacenar los datos, borrar los datos almacenados en la memoria del PLC, y además de esto, escoger si se dispone o no de un computador externo para realizar el control. Todo esto es posible gracias a los diferentes *displays* mostrados en la pantalla LCD del PLC explicados a continuación.

Inicialmente, al momento de encender el PLC se muestran 4 *displays* diferentes (ver Figura 3). El cambio entre el primero y el segundo, el segundo con el tercero y este último con el cuarto tiene una duración de 5 s cada uno. En el primero de ellos es posible visualizar el logo de la universidad Pontificia Bolivariana, luego se muestra el nombre del trabajo de grado realizado, seguido por el nombre de los estudiantes que llevaron a cabo este proyecto junto con su respectiva directora, y finalmente, se muestra el menú principal, el cuál le brinda la posibilidad al usuario de escoger entre 3 opciones diferentes. Para ingresar a cada una de ellas se debe presionar el número en el teclado que la representa.

Ya sea que el control lo realice el PLC o un computador externo, siempre se tiene cuenta el estado del detector de nivel del sistema de humidificación, el cual al momento de activarse espera 2 min para revisar su estado de nuevo, con el fin de evitar las falsas alarmas debido a la superficie irregular del agua. Inmediatamente se active el detector de nivel, aparece un nuevo



*display* intermitente (ver Figura 4) cada min con una duración de 10 s, el cual le indica al usuario que debe llenar el depósito del agua del humidificador, con el fin de poder hacer uso de este sistema. Si pasado los 2 min, el detector de nivel continúa activado, no se permite el uso de este sistema hasta que dicho detector se encuentre desactivado durante un tiempo mayor a 2 min, condición que desactiva esta alarma.

En todo momento se encuentra activada una rutina de alarma, la cual apaga inmediatamente la resistencia del sistema de

calefacción cuando la temperatura supera los 55 °C, lo que hace que aparezca en la pantalla del PLC un nuevo *display* (ver Figura 5), el cual le indica al usuario que debe esperar hasta que la temperatura en el interior del recinto sea 30 °C para volver a hacer uso de la Cámara de Ambiente Controlado. Sin embargo, en que caso de que ocurra un congelamiento del PLC, el sistema de calefacción cuenta con un interruptor límite de alta temperatura, que se encarga de desconectar y apagar la resistencia de este sistema sin importar la orden que le envíe el PLC. Mientras esta



Figura 3. Secuencia mostrada en la pantalla del PLC al momento de encenderlo.

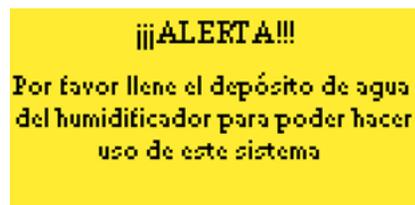


Figura 4. Mensaje de alerta relacionado con el sensor de nivel.



Figura 5. Mensaje de alerta relacionado con un aumento de temperatura por fuera de los límites permitidos.



alarma se encuentra activada, es posible visualizar la temperatura en el interior del recinto.

A continuación, se da la explicación de los *displays* asociados a cada una de las opciones dadas a conocer en el menú principal.

### 1. Menú principal. *Setup*

Es posible ingresar a esta opción al presionar el número 1 del teclado del PLC una vez que se encuentra en el menú principal.

Este *display* da a conocer 4 nuevas opciones (ver Figuras 6 y 7), a través de las cuales, el usuario tiene la posibilidad de modificar y visualizar los parámetros del control PID de temperatura diseñado, modificar la hora de encendido y apagado de los tubos fluorescentes, modificar el tiempo de muestreo definido para almacenar los datos, y finalmente, borrar los datos almacenados en la memoria del PLC. Para moverse entre las dos pantallas, en las cuales se muestran los diferentes parámetros que pueden ser modificados por el usuario, sólo debe presionarse la tecla indicada en la parte inferior derecha en cada una de ellas. Para regresar al menú principal sólo debe presionarse ESC del teclado del PLC.

#### 1.1. Opción 1. *Parámetros del controlador PID de temperatura*

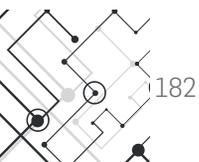
Esta opción permite visualizar o modificar los parámetros con los cuáles va a trabajar el control PID de temperatura (ver Figu-

ra 8). Sin embargo, si los desea modificar debe ingresar correctamente una contraseña, con el fin de evitar que cualquier persona no autorizada pueda realizar algún cambio que, en el peor de los casos, lleve a inestabilizar el sistema. En caso de ingresar una contraseña incorrecta se da la opción de volver a intentarlo o de regresar al menú principal. Para confirmar los nuevos valores modificados, si la contraseña ingresada es correcta, sólo debe presionar *Enter* del teclado del PLC. Para regresar al *display Setup*, se debe presionar la tecla ESC del teclado del PLC al encontrarse en la pantalla que le permite seleccionar al usuario modificar o visualizar los parámetros del control PID.

En caso de no realizar ninguna modificación, el control PID trabajará con sus valores por defecto (ver Tabla 1).

#### 1.2. Opción 2. *Encendido programado de los tubos fluorescentes*

Para modificar la hora de encendido y apagado de un par de tubos fluorescentes determinado (ver Figura 9), se debe ingresar la hora en el campo correspondiente en formato militar. Para confirmar la hora ingresada sólo debe presionarse *Enter* del teclado del PLC. Para regresar al *display Setup*, se debe presionar la tecla ESC del teclado del PLC al encontrarse en la pantalla que le permite seleccionar al usuario el tubo fluorescente cuyo encendido y apagado se va a modificar.



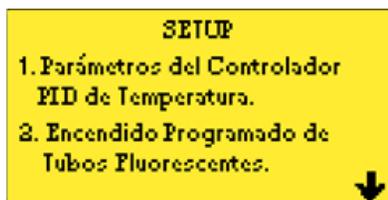


Figura 6. Setup. Opciones 1 y 2.

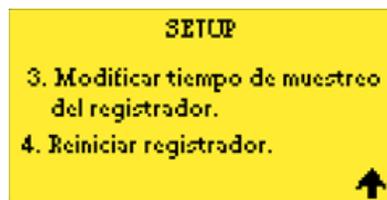


Figura 7. Setup. Opciones 3 y 4.

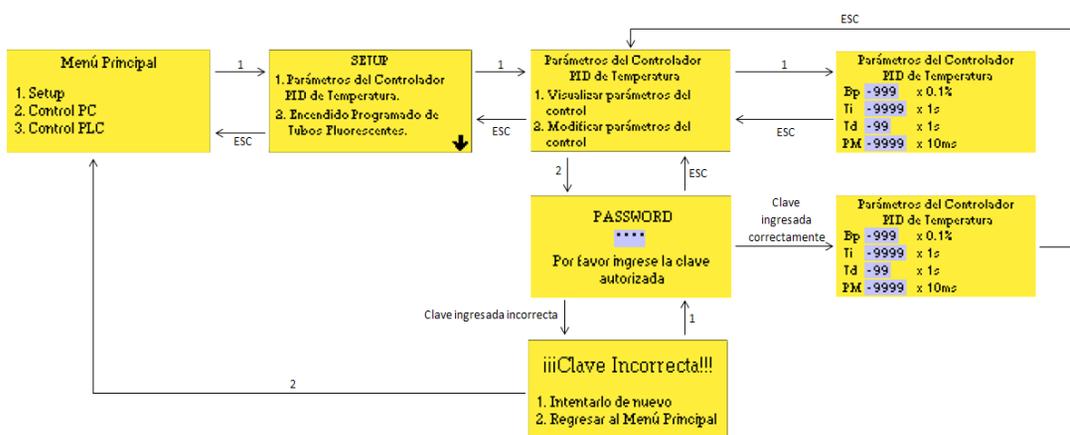


Figura 8. Secuencia de los display relacionados con la opción número 1 del display Setup.

Tabla 1. Parámetros que pueden ser modificados por el usuario del control PID de temperatura.

Registro PLC	Parámetro	Rango de valores	Valores default
MI 40	<i>BP</i>	(0-999) x (0.1 %)	800
MI 41	<i>Ti</i>	0 s - 9999 s	1693
MI 42	<i>Td</i>	0 s - 99 s	0
MI 43	Pm	(0-9999) x (10 ms)	100



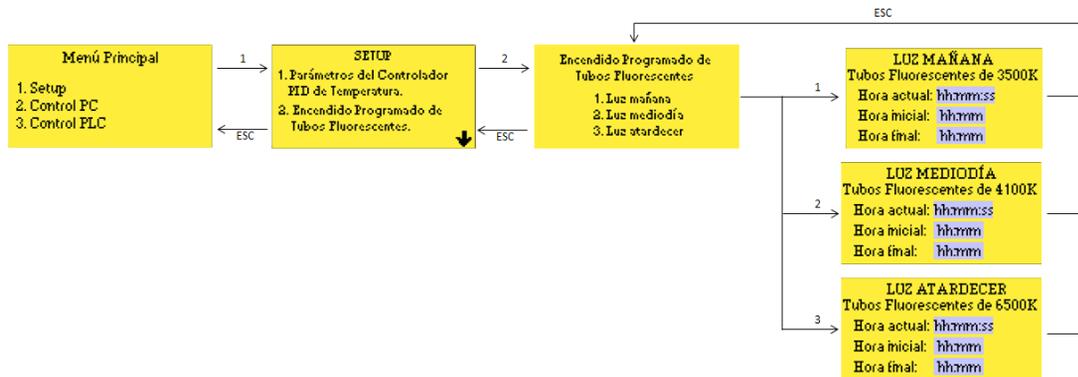


Figura 9. Secuencia de los display relacionados con la opción número 2 del display Setup.

En caso de no realizar ninguna modificación, cada par de tubos fluorescentes se encenderá y apagará a las horas definidas por defecto durante las rutina que se encarga de llevar el sistema a su punto de operación (ver Tabla 2). Una vez que dicha rutina termine de ejecutarse, es posible modificar de nuevo estos valores.

### 1.3. Opción 3.

*Registrador: tiempo de muestreo de los datos a almacenar*

Para modificar el tiempo en el que se van a registrar los datos (ver Figura 10), solo basta con ingresar el tiempo de muestreo deseado por el usuario en el campo destinado para ello. De nuevo, para confirmar el valor ingresado, se debe presionar la tecla *Enter*. Al presionar la tecla *ESC* se regresa al *display Setup*.

En caso de no realizar ninguna modificación, el tiempo de muestreo definido para

el registrador trabajará con su valor por defecto durante la rutina que se encarga de llevar el sistema a su punto de operación (ver Tabla 3). Una vez que dicha rutina termine de ejecutarse, es posible modificarlo de nuevo.

### 1.4. Opción 4.

*Registrador: borrar datos almacenados*

Vale la pena mencionar que los datos sólo son almacenados en todo momento en la memoria RAM del PLC cuando se ingresa a la opción número 3 del menú principal, es decir, cuando el control es realizado por el mismo PLC y no por medio de un computador externo. El PLC tiene la capacidad de almacenar un total de 22631 datos en total distribuidos en 7 columnas. Cada columna tiene la capacidad de registrar un total de 3233 datos, los cuales corresponden al día, la hora, la referencia de la temperatura, la temperatura en el interior del recinto, el *duty cycle* relacionado a la resistencia del

sistema de calefacción, la referencia de la humedad relativa y la humedad relativa en el interior del recinto respectivamente.

Tabla 2. Hora de encendido y apagado de los tubos fluorescentes.

