
Cámara de Ambiente Controlado para la Supervivencia de Plantas e Insectos

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

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico

Directora

Marisol OSORIO

Ingeniera Electrónica, Doctora en Ingeniería Eléctrica, Área Control

**Universidad Pontificia Bolivariana
Escuela de Ingenierías
Facultad de Ingeniería Eléctrica-Ingeniería Electrónica
Ingeniería Electrónica
Medellín
2013**

A mis padres y a Dios a quienes todo debo.
Por: Jorge Andrés Cardona Gil

A mis padres, amigos y maestros por todo su apoyo y a Dios quien me permitió cumplir satisfactoriamente con todos los objetivos
planteados.
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), resaltando la colaboración del director de Ingeniería Agroindustrial, Esp. Juan Carlos Palacio Piedrahita en el tema de financiamiento en el 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 e incondicional apoyo, 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 M.Sc. Jose 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 ha permitido 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.

Contenido

	Pág.
INTRODUCCIÓN	20
1. ESTADO DEL ARTE Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA RESUELTO	23
2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CÁMARA EXISTENTE Y SUS POSIBILIDADES	27
2.1. Cámara de Maduración	27
2.1.1. Elementos de control para el buen funcionamiento de la Cámara de Maduración	29
2.1.2. Sistema de refrigeración	32
2.1.3. Sistema de calefacción por resistencia eléctrica	37
2.1.4. Sistema de humidificación	39
2.1.5. Sistema de ventilación	39
2.2. Cámaras de ambiente controlado	41
2.2.1. Tipos de cámaras de ambiente controlado	42
2.2.1.1. Cámaras compactas	42
2.2.1.2. Cámaras Walk-in	42
3. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS ÁCAROS <i>Tetranychus Urticae</i> Koch Y DE LAS ESPECIES HOSPEDERAS	44
3.1. Biología	45
3.1.1. Condiciones óptimas para el desarrollo y la reproducción	45
3.2. Síntomas y daños	46
3.3. Métodos de control	47
3.3.1. Control cultural	47
3.3.1.1. Buenas prácticas culturales	48
3.3.2. Control biológico	48
3.3.2.1. Lucha biológica	49
3.3.3. Control químico	49
3.3.4. Control por invernización	51

3.3.5. Control físico	52
4. ACONDICIONAMIENTO DE LA CÁMARA DE MADURACIÓN	53
4.1. PLC (Programmable Logic Controller)	53
4.1.1. PLC Unitronics Vision 230-13-B02B	54
4.1.1.1. Snap-in V200-18-E1B de módulos I/O	55
4.1.1.2. PLC Unitronics Vision 230 en la Cámara de Ambiente Controlado	55
4.2. Sensor de humedad y temperatura	56
4.3. Iluminación. Tubos fluorescentes	57
4.4. Resistencia de calefacción	59
4.5. Gabinete	60
5. MODELAMIENTO CINEMÁTICO DE LOS ACTUADORES CONTROLADOS	63
5.1. PWM (Pulse-With Modulation)	65
5.2. Modelamiento estático y dinámico de los actuadores controlados	66
5.2.1. Curva estática. Resistencia de calefacción de 310 W	67
5.2.2. Curva dinámica. Resistencia de calefacción de 310 W	69
5.2.3. Prueba fallida modelamiento resistencia del humidificador	73
5.2.4. Resistencia de calefacción de 1500 W. Curva estática y dinámica	76
5.3. Modelo en tiempo continuo de la resistencia de calefacción de 1500 W	80
6. TÉCNICAS DE CONTROL CLÁSICO IMPLEMENTADAS	84
6.1. Control PID	84
6.1.1. Instrumentación necesaria para el correcto funcionamiento de un controlador PID	86
6.1.1.1. Sensor	86
6.1.1.2. Actuador	86
6.1.1.3. Controlador	86
6.1.2. Acción proporcional	87
6.1.3. Acción integral	88
6.1.4. Acción derivativa	88
6.1.5. Consideraciones prácticas de un controlador PID para ser programado en una máquina de cómputo	89