Registro PLC	Parámetro	Rango de valores	Valores <i>default</i>
MI 90	Hora de encendido Luz Atardecer (tubos fluorescentes de 6500K)	00:00 - 23:59	16:00
MI 91	Hora de apagado Luz Atardecer (tubos fluorescentes de 6500K)	00:00 - 23:59	19:00
MI 92	Hora de encendido Luz Mediodía (tubos fluorescentes de 4100K)	00:00 - 23:59	11:00
MI 93	Hora de apagado Luz Mediodía (tubos fluorescentes de 4100K)	00:00 - 23:59	16:00
MI 94	Hora de encendido Luz Mañana (tubos fluorescentes de 3500K)	00:00 - 23:59	06:00
MI 95	Hora de apagado Luz Mañana (tubos fluorescentes de 3500K)	00:00 - 23:59	11:00

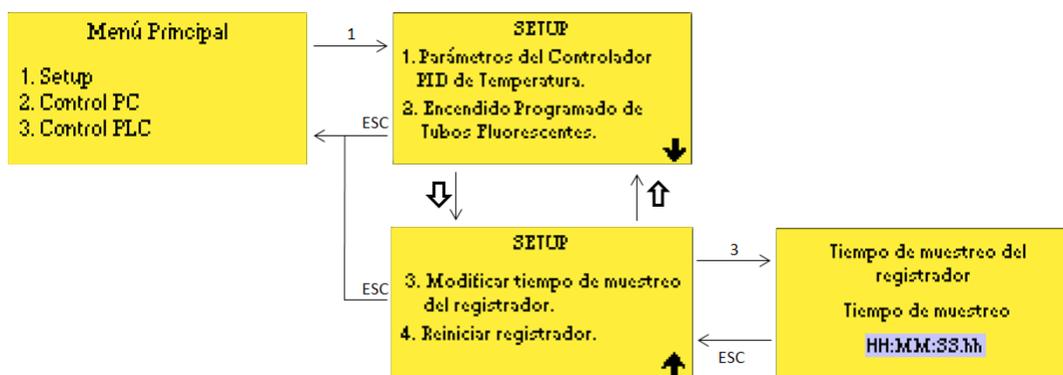


Figura 10. Secuencia de los display relacionados con la opción número 3 del display Setup.



Tabla 3. Tiempo de muestreo del registrador.

Registro PLC	Parámetro	Rango de valores	Valores <i>default</i>
TD5	Tiempo de muestreo del registrador	99:99:99.99	00:00:15.00

Si desea eliminar los datos almacenados en la memoria RAM del PLC (ver Figura 11), sólo basta con ingresar a la opción número 4 dada a conocer por medio del par de *displays* conocidos como *Setup*. Al ingresar a esta opción se le pregunta al usuario por medio de una nueva pantalla si está de eliminar los datos almacenados en el PLC hasta el momento, ya que si dicha información llega a ser eliminada no hay forma de recuperarla. En esta pantalla, al presionar la tecla número 2 del teclado del PLC se regresa al menú principal. En caso de haber eliminado los datos, sólo es necesario presionar la tecla ESC para regresar al menú principal, tal cual como se indica en el *display* que se encarga de confirmarle al usuario que los datos ya han sido eliminados.

## 2. Menú principal. Control PC

Para ingresar a esta opción sólo se debe presionar el número 2 del teclado del PLC en el menú principal (ver Figura 12). En este caso, el control de la temperatura y la humedad relativa es realizado por medio de un computador externo, el cual se encarga de modificar unos registros determinados del PLC. El PLC funciona como un

intermediario entre los diferentes actuadores y el computador externo.

Inicialmente, se le recuerda al usuario que debe modificar el valor de la referencia de la humedad relativa y la hora de encendido y apagado de los tubos fluorescentes. En caso de no realizar ninguna modificación, estos parámetros trabajarán con sus valores por defecto.

Los datos tomados durante una prueba determinada pueden ser descargados al computador en un archivo de Excel, con la ayuda de *LabVIEW®*, el *software* encargado de realizar el control en el computador.

Si desea regresar al menú principal debe parar el funcionamiento de la máquina, ya sea presionando el pulsador de Paro o de Paro Emergencia. Es posible regresar al menú principal una vez que la máquina ha dejado de funcionar al momento de presionar ESC del teclado del PLC.

Por favor remitirse al Manual de Operación de una Cámara de Ambiente Controlado, con el fin de conocer en detalle la interfaz de usuario diseñada en el *software LabVIEW®* para realizar el control por medio de un computador externo.

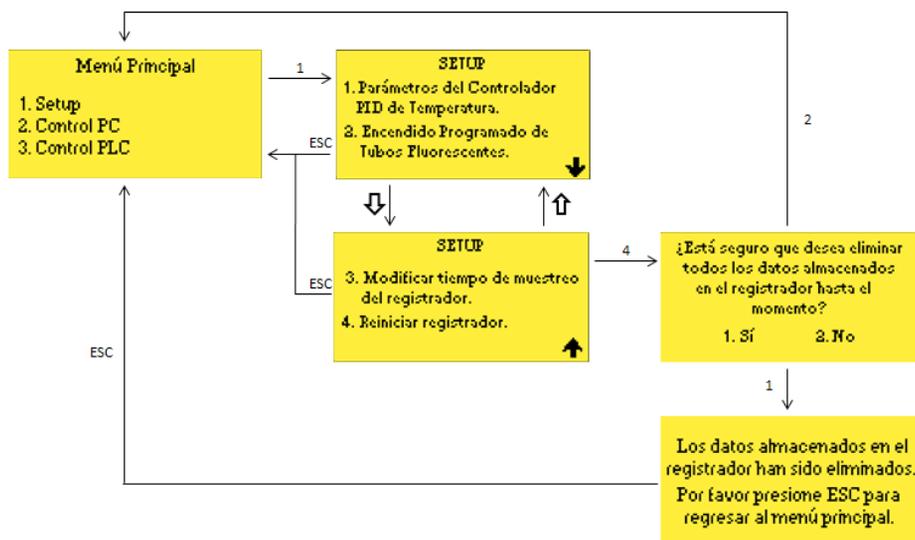


Figura 11. Secuencia de los display relacionados con la opción número 4 del display Setup.

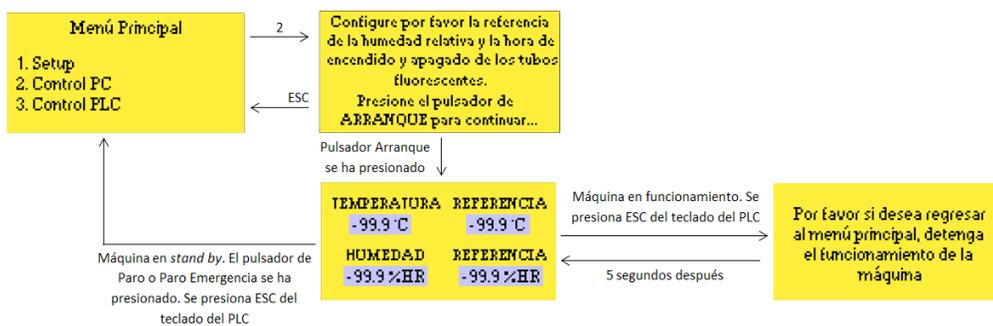


Figura 12. Secuencia de los display relacionados con la opción número 2 del menú principal.



### 3. Menú principal. Control PLC

Con sólo presionar el número 3 en el menú principal, es posible ingresar a esta última opción (ver Figura 13). En este caso, el control de la temperatura y de la humedad relativa en el interior del recinto es realizado por el PLC. No es necesario utilizar un computador externo para garantizar unas condiciones determinadas en el interior del recinto.

Al presionar el pulsador de arranque, se ejecuta una rutina que se encarga de llevar el sistema a su punto de operación, la cual no permite modificar ningún parámetro por el usuario mientras se encuentra en funcionamiento, sólo cuando dicha rutina termine de ejecutarse es posible modificar los valores de la referencia de la humedad relativa y de la temperatura (ver Tabla 4), la hora de encendido y apagado de los tubos fluorescentes y el tiempo de muestreo del registrador. Esta rutina de inicialización trabaja con un valor de 30 °C para la referencia de la temperatura.

Cuando el sistema se encuentra alrededor de su punto de operación, aparece un nuevo *display*, el cual le informa al usuario que es posible modificar los parámetros mencionados inicialmente al presionar la tecla F1 del teclado del PLC, sin embargo, dichas modificaciones sólo pueden ser llevadas a cabo después de 1 min, tiempo en el que se visualiza dicho mensaje. Pasado el min, aparece un *display* que le permite

visualizar al usuario los valores actuales de temperatura y de humedad relativa en el interior del recinto, junto con su respectiva referencia. En esta parte, es posible modificar el tiempo de muestreo del registrador, la hora de encendido y apagado de los tubos fluorescentes y la referencia de la temperatura y de la humedad relativa al presionar la tecla F1 del teclado del PLC (ver Figuras 14, 15 y 16). Al modificar algún parámetro, para confirmar el valor ingresado se debe presionar *Enter* del teclado del PLC. Para moverse entre las pantallas que muestran las opciones de los diferentes parámetros a modificar se debe presionar la tecla indicada en la parte inferior derecha en cada una de ellas.

La fecha, la hora, el valor del *duty cycle* del PWM de la resistencia del sistema de calefacción, la temperatura y la humedad actual en el interior del recinto, junto con su respectiva referencia, son valores que son almacenados en una tabla, la cual puede ser descargada en un computador externo en un archivo de Excel, gracias a la ayuda del *software DataXport*<sup>®</sup>, programa incluido en el *software* gratuito proporcionado por Unitronics. El tiempo que se demora en tomar cada uno de los datos puede ser configurado por el propio usuario.

Si la tabla donde se almacenan los datos se llena, un nuevo *display* intermitente con una duración de 10 s le informa al usuario que debe descargar los datos (ver Figura 17). Al presionar F2, los valores de la tabla

se reinician, lo que permite que nuevos datos puedan ser almacenados, sin importar si estos han sido o no descargados.

Si desea regresar al menú principal debe parar el funcionamiento de la máquina, ya sea presionando el pulsador de Paro o de Paro Emergencia. Es posible regresar al menú principal una vez que la máquina ha dejado de funcionar al momento de presionar ESC del teclado del PLC.

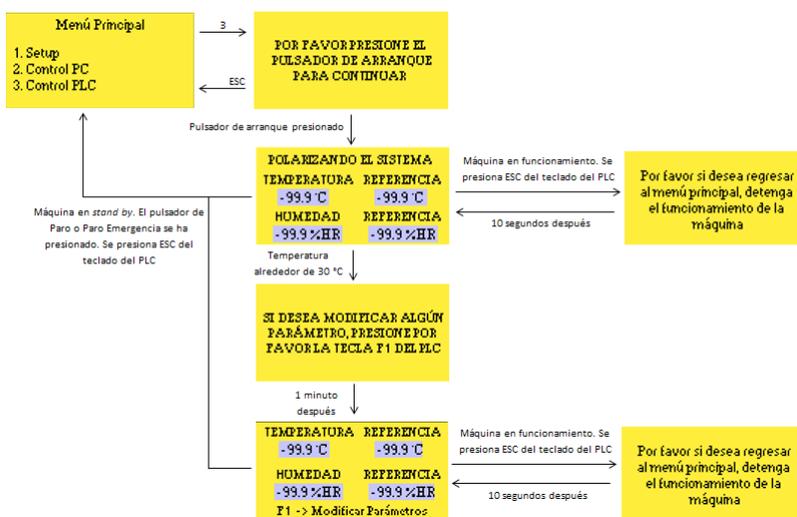


Figura 13. Secuencia general de los display relacionados con la opción número 3 del menú principal.

Tabla 4. Referencia de la humedad relativa y la temperatura.

Registro PLC	Parámetro	Rango de valores	Valores default
MI 88	Referencia humedad relativa	40 %HR - 60% HR	50 %HR
MI 89	Referencia temperatura	17 °C - 47 °C	30 °C



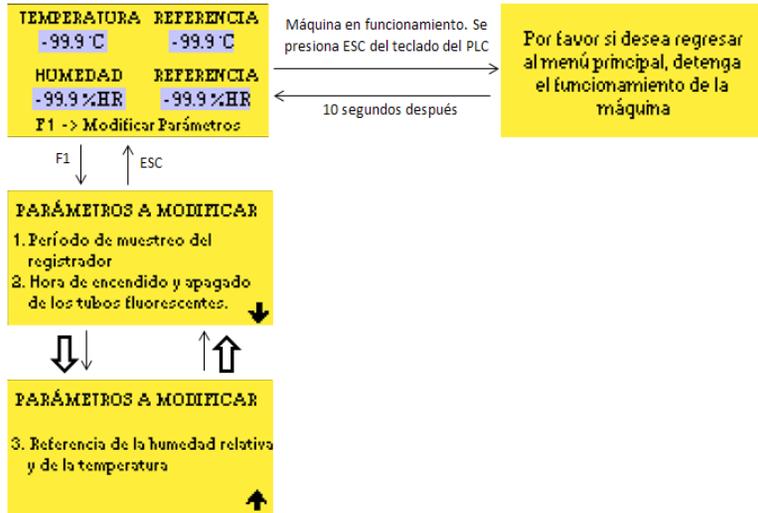


Figura 14. Opciones parámetros a modificar.

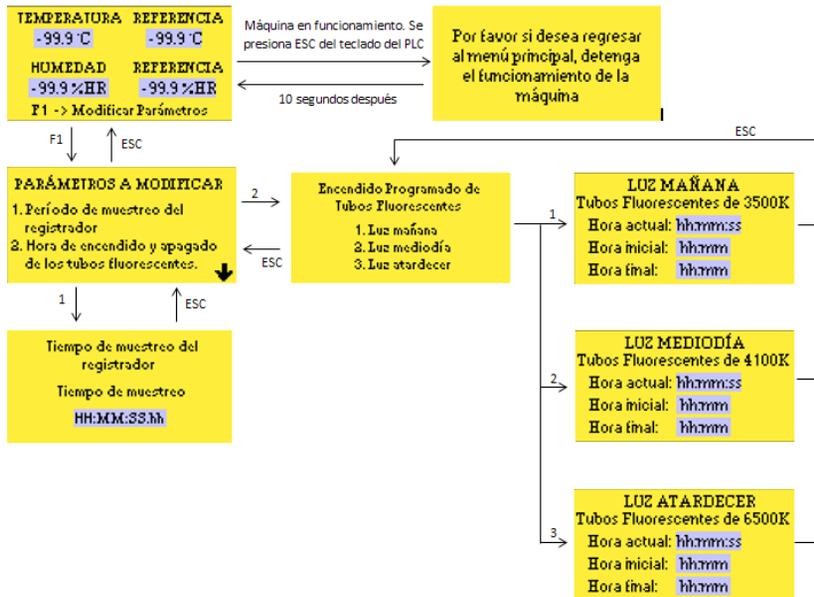


Figura 15. Secuencia de los display para modificar parámetros al encontrarse el sistema cercano a su punto de operación. Opciones 1 y 2.

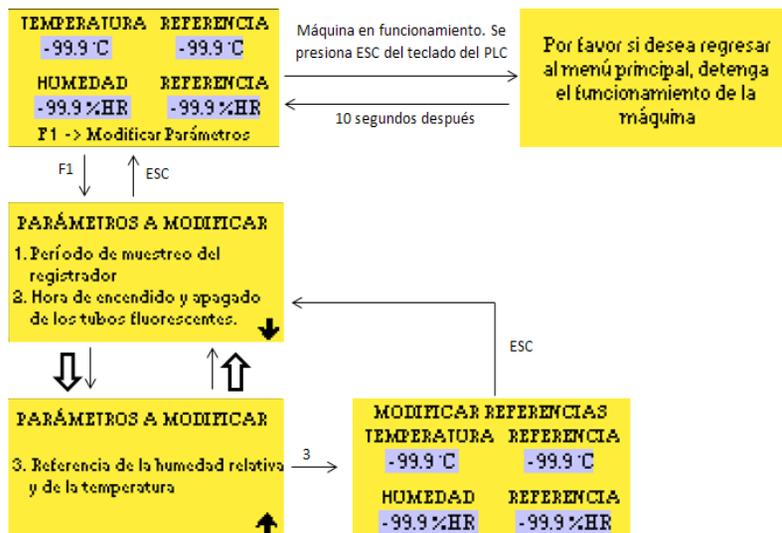


Figura 16. Secuencia de los display para modificar parámetros al encontrarse el sistema cercano a su punto de operación. Opción 3.

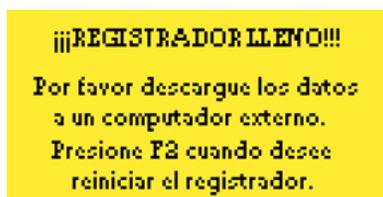


Figura 17. Alerta registrador lleno.



## Configuración: *DataXport*

*DataXport* permite almacenar los datos de una o varias *Data Tables* de uno o varios PLC Unitronics.

*DataXport* permite:

- Almacenar los datos de acuerdo a una fecha y hora determinada.
- Simultáneamente descargar datos de más de un PLC Unitronics.
- Acceder a un PLC por medio de una comunicación directa (Serial), de red, Ethernet o por medio de un modem.
- Almacenar los datos a los cuales se accede en cada sesión en un archivo de Excel y automáticamente enviarlo a un correo electrónico al final de la sesión.

Para crear un nuevo proyecto en *DataXport*, en primer lugar se debe definir la ruta en donde se van a aguardar los archivos descargados y los parámetros mencionados a continuación. Gracias a estos últimos, es posible determinar cuándo se descargan los datos, cuáles datos se deben descargar y a cuál PLC se debe acceder. El *Site list* reúne todo esto. En la Figura 18 es posible observar el ambiente de trabajo utilizado por *DataXport*.



Figura 18. DataXport. Ambiente de trabajo.

## 1. Ruta de archivos a guardar

Seleccionar *Excel/.csv File Properties...* en el menú *Project*. Se abre una nueva ventana, la cual permite seleccionar la ruta del computador en donde se desea que se guarden los archivos próximos a descargar (ver Figura 19). En caso de trabajar con varios PLCs, es posible crear un *folder* para cada *PLC Site* definido al seleccionar la última opción *Create separate folder for each PLC Site*. Finalmente hacer clic en *OK* para regresar a la ventana principal llamada *DataXport [Design]*.

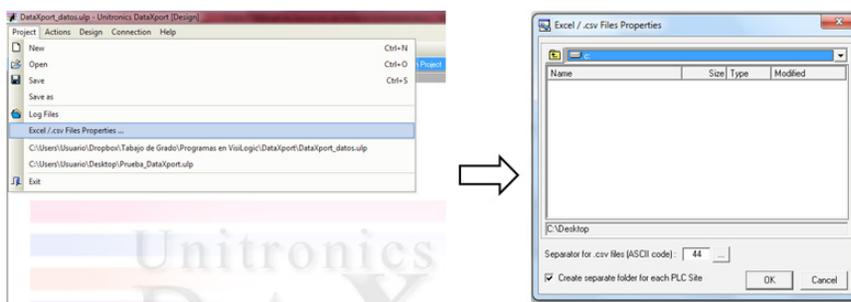


Figura 19. Definir ruta de archivos a guardar.

## 2. Schedule

Este parámetro determina cuándo se descargan los datos almacenados en el PLC. Para configurarlo (ver Figura 20) se debe realizar lo siguiente:

- Seleccionar *Schedules* del menú *Design*.
- Hacer clic en *ADD* con el fin de crear un nuevo *Schedule*. Hacer clic en *Edit* o un doble clic en un *Schedule* ya definido para modificarlo. La ventana *Schedule* se abre.

Realice las modificaciones que desee con el fin de crear una rutina para descargar los datos periódicamente. Para finalizar, haga un clic en *OK* y agregue el *Schedule* recién creado o modificado a la lista. Luego, hacer un clic en *Close* para regresar a la ventana principal *DataXport [Design]*.



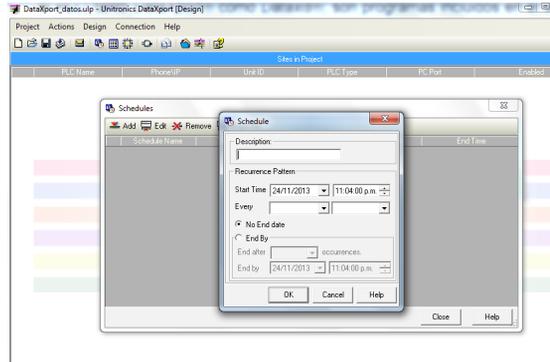


Figura 20. Configuración Schedule.

### 3. Tables. Vision Data Tables

Este parámetro determina la tabla a descargar del PLC. Si el proyecto incluye más de un PLC y las *Data Tables* en ellos son las mismas, no es necesario importarlas de cada PLC. Importar *Data Tables* innecesarias hacen que el proyecto sea más pesado.

Para configurar este parámetro se debe realizar lo siguiente:

- a. Importar la estructura de la tabla a almacenar del PLC (ver Figura 21). Este proceso se puede hacer por medio de una conexión directa (serial), por medio de un modem, Ethernet o CANbus/RS-485.

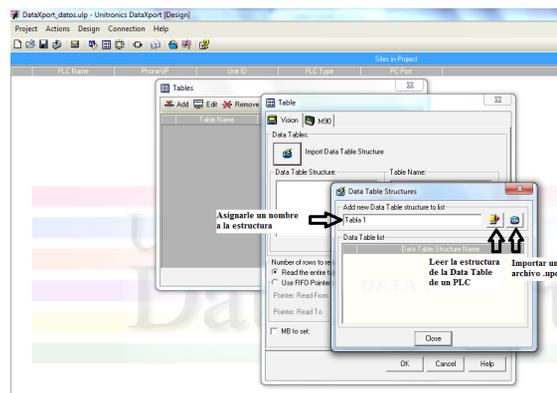


Figura 21. DataXport. Importar la estructura de la tabla.

- Seleccionar *Tables* del menú *Design*.
  - Hacer un clic en el botón *Import Data Table Structure*.
  - Darle un nombre a la estructura de la *Data Table* a importar. No necesariamente debe de tener el mismo nombre de la tabla. Luego, se debe hacer un clic en *Read from PLC* o en *Import file from Visilogic (upd File)*. Si la comunicación con el PLC no se encuentra activa al momento de hacer clic en la primera opción, no será posible importar la estructura de la *Data Table*. En caso de seleccionar la segunda opción, se debe realizar lo siguiente:
    - En Visilogic: Seleccionar la tabla cuya estructura se desea importar.
    - En Visilogic: Seleccionar la opción *Exportar a archivo* del menú *Archivo* en la ventana llamada *Data Tables*.
    - En Visilogic: Seleccionar el lugar donde lo desea guardar. Hacer clic en *Guardar*.
    - En *DataXport*: Al hacer clic en el botón *Import file from Visilogic (upd File)* sólo se debe seleccionar el archivo que se acabó de exportar de Visilogic.
- b. Una vez que se hayan importado las diferentes *Data Tables* del PLC, éstas aparecen en un listado en el campo al lado izquierdo llamado *Data Table Structure*. Al seleccionar una de ellas aparece el nombre de la tabla en el campo al lado derecho llamado *Table Name*. Si se desea leer toda la tabla durante una sesión, como es en este caso, se debe seleccionar la opción *Read the entire table*, la cual se encuentra ubicada en el campo *Number of rows to read* (ver Figura 22). Si se desea leer un número de filas determinadas se debe seleccionar, en el mismo campo anterior, la opción *Use FIFO Pointers*.

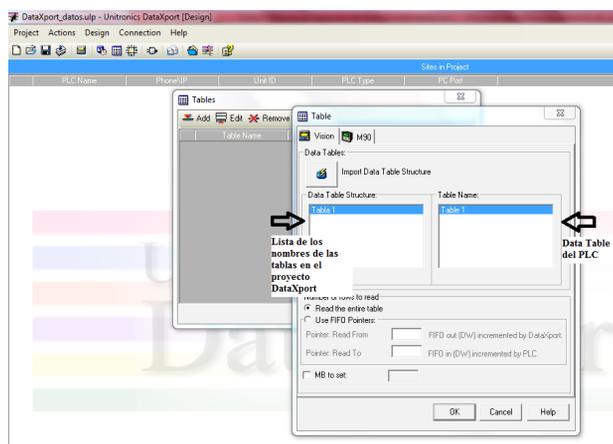


Figura 22. DataXport. Tablas importadas.