6.1.6. Consideraciones prácticas con actuadores reales	89
6.1.6.1. Windup	89
6.1.6.2. Antiwindup	90
7. DISEÑO, SIMULACIÓN Y RESULTADOS EXPERIMENTALES DEL CONTROL PID IMPLEMENTADO	91
7.1. Diseño y simulación del control PID por el método de Ziegler-Nichols	91
7.1.1. Métodos de Ziegler-Nichols	91
7.1.1.1. Método 1. Lazo abierto	91
7.1.1.2. Método 2. Lazo cerrado	92
7.1.2. Diseño y simulación del control PID método 1 Ziegler-Nichols	92
7.1.3. Diseño y simulación del control PID método 2 Ziegler-Nichols	95
7.2. Diseño y simulación del control PID por el método de Chien, Hrones y Reswick	95
7.3. Resultados experimentales del control PID implementado. Método de Chien, Hrones y Reswick	97
8. COMUNICACIÓN PC-PLC	102
8.1. Protocolo Modbus	102
8.1.1. Modos de transmisión del protocolo Modbus	102
8.1.2. Funcionamiento y elementos de una red Modbus	102
8.1.3. Representación de datos en Modbus	103
8.1.3.1. Output Coils	104
8.1.3.2. Holding Registers	104
8.1.4. Comunicación Modbus a través del Programa en LabVIEW® (PC) y Unitronics Visilogic (PLC)	104
9. SOFTWARE DE CONTROL	106
9.1. Software de control PLC	106
9.1.1. Menú principal. Setup	107
9.1.2. Menú principal. Control PC	109
9.1.3. Menú principal. Control PLC	109
9.2. Software de control PC	110
9.2.1. Menú control PID temperatura	112
9.2.2. Menú control ON-OFF humedad relativa	112

9.2.3. <i>Menú lámparas fluorescentes</i>	113
9.2.4. <i>Menú datos y comunicación</i>	113
10. PRODUCTOS OBTENIDOS	115
11. TRABAJO FUTURO.....	116
12. POTENCIAL	117
13. CONCLUSIONES	118
REFERENCIAS	120
AUTORES	128
ANEXOS*	129

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Temperatura (rojo) (°C) Vs Tiempo (min), setpoint (32 °C) (azul)	21
Figura 2. Cámara de Maduración para productos cárnicos existente	27
Figura 3. Póster Cámara de Maduración para productos cárnicos existente	28
Figura 4. Interruptor selector de tipo muletilla de dos posiciones	29
Figura 5. Indicadores luminosos instalados actualmente en la Cámara de Maduración	29
Figura 6. Detector de nivel.....	30
Figura 7. Temporizador Autonics ATE	30
Figura 8. Llenado automático con válvula solenoide (parte superior Cámara de Maduración)	31
Figura 9. Llenado automático con válvula solenoide (parte inferior Cámara de Maduración)	31
Figura 10. Sensor de humedad y temperatura Cámara de Maduración.....	32
Figura 11. Ciclo de refrigeración por compresión de vapor.....	33
Figura 12. Evaporador	34
Figura 13. Compresor	34
Figura 14. Condensador	36
Figura 15. Resistencia eléctrica por aire forzado de 310 W	38
Figura 16. Resistencia eléctrica por aire forzado de 310 W en la Cámara de Maduración	38
Figura 17. Humidificador por resistencia eléctrica sumergida de 1 kW	39
Figura 18. Circulación horizontal y vertical.....	40
Figura 19. Ventiladores vista interna	40
Figura 20. Ventiladores vista externa.....	41
Figura 21. Cámaras climáticas modulares tipo <i>Walk-in</i>	43
Figura 22. Ácaro <i>Tetranychus Urticae</i> Koch	44
Figura 23. Huevos de ácaro <i>Tetranychus Urticae</i> Koch	45
Figura 24. Colonia de ácaro <i>Tetranychus Urticae</i> Koch.....	45

Figura 25. Daño producido en hojas	47
Figura 26. Daño producido en fruta	47
Figura 27. PLC Unitronics <i>Vision 230</i>	56
Figura 28. Sensor de humedad y temperatura	57
Figura 29. Instalación de tubos fluorescentes	58
Figura 30. Resistencia eléctrica por aire forzado de 1500 W	59
Figura 31. Resistencia eléctrica por aire forzado de 1500 W en la Cámara de Ambiente Controlado.....	59
Figura 32. Termostato TS-120S C	59
Figura 33. Termostato ubicado en la Cámara de Ambiente Controlado	60
Figura 34. Gabinete vista frontal.....	61
Figura 35. Gabinete cableado interno	61
Figura 36. Gabinete cableado interno PLC	62
Figura 37. Cámara de Ambiente Controlado	62
Figura 38. PWM	66
Figura 39. Curva de polarización con un <i>duty cycle</i> del 65 % (punto Q).....	70
Figura 40. Curva de polarización con un <i>duty cycle</i> del 60 % (punto Q).....	71
Figura 41. Perturbación de la temperatura ambiente.....	72
Figura 42. Curva dinámica de la resistencia de 310 W de calefacción	73
Figura 43. Curva dinámica de la resistencia de 310 W de calefacción en la zona de operación.....	73
Figura 44. Comportamiento de la humedad relativa con un <i>duty cycle</i> del 60 %	75
Figura 45. Comportamiento de la humedad relativa bajo las condiciones normales de operación del sistema	75
Figura 46. Comportamiento de la humedad relativa bajo un funcionamiento continuo del sistema de refrigeración y ventilación	75
Figura 47. Curva estática de la resistencia de 1500 W del sistema de calefacción	77
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>	78
Figura 49. Curva dinámica de la resistencia de 1500 W del sistema de calefacción	79
Figura 50. Curva dinámica de la resistencia de 1500 W del sistema de calefacción en la zona de operación	79
Figura 51. Curva característica de un sistema de primer orden con retardo	80
Figura 52. Diagrama de bloques implementado en Simulink® para obtener la curva dinámica	82