- c. hacer clic en la opción *OK* ubicada en la parte inferior para regresar a la ventana *tables*.
- d. Finalmente, en la ventana *tables*, hacer clic en *Close* para regresar a la ventana principal *DataXport [Design]*.

#### 4. PC Port

Los puertos determinan los parámetros del enlace de comunicación que es utilizado por el PLC cuando se encuentra en funcionamiento *DataXport*, con el fin de acceder satisfactoriamente al PLC y poder descargar los datos almacenados en una tabla determinada.

- a. Seleccionar *PC Ports* del menú *Design*. La ventana *PC Ports* se abre.
- b. Hacer doble clic en una línea para abrir la configuración de un puerto determinado del computador. En este caso, seleccionar el puerto del computador al cuál se encuentra conectado el PLC y dejar las opciones que aparecen por defecto cuando se abra la ventana de configuración, ya que se está trabajando con serial (ver Figura 23).

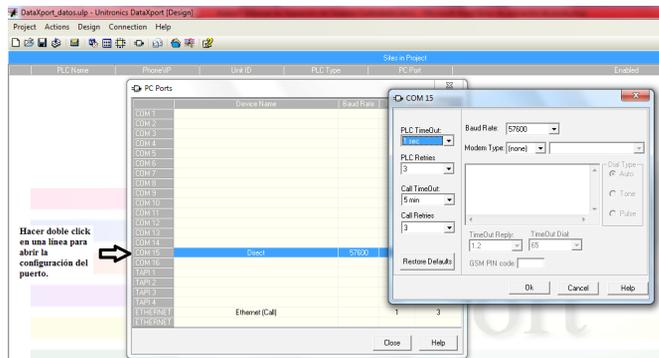


Figura 23. Configuración de los puertos.

## 5. Site List

Al haber definido los puertos, se procede a crear el *Site List* (ver Figura 24):

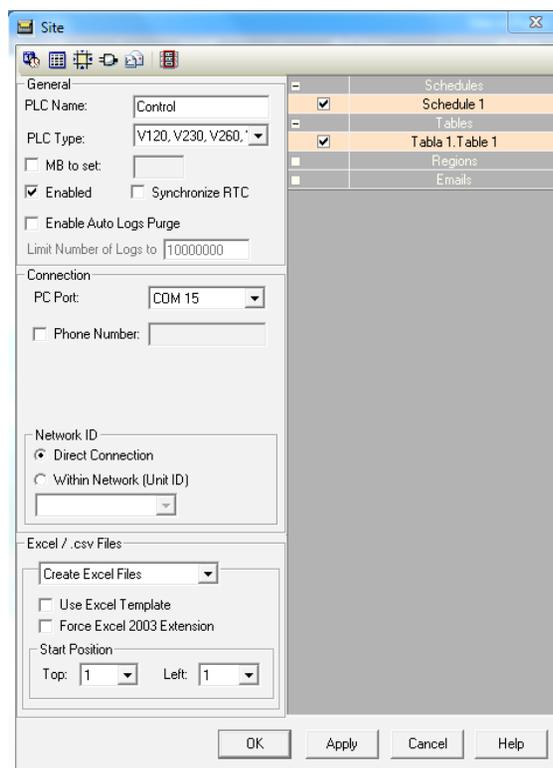
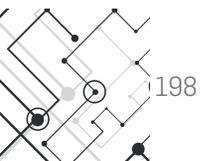


Figura 24. Configuración del Site.

- Seleccionar *Add Site* del menú *Design*. La ventana *Site* se abre.
- En el panel izquierdo, sección *General*, ingresar el nombre del PLC en el campo llamado *PLC Name*. El nombre del PLC debe de ser exactamente el mismo al asignado en la aplicación *Ladder* del controlador por medio del bloque de funciones *Set PLC Name*. En este caso, ingresar *Control*.



- c. En el panel izquierdo, sección *General*, ingresar el tipo de PLC con el que se está trabajando, en el campo llamado *PLC Type*. En este caso, seleccionar la opción que incluye V230.
- d. Los campos *MB to set*, *Enabled*, *Synchronize RTC* y *Enable Auto Logs Purge* se pueden dejar con sus valores por defecto. En este caso, no es necesario realizar ninguna modificación.
- e. El campo *MB to set* permite seleccionar un específico MB (*Memory Bit*) del PLC, el cual se enciende cuando se accede al PLC.
- f. *Enabled* es seleccionado si el computador incluye la configuración realizada de este *Site* en específico cuando el proyecto del *DataXport* se está ejecutando. Si *Enabled* no es seleccionado, no se tendrá acceso a los datos del PLC definido, aunque éste aún aparezca en el proyecto.
- g. En el panel izquierdo, sección *Connection*, ingresar el puerto del computador definido anteriormente en el campo llamado *PC Port*.
- h. En el panel izquierdo, sección *Network ID*, dejar seleccionada la opción *Direct Connection*. En el campo *Within Network (Unit ID)* es posible seleccionar CanBus o RS-485 si se está trabajando con una de ellas, lo que no aplica en este caso.
- i. En el panel izquierdo, sección *Excel/.cvs Files*, seleccionar *Create Excel Files*. Gracias a esto, los datos almacenados en una tabla determinada del PLC son exportados a un archivo de Excel.  
Si se dispone de una plantilla en Excel, es posible utilizarla al realizar los siguientes pasos:
  - Seleccionar *Use Excel Template*.
  - Guardar el archivo de Excel que contiene la plantilla en el *folder* `:::\DataXport\Excel Templates`. El nombre de la plantilla a utilizar debe ser el mismo nombre del PLC denifido en la configuración del *Site*.Es posible modificar la ubicación en donde se comienzan a almacenar los datos, al modificar los campos llamados *Top* y *Left* de la sección *Start Position*.  
En este caso dejar los valores que aparecen por defecto.



- j. En el panel derecho, seleccionar los parámetros de las opciones *Schedules*, *Tables*, *Regions* y *Emails*, parámetros que ya deben de haber sido definidos en el proyecto.
- k. Estas 4 opciones son globales para todo el proyecto creado de *DataXport*. Se pueden enlazar a cualquier módulo con cualquier número de *Sites*.
- l. Se debe agregar al menos los parámetros de las opciones *Schedules* y *Tables* o *Regions* para poder finalizar correctamente la configuración del *Site*.

Finalmente, hacer clic en *OK* para regresar a la ventana de *DataXport [design]*, en donde debe aparecer en una lista el PLC recién configurado (Ver Figura 25). Cuando la lista esté completa, en caso de que trate de más de un PLC, guardar y darle un nombre al proyecto. Se debe configurar un *Site* para cada PLC.

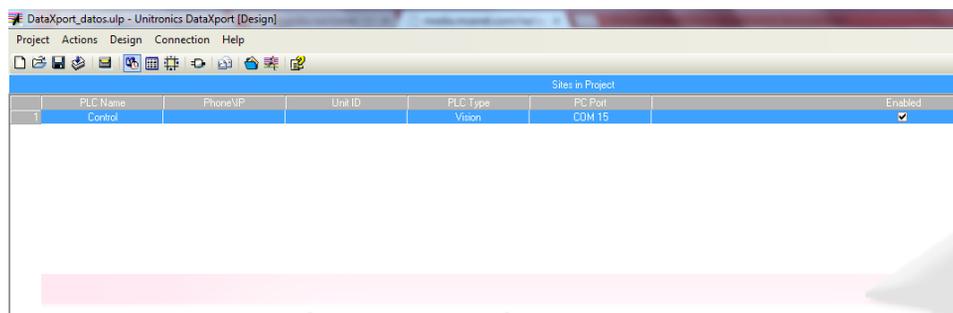


Figura 25. PLC configurado.

Para editar los parámetros de un PLC que ya se encuentra en la lista, se debe hacer un doble clic en la línea en la cual se encuentra ubicado el PLC a modificar para abrir su respectivo *Site* a editar.

## 6. Revisar el proyecto

Cuando el proyecto esté listo, seleccionar *Check* del menú *Actions* para verificar que no tenga ningún error. Luego de corregir los errores, es posible ejecutar el proyecto.



## 7. Ejecutar un proyecto de *DataXport*

La opción *Run* que se encarga de ejecutar el proyecto se encuentra ubicada en el menú *Actions*.

Al Seleccionar *Run*, *DataXport* comenzará a exportar los datos solicitados de las *Data Tables* del PLC, por medio de los puertos definidos y de acuerdo al horario establecido en la opción *Schedules* (ver Figura 26).

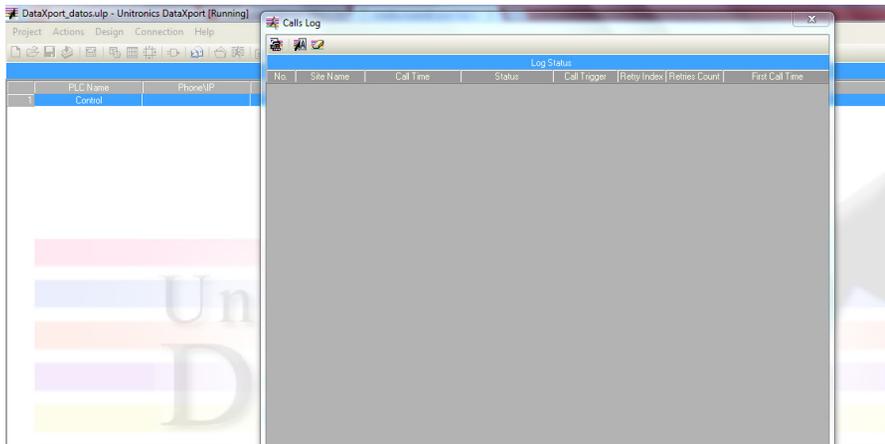
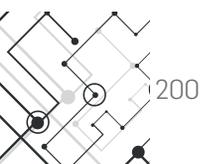


Figura 26. Ejecutar un proyecto.

Es posible que el proyecto al momento de abrirse se ejecute automáticamente al seleccionar la opción *Run Project when opened* del menú *Actions* (ver Figura 27).

Para descargar los datos de un PLC determinado no se debe esperar a que se cumpla un horario determinado, ya que es posible forzar esta descarga al seleccionar *Run Project* y luego hacer clic en el botón *Force Call* (ver Figura 28).



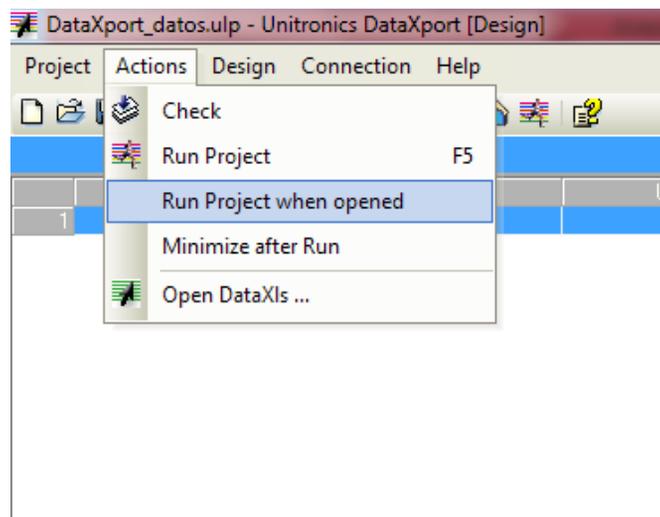


Figura 27. Ejecutar un proyecto al abrirse automáticamente.

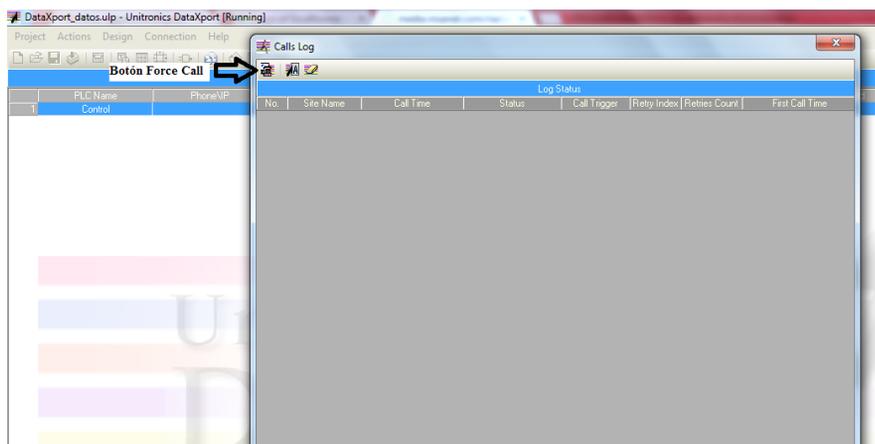
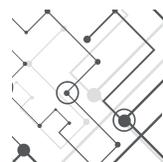


Figura 28. Botón Force Call.



## Software LabVIEW®: Interfaz de usuario

El *software* de control (interfaz de usuario) realizado para efectuar el control PID desde el PC fue llevado a cabo en *LabVIEW*®, en donde se implementó una rutina que permitiera la conexión entre el PLC y el PC a través del protocolo de comunicación Modbus RTU y posteriormente se llevó a cabo el control PID previamente diseñado y simulado en *MATLAB*®. Para que este control pudiera efectuar de manera correcta las acciones necesarias para controlar la variable de interés, la cual es la temperatura, se realizaron cada una de las acciones de control (Proporcional, Integral y Derivativa) de manera minuciosa, de tal forma que al proceder a ejecutarlo en la cámara ya acondicionada tuviera un comportamiento óptimo. Para el control de la humedad relativa se implementó un control *ON-OFF* y para el control de la iluminación se efectuó una interfaz que permitiera configurar y visualizar las horas en las que se deseen encender y apagar las lámparas fluorescentes; estos dos controles se efectuaron también en *LabVIEW*®. El *software* de control implementado en *LabVIEW*®, requirió de la lectura (ver Tabla 5) y escritura (ver Tabla 6) de unos registros utilizados tanto en el PC como en el PLC, para así realizar los cálculos respectivos y ejecutar la acción de control necesaria para mantener los valores deseados de temperatura, humedad y luz.

Tabla 5. Registros del PLC leídos por el PC.

Registro PLC	Parámetro
MI 48	Lectura de temperatura del sensor
MI 49	Lectura de la humedad relativa del sensor
MI 50	<i>Duty cycle</i> del PWM de la resistencia calefacción
MI 51	Estado del sistema de ventilación
MI 52	Estado del sistema de refrigeración
MI 53	Estado del sistema de calefacción
MI 54	Estado del sistema de humidificación
MI 55	Estado de los tubos fluorescentes de 6500K (Luz Atardecer)
MI 56	Estado de los tubos fluorescentes de 4100K (Luz Mediodía)
MI 57	Estado de los tubos fluorescentes de 3500K (Luz Mañana)

Tabla 6. Registros del PC escritos al PLC.

Registro PLC	Parámetro	Rango de valores	Valores default
MI 87	Duty cycle del PWM de la resistencia calefacción	0 - 800	0
MI 88	Referencia humedad relativa	40 %HR - 60% HR	50 %HR
MI 89	Referencia temperatura	17 °C - 47 °C	30 °C
MI 90	Hora de encendido de los tubos fluorescentes de 6500K (Luz Atardecer)	00:00 - 23:59	16:00
MI 91	Hora de apagado de los tubos fluorescentes de 6500K (Luz Atardecer)	00:00 - 23:59	19:00
MI 92	Hora de encendido de los tubos fluorescentes de 4100K (Luz Mediodía)	00:00 - 23:59	11:00
MI 93	Hora de apagado de los tubos fluorescentes de 4100K (Luz Mediodía)	00:00 - 23:59	16:00
MI 94	Hora de encendido de los tubos fluorescentes de 3500K (Luz Mañana)	00:00 - 23:59	06:00
MI 95	Hora de apagado de los tubos fluorescentes de 3500K (Luz Mañana)	00:00 - 23:59	11:00

## 1. Menú Control PID Temperatura

Este menú es catalogado como el menú principal de la aplicación (ver Figura 29), ya que en este se visualiza el comportamiento del control PID que realiza su acción sobre la temperatura (con un rango de actuación entre 17 °C y 47 °C) de la Cámara de Ambiente Controlado.

1. En esta zona se encuentran los indicadores numéricos que muestran el valor que arroja el control PID de temperatura y que posteriormente es escrito en el PLC (indicador: Control), el valor del *duty cycle* leído desde el PLC con el fin de saber qué valor se está escribiendo (indicador: *Duty Cycle* (0.1 %)) y el valor del error del control PID (indicador: Error).



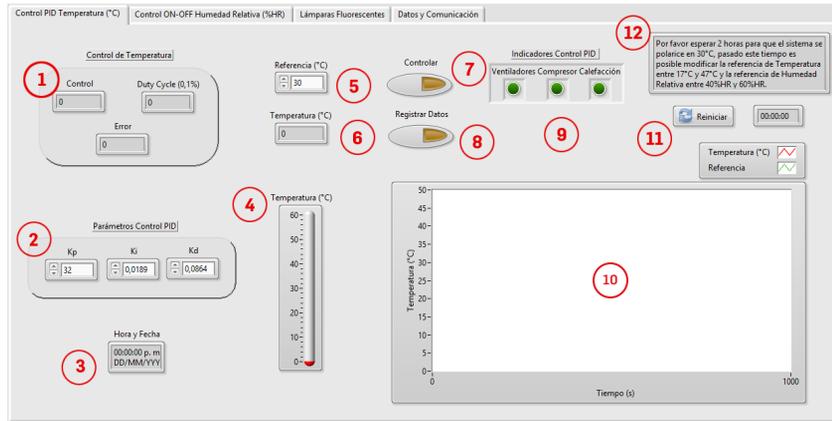


Figura 29. Menú Control PID Temperatura (°C).

2. En esta parte se encuentran tres indicadores numéricos de incremento y decremento, en donde se configuran las constantes que tienen que ver con las acciones que aplica el control: acción proporcional, acción integral y acción derivativa (indicadores: Kp, Ki, Kd).
3. En este indicador se visualiza la hora y fecha actual.
4. Termómetro que indica la temperatura de la Cámara de Ambiente Controlado leída desde el PLC.
5. En este indicador numérico (Referencia (°C)) de incremento y decremento se puede configurar, entre 17 °C y 47 °C (valor por defecto 30 °C), el valor deseado o referencia de temperatura que se desea en la Cámara de Ambiente Controlado.
6. En este indicador numérico se observa el valor actual de temperatura de la Cámara de Ambiente Controlado.
7. Con el botón Controlar se decide en que momento desea el usuario aplicar la acción del control PID de temperatura.
8. Con el botón Registrar Datos se decide en qué momento se quieren registrar los datos que influyen en el control, los cuales son: el *duty cycle* del control PID, la temperatura actual, la referencia de temperatura, la humedad relativa actual y la referencia de la humedad relativa, además de esto se registran los datos de fecha y hora.

9. En esta zona se observan en qué estado (encendido/apagado) se encuentran los actuadores que influyen en el control PID, los cuales son la ventilación, el compresor y la calefacción.
10. En esta gráfica se observa el comportamiento de la variable controlada (temperatura) y de la referencia escogida por el usuario.
11. Cronómetro (indicador numérico) que contabiliza el tiempo suficiente (2 h) para que el sistema se polarice, además de esto tiene un botón con el cual se puede reiniciar la cuenta.
12. Mensaje que indica el tiempo de polarización, en donde se advierte que no se deben modificar los valores por defecto de la humedad relativa (la HR se puede modificar antes de polarizar o después de polarizar) y la temperatura durante ese tiempo.

## 2. Menú Control *ON-OFF* Humedad Relativa

En este menú (ver Figura 30) se observa el comportamiento del control *ON-OFF* de humedad relativa (con un rango de actuación entre 40 %HR y 60 %HR).

1. En este indicador se visualiza en qué estado (encendido/apagado) se encuentra el nebulizador de la Cámara de Ambiente Controlado.

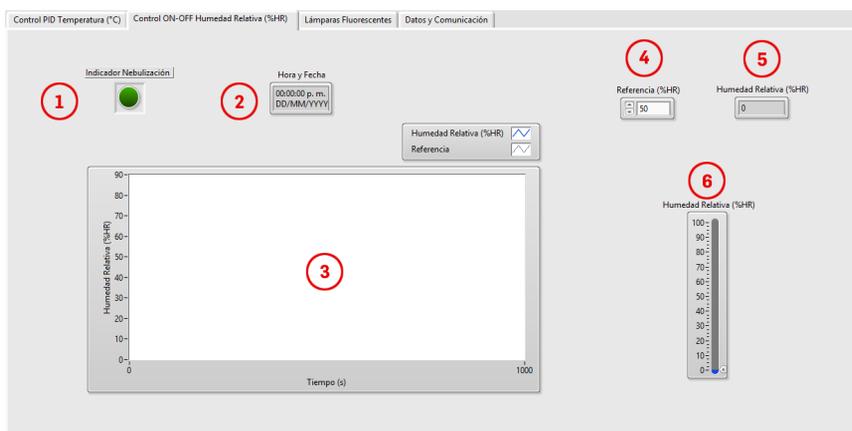


Figura 30. Menú Control ON-OFF Humedad Relativa (%HR).



2. En este indicador se visualiza la hora y fecha actual.
3. En esta gráfica se observa el comportamiento de la variable controlada (humedad relativa) por el control *ON-OFF* y la referencia escogida por el usuario.
4. En este indicador numérico (Referencia (%HR)) de incremento y decremento se puede configurar, entre 40 %HR y 60 %HR (valor por defecto 50 %HR), el valor deseado o referencia de humedad relativa que se desea en la Cámara de Ambiente Controlado.
5. En este indicador numérico se observa el valor actual de humedad relativa (%HR) de la Cámara de Ambiente Controlado.
6. Medidor que indica el porcentaje de humedad relativa (%HR) en la Cámara de Ambiente Controlado leída desde el PLC.

### 3. Menú Lámparas Fluorescentes

En este menú se configura el encendido y apagado de las lámparas fluorescentes (ver Figura 31) para que en el día pueda simularse el ciclo del sol dentro de la Cámara de Ambiente Controlado.

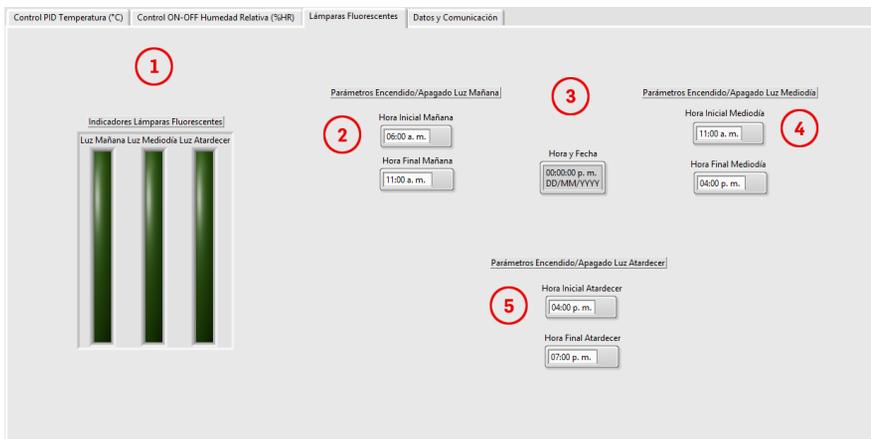


Figura 31. Menú Lámparas Fluorescentes.

1. En esta zona se visualiza el estado (encendido/apagado) de las lámparas fluorescentes de Luz Mañana, Luz Mediodía y Luz Atardecer.
2. En estos indicadores de hora se configura la hora de encendido y hora de apagado de las lámparas fluorescentes de Luz Mañana.
3. En este indicador se visualiza la hora y fecha actual.
4. En estos indicadores de hora se configura la hora de encendido y hora de apagado de las lámparas fluorescentes de Luz Mediodía.
5. En estos indicadores de hora se configura la hora de encendido y hora de apagado de las lámparas fluorescentes de Luz Atardecer.