Figura 54. Control PID en lazo de realimentación.....	84
Figura 55. Parámetros respuesta al paso del sistema método 1 Ziegler-Nichols.....	91
Figura 56. <i>Duty cycle</i> 40 % - 50 %	93
Figura 57. <i>Duty cycle</i> 50 % - 40 %	93
Figura 58. <i>Duty cycle</i> 40 % - 30 %	93
Figura 59. <i>Duty cycle</i> 30 % - 40 %	93
Figura 60. Diagrama de bloques control PID método 1 Ziegler-Nichols.....	94
Figura 61. Respuesta al paso 40 % de <i>duty cycle</i> (30 °C) del sistema controlado por método 1 Ziegler-Nichols.....	94
Figura 62. Respuesta Control PID ajustado método 1 Ziegler-Nichols	95
Figura 63. Diagrama de bloques control PID método CHR sobrepaso 0 %	96
Figura 64. Respuesta al paso 40 % de <i>duty cycle</i> (30 °C) del sistema controlado por método CHR sobrepaso 0 %	96
Figura 65. Respuesta Control PID ajustado método CHR sobrepaso 0 %	97
Figura 66. Control PID temperatura sin perturbación con referencia 30 °C, 19 °C y 47 °C (día y noche)	98
Figura 67. <i>Duty cycle</i> control PID temperatura sin perturbación (día y noche)	98
Figura 68. Control PID temperatura referencia 30 °C con perturbación control <i>ON-OFF</i> humedad relativa referencia 50 %HR (día y noche)	98
Figura 69. Control <i>ON-OFF</i> humedad relativa referencia 50 %HR (día y noche)	99
Figura 70. <i>Duty cycle</i> control PID temperatura con perturbación humidificador 50 %HR (día y noche).....	99
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	99
Figura 72. Control <i>ON-OFF</i> humedad relativa 50 %HR con perturbación lámparas fluorescentes encendidas (día y noche).....	99
Figura 73. <i>Duty cycle</i> control PID temperatura con perturbación humidificador 50 %HR y lámparas fluorescentes encendidas (día y noche)	100
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.....	100
Figura 75. Control <i>ON-OFF</i> humedad relativa 60 %HR con perturbación lámparas fluorescentes encendidas y apertura de puerta.....	100
Figura 76. <i>Duty cycle</i> control PID temperatura con perturbación humidificador 60 %HR, lámparas fluorescentes encendidas y apertura de puerta	100

Figura 77. Funcionamiento Modbus PC (Maestro) - PLC (Esclavo).....	103
Figura 78. Menú principal.....	106
Figura 79. <i>Setup</i> . Opciones 1 y 2	107
Figura 80. <i>Setup</i> . Opción 3.....	107
Figura 81. Menú control PC.....	109
Figura 82. Menú control PID temperatura (°C)	112
Figura 83. Menú control <i>ON-OFF</i> humedad relativa (%HR)	113
Figura 84. Menú lámparas fluorescentes	113
Figura 85. Menú datos y comunicación	114