## 4. Menú Datos y Comunicación

En este menú (ver Figura 32) se realizan las respectivas configuraciones para comunicar al PC con el PLC a través del protocolo de comunicación Modbus sobre RS-232, además se controla la ejecución de la aplicación, se especifica la ruta y nombre del archivo de datos adecuados y se observa el tiempo de muestreo de la aplicación.

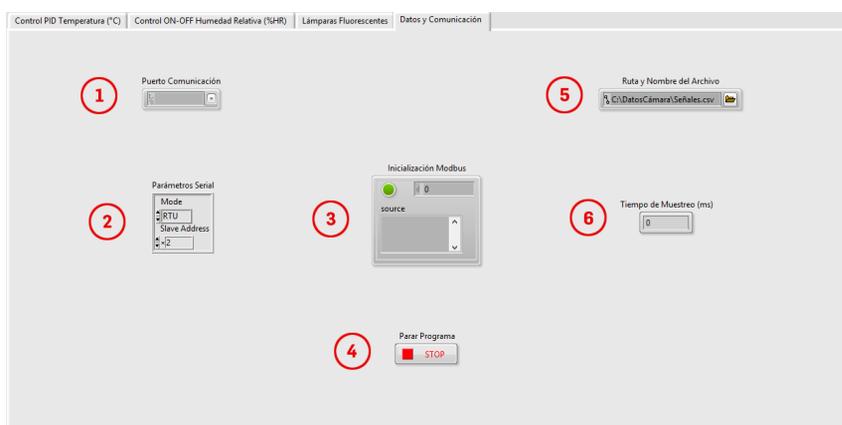


Figura 32. Menú Datos y Comunicación.



1. En este apartado se configura el puerto de comunicación adecuado para la conexión apropiada entre el PC y el PLC.
2. En esta zona se configura el modo de transmisión del protocolo Modbus (RTU o ASCII) y la dirección del esclavo (PLC), en el caso de esta aplicación el modo de transmisión es RTU y la dirección del esclavo (*Slave Address*) es 2, valores que se encuentran por defecto.
3. En este apartado se visualiza el estado de inicialización del protocolo de comunicación Modbus, si la comunicación se establece el indicador se pone de color verde, de lo contrario se pone de color rojo.
4. Con el botón Parar Programa se detiene la ejecución de la aplicación.
5. En este apartado se configura la ruta en donde se va a almacenar el archivo .csv que contiene el registro de datos del *duty cycle* del control PID, de la temperatura actual, de la referencia de temperatura, de la humedad relativa actual y de la referencia de la humedad relativa, además de esto se registran los datos de fecha y hora. Para la correcta configuración de esta ruta se debe crear en la unidad de disco duro raíz, en este caso C, una carpeta llamada DatosCámara y el nombre del archivo con su extensión, en este caso, Señales.csv.
6. En este indicador numérico se visualiza el tiempo de muestreo, en milisegundos, de la aplicación.

**Nota:** Al abrir el ejecutable generado en *LabVIEW*<sup>®</sup> se debe configurar el puerto de comunicación COM del PC para establecer comunicación con el PLC y se debe configurar la ruta y el nombre del archivo de datos (esto se realiza en la pestaña Datos y Comunicación). Al realizar lo anterior se puede proceder a presionar la flecha de color blanco que tiene la punta hacia la derecha y que se encuentra en la parte superior izquierda de la pantalla (ver Figura 33), esta flecha permite poner en estado de ejecución el *software* implementado.

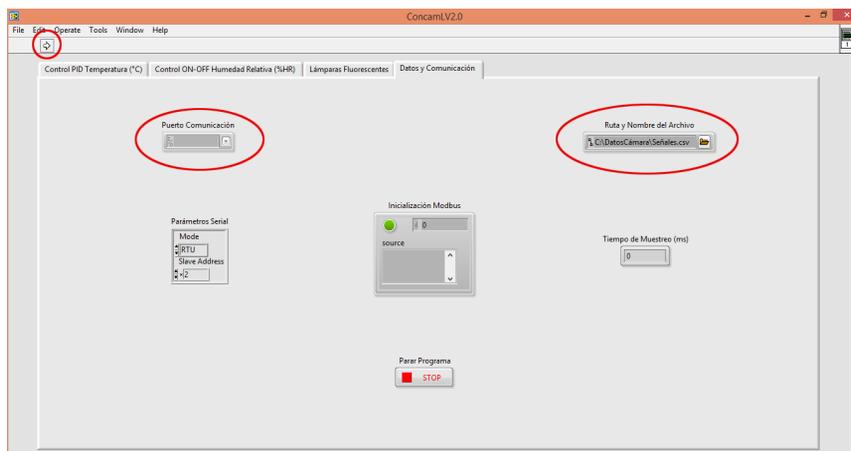


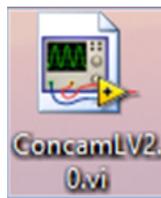
Figura 33. Requisitos para ejecutar la aplicación.



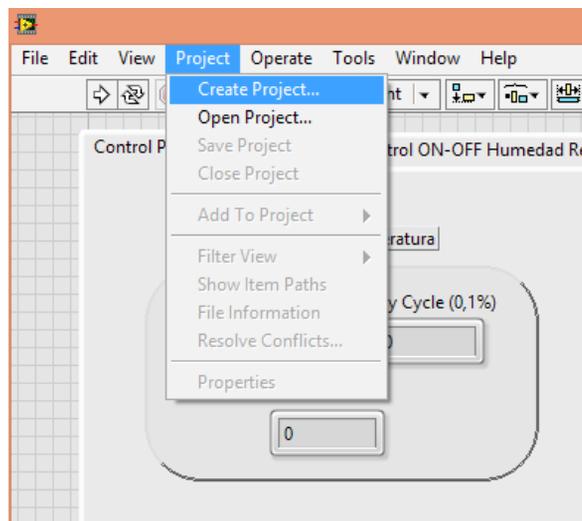
## Anexo

### Pasos para la creación de un archivo ejecutable con LabView

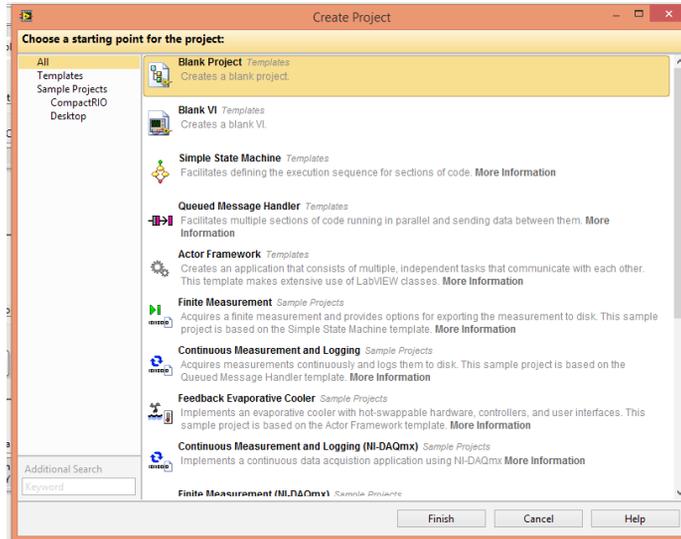
1. Abrir el VI principal, en este caso ConcamLV2.0.vi, éste será el VI convertido en ejecutable.



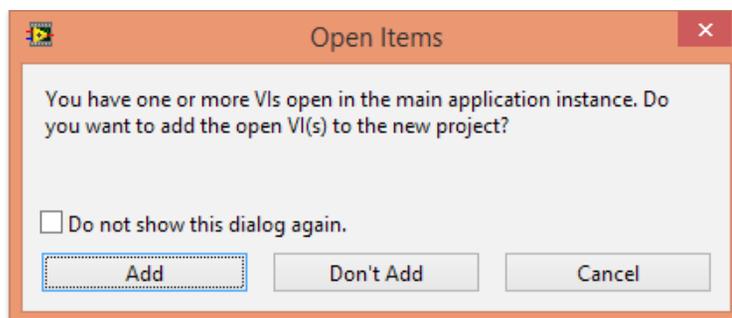
2. Crear un proyecto:
  - Seleccionar *Project*
  - *Create Project*



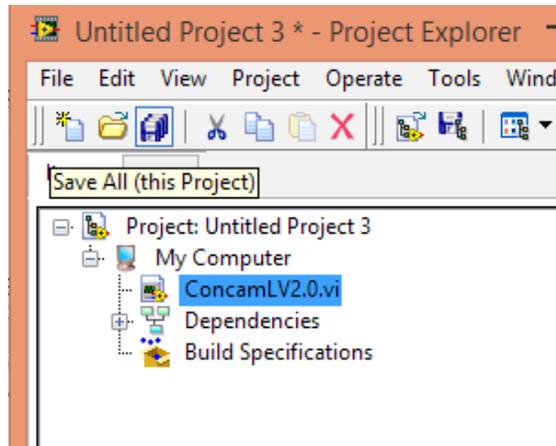
3. Seleccionar *Blank Project* y presionar el botón *Finish*.



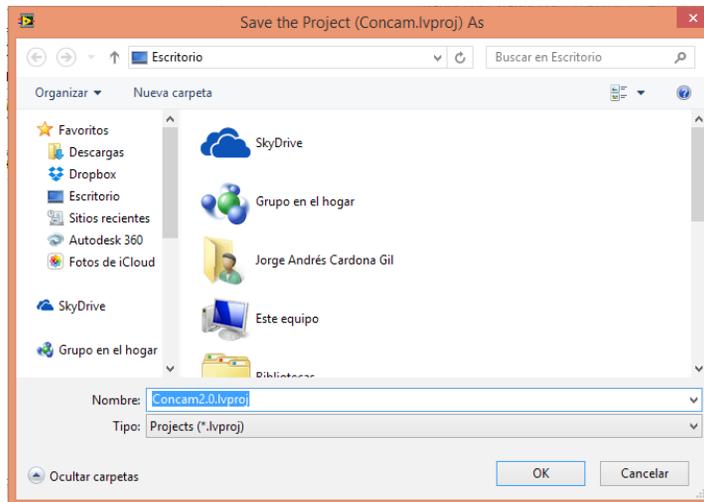
4. Dar clic en *Add*.



5. Dar clic en guardar proyecto.

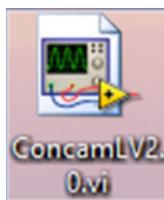


6. Seleccionar ubicación, poner un nombre al proyecto y presionar el botón *OK* para guardar.

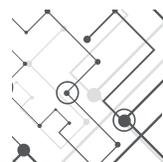
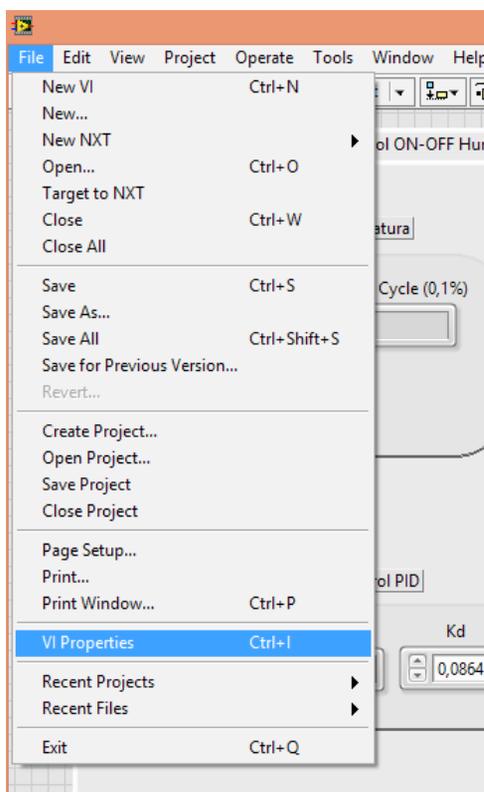


**Nota:** Crear una aplicación autoejecutable o un instalador, simplifica el despliegue de una aplicación en múltiples máquinas.

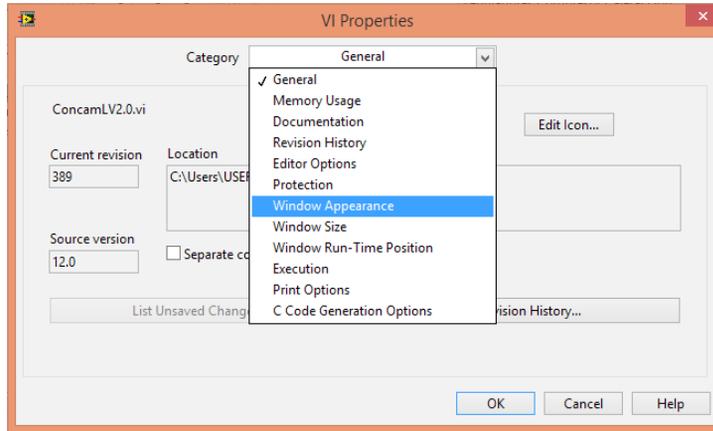
7. Abrir el VI ConcamLV2.0.vi.



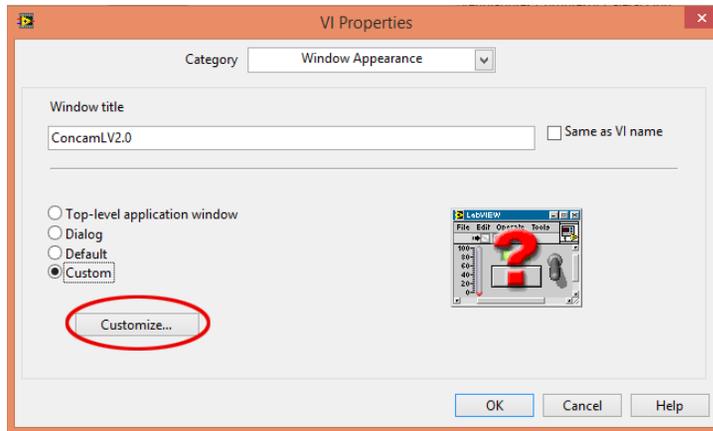
8. Seleccionar *File* y dar clic en *VI Properties*.



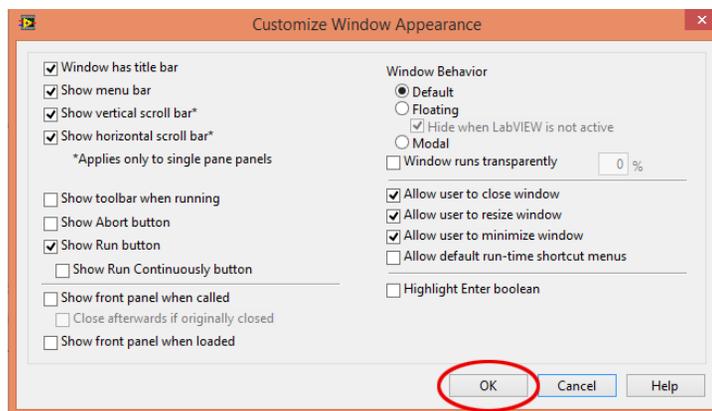
9. Seleccionar *Window Appearance*.



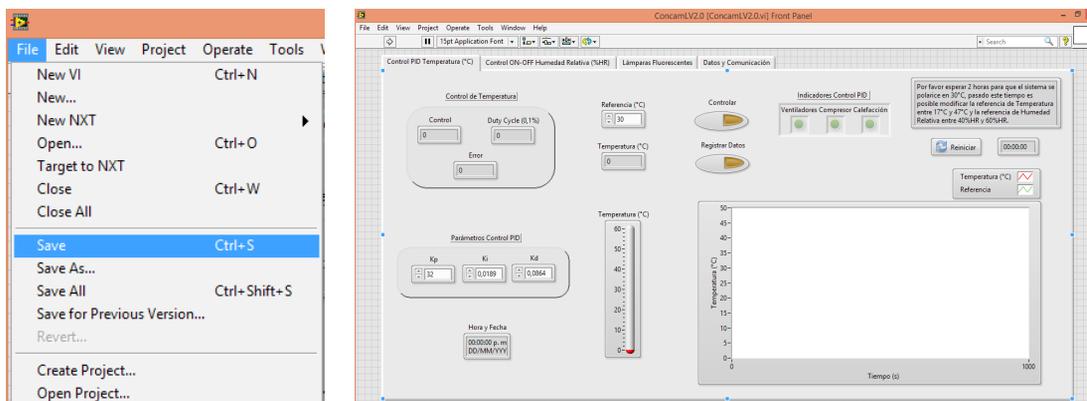
10. Asigne un nombre a la ventana tal como: ConcamLV2.0, seleccionar *Custom* y presionar el botón *Customize...*



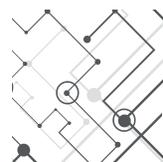
11. Seleccionar las opciones que se muestran en la siguiente imagen y dar clic en el botón *OK*.



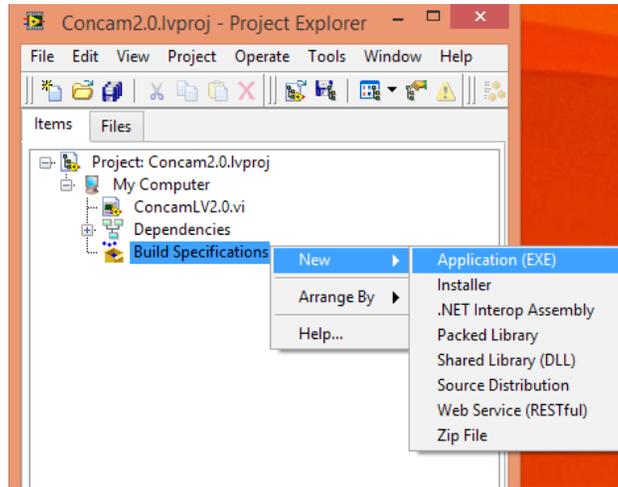
12. Guardar el VI, para esto se debe dar clic en *File* y luego en *Save*.



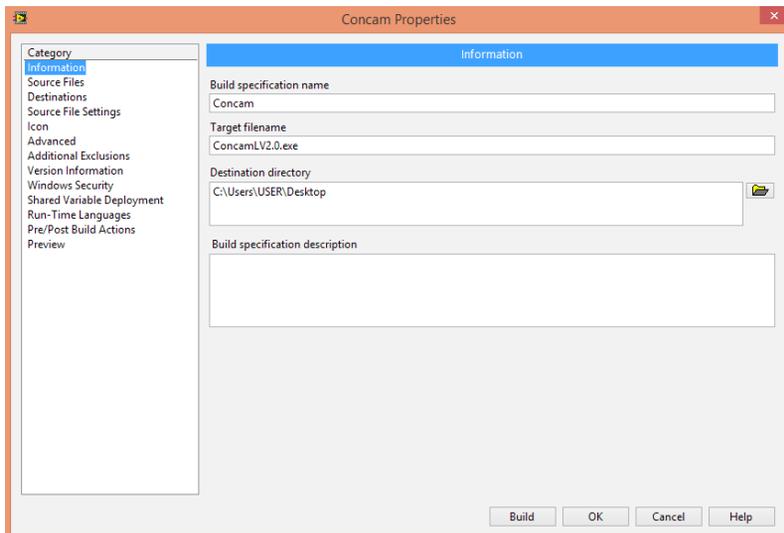
Nota: Esto le da al panel frontal una apariencia profesional cuando se abra como un ejecutable.



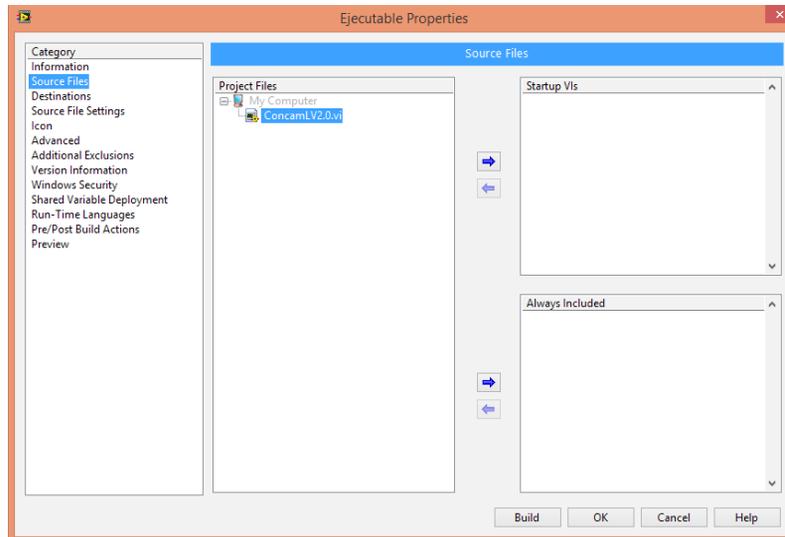
13. Abrir el proyecto Concam2.0, seleccionar la opción *Build Specifications*, dar clic derecho, seleccionar *New* y seleccionar *Application (EXE)*.



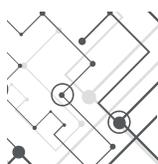
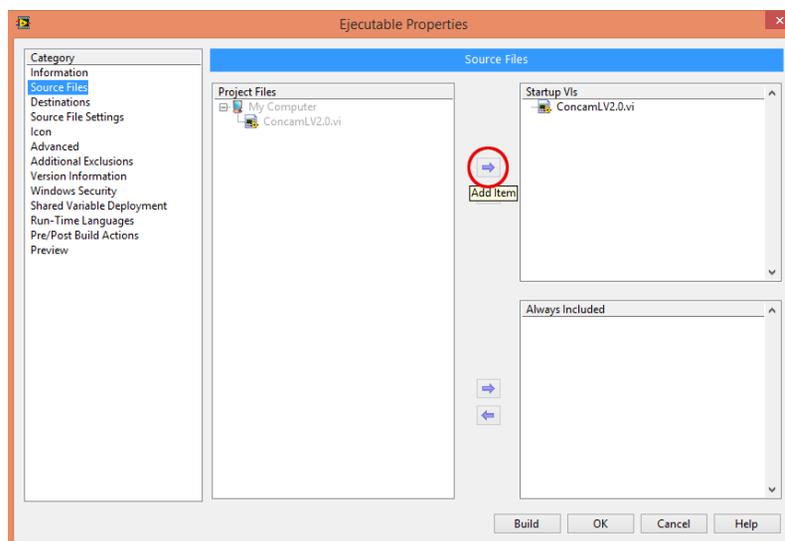
14. Seleccionar la categoría *Information*: En *Build specification name* colocar Concam, en *Target filename* colocar ConcamLV2.0.exe y en *Destination directory* especificar la ruta en donde se quiere generar el ejecutable.



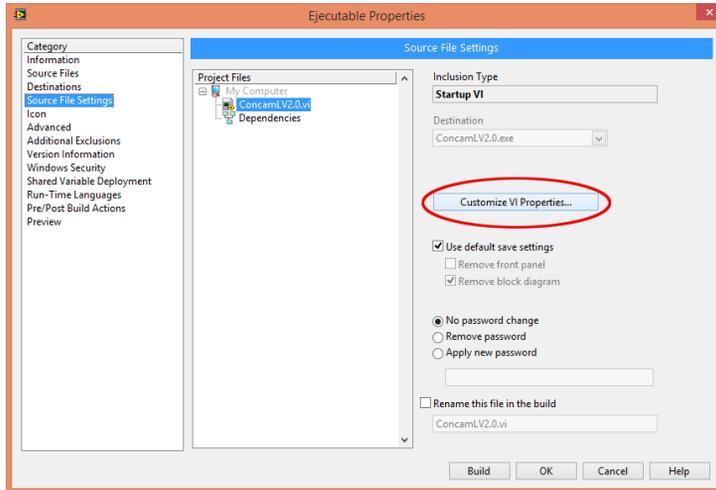
15. Seleccionar la categoría *Source Files*, seleccionar *ConcamLV2.0.vi*.



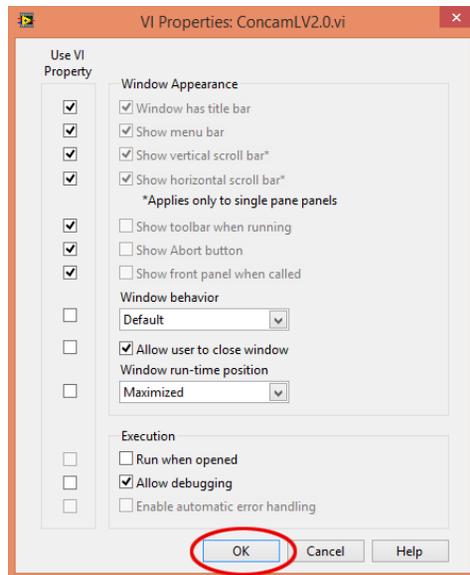
16. Pasarlo a la ventana de listas *Startup VIs*.



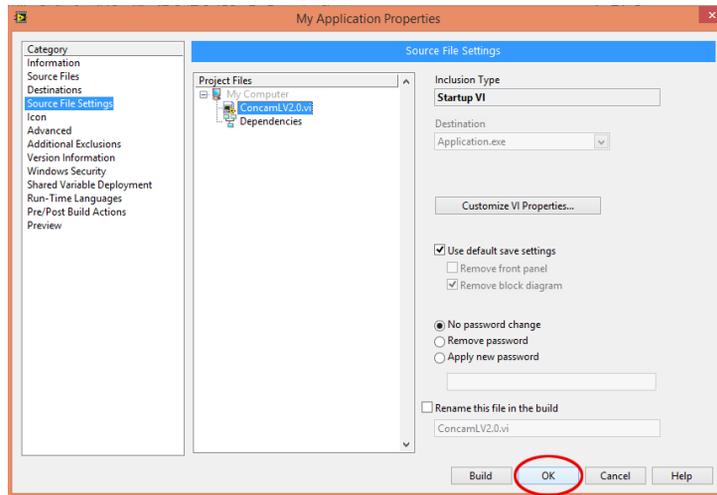
17. Seleccionar la categoría *Source File Settings*, seleccionar *ConcamLV2.0.vi* y presionar el botón *Customize VI Properties...*



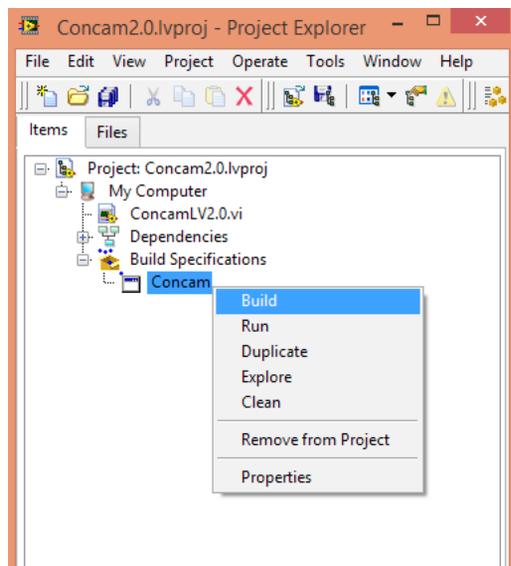
18. Seleccionar las opciones que se muestran en la siguiente imagen y presionar el botón *OK*.



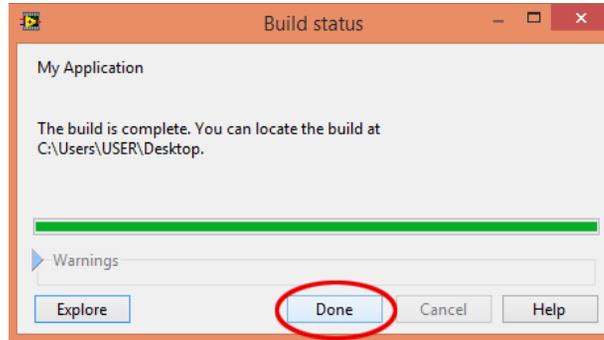
19. Presionar el botón *OK*.



20. En la ventana del proyecto creado seleccionar *Build Specifications* y presionar el + (lista desplegable) del lado izquierdo, de esa lista desplegable se observa un archivo llamado *Concam*, se le da clic derecho y se presiona *Build*.



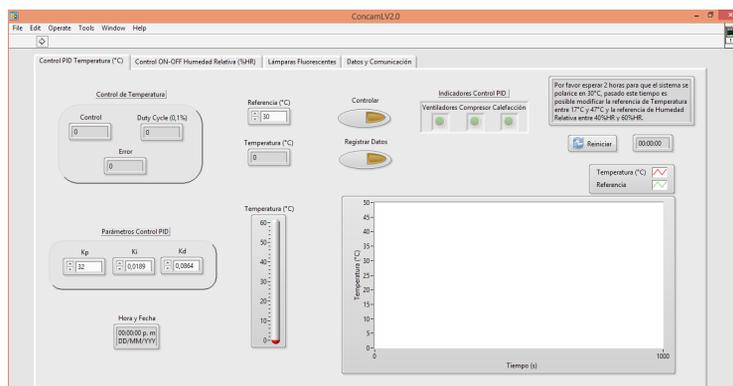
21. Esperar a que el ejecutable se genere y presionar el botón *Done*.



22. El ejecutable se generó en la ruta especificada.

	Concam2.0.aliases	19/03/2014 3:04 p...	Archivo ALIASES	1 KB
	Concam2.0.lvpls	18/03/2014 2:24 a. ...	Archivo LVLPS	1 KB
	Concam2.0.lvproj	13/03/2014 2:32 a. ...	LabVIEW Project	12 KB
	ConcamLV2.0.aliases	18/03/2014 2:24 a. ...	Archivo ALIASES	1 KB
	ConcamLV2.0.exe	18/03/2014 2:24 a. ...	Aplicación	625 KB
	ConcamLV2.0.ini	18/03/2014 2:24 a. ...	Opciones de confi...	1 KB

23. Ejecutable en funcionamiento.



## Sobre los autores



*Jorge Andrés Cardona Gil*, nacido en Medellín, Colombia. Bachiller Académico, promoción 56 del *Instituto San Carlos de La Salle* (2007). Ingeniero Electrónico (2014), Especialista en Automática (2015). Magíster en Ingeniería con énfasis en el Área de Automática (2017) de la *Universidad Pontificia Bolivariana*, certificado por la empresa *3M* en Cableado Estructurado (2012), certificado por la *Institución Universitaria de Envigado* (2014) en *Cisco Certified Network Associate* (CCNA) - Módulo I. Participó en *Campus Party Colombia* (2011 y 2013), como ponente en *Ingeniar* y fue ponente en el *VII Encuentro Interno de Semilleros de Investigación* de la *Universidad Pontificia Bolivariana* (2013), además, participó como ponente y asistente en el *XIII Encuentro Departamental de Semilleros de Investigación REDCOLSI - Nodo Antioquia* (2014). Ponente y asistente en *IICTA 2014*, ponente y asistente en *ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition* (IMECE 2015), ponente



en ISES *Solar World Congress* (SWC 2015). Trabajó como Ingeniero Investigador en el *Laboratorio de Refrigeración* de la *Universidad Pontificia Bolivariana*, actualmente, trabaja como Profesional de Transferencia Laboratorios y como Docente Investigador en la *Universidad Pontificia Bolivariana*. Integrante del grupo A+D y del GET de la *Universidad Pontificia Bolivariana*. Miembro del *American Society of Mechanical Engineers* - ASME y Miembro del *International Solar Energy Society* - ISES.



*Juan Pablo Pazos Urrea*, nacido en Medellín, Colombia. Bachiller Académico del *Colegio Corazonista* (2007) Medellín, Antioquia, certificado por la empresa 3M en Cableado Estructurado, participó en *Campus Party Colombia* 2011. Ingeniero Electrónico (2014) de la *Universidad Pontificia Bolivariana*, Seccional Medellín. Integrante del Semillero A+D y del Semillero de Ciencia de la Computación y Microelectrónica de la *Universidad Pontificia Bolivariana*.



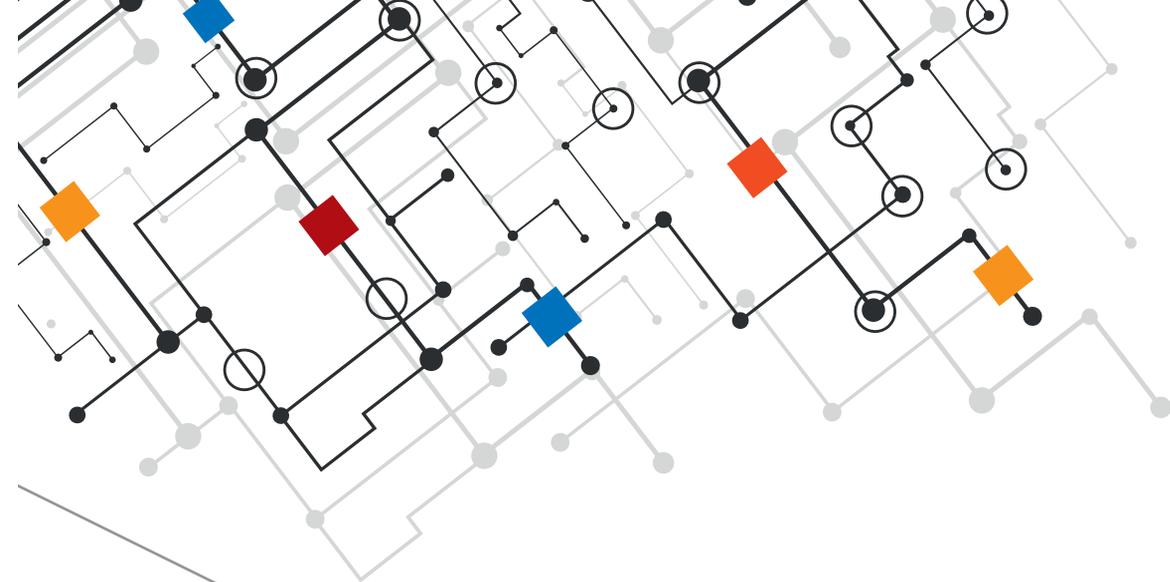
Universidad  
Pontificia  
Bolivariana

## SU OPINIÓN



Para la Editorial UPB es muy importante ofrecerle un excelente producto.  
La información que nos suministre acerca de la calidad de nuestras publicaciones será muy valiosa en el proceso de mejoramiento que realizamos.  
Para darnos su opinión, comuníquese a través de la línea (57)(4) 354 4565  
o vía e-mail a [editorial@upb.edu.co](mailto:editorial@upb.edu.co)  
Por favor adjunte datos como el título y la fecha de publicación, su nombre,  
e-mail y número telefónico.

Esta obra se publicó  
en archivo digital en el mes  
de noviembre de 2017.



La temperatura, la humedad relativa (HR) y la luz son variables que influyen en el desarrollo de las plantas e insectos y afectan considerablemente su desarrollo. El estudio del efecto de diferentes estímulos sobre las plantas y los animales, es posible bajo condiciones controladas, cuando se regulan las variables en cuestión.

Con este proyecto se busca obtener un controlador de temperatura y HR, dentro de una cámara de la que dispone el Grupo de Investigaciones Agroindustriales (GRAIN), inicialmente, utilizada como recinto de maduración de cárnicos, que permite crear ambientes adecuados para el crecimiento de plantas e insectos, con el fin de tener un mejor control sobre las condiciones de desarrollo, a la hora de llevar a cabo experimentos de interés para la agroindustria.

Como producto final se obtuvo una interfaz gráfica, tanto en el PLC como en el PC, la cual permite establecer unas condiciones determinadas de temperatura y de HR en el interior del recinto, con la necesidad y sin esta de utilizar un computador externo para realizar el control.

ISBN: 978-958-764-477-7