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Especificaciones técnicas del evaporador	35
Tabla 2. Especificaciones técnicas del compresor	35
Tabla 3. Especificaciones técnicas del condensador	36
Tabla 4. Especificaciones técnicas de la válvula de expansión.....	36
Tabla 5. Propiedades físicas del refrigerante R-134A.....	37
Tabla 6. Materias activas	50
Tabla 7. Especificaciones técnicas del sensor de humedad y temperatura.....	56
Tabla 8. Condiciones normales de operación de la cámara de ambiente controlado	65
Tabla 9. Registro de la curva estática disminuyendo el <i>duty cycle</i> de la resistencia de calefacción de 310 W desde el 100 %	67
Tabla 10. Registro de la curva estática aumentando el <i>duty cycle</i> de la resistencia de calefacción de 310 W desde el 0 %	68
Tabla 11. Zona de operación de la resistencia de calefacción de 310 W. Resultados al aumentar el <i>duty cycle</i> desde el 0 %	69
Tabla 12. Zona de operación de la resistencia de calefacción de 310 W. Resultados al disminuir el <i>duty cycle</i> desde el 100 %	69
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 %	71
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 %	71
Tabla 15. Nuevas condiciones normales de operación de la Cámara de Ambiente Controlado	76
Tabla 16. Registro de la curva estática de la resistencia de calefacción de 1500 W	77
Tabla 17. Zona de operación de la resistencia de calefacción de 1500 W. Resultados al aumentar el <i>duty cycle</i> desde el 0 %	78
Tabla 18. Zona de operación de la resistencia de calefacción de 1500 W. Resultados al disminuir el <i>duty cycle</i> desde el 60 %	79
Tabla 19. Parámetros del modelo matemático de la resistencia del sistema de calefacción	81
Tabla 20. Promedio de los parámetros del modelo matemático de la resistencia del sistema de calefacción	81
Tabla 21. Valores de los parámetros método 1 de Ziegler-Nichols	92
Tabla 22. Valores de los parámetros método 2 de Ziegler-Nichols	92
Tabla 23. Parámetros método 1 Ziegler-Nichols promediados	94
Tabla 24. Valores de los parámetros método CHR sobrepaso 0 %	95

Tabla 25. Valores de los parámetros método CHR sobrepaso 20 %	96
Tabla 26. Parámetros método CHR sobrepaso 0 %	96
Tabla 27. Tabla de datos protocolo Modbus	103
Tabla 28. Parámetros de la comunicación serial	105
Tabla 29. Parámetros que pueden ser modificados por el usuario	108
Tabla 30. Registros del PLC leídos por el PC	111
Tabla 31. Registros del PC escritos al PLC	111

Glosario

4-20 mA: “señal analógica estándar para transmisión de información, muy utilizada a nivel de 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, etc., 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” (Kalipedia, 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, Es 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, n.d.).

CLOROFILA: son una familia de pigmentos de color verde que se encuentran 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 protistas, crítica en la fotosíntesis, 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.com, 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: “Insectos con sólo dos pares de alas funcionales” (Educarchile, 2013).

ECLOSIONAR: “salir la cría de su huevo o la crisálida de su capullo, rompiendo 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 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, n.d.).

FITOQUÍMICA: “ciencia responsable por el 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) usando 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, n.d.).

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®.

NIMODBUS®: librería de LabVIEW® 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 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 nanometros” (Infoagro, 2011b).

RTU: de sus siglas en inglés *Remote Terminal Unit*, “define a los dispositivo basados en microprocesadores, el cual 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 o 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 permite establecer unas condiciones determinadas tanto 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 2013*

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 CO₂ 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 sólo afectan a las plantas, sino también a los insectos que habitan en ellas, ya 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 dependiendo de la especie y de la etapa de desarrollo en la que se encuentre, lo que afecta directamente a las plantas en las funciones de fotosíntesis, respiración, permeabilidad de la membrana celular, absorción de agua y nutrientes, transpiración y actividades enzimáticas y 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 GRAIN 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 dispone 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, ya que los actuadores que se tienen se sometían a ciclos de trabajos pesados, lo que lleva a disminuir su vida útil considerablemente.

Se llevaron a cabo experimentos para conocer el comportamiento de la temperatura en el 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, ya que un entorno con una temperatura de 30 ± 2 °C favorece la reproducción y supervivencia de los ácaros (Corredor *et al.*, n.d.). 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.

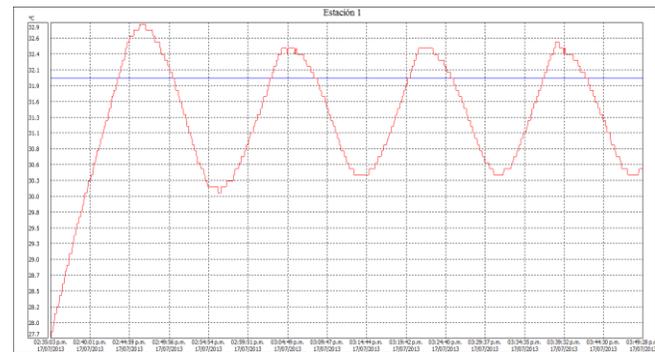


Figura 1. Temperatura (rojo) (°C) Vs Tiempo (min), setpoint (32 °C) (azul)

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 a el 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 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 puedan 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, teniendo 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 existencia de gases controlados (contaminación, renovación de emanaciones y atmósferas inertes, entre otros) y simulación solar; entre otros (CCI, 2009).

“Estos ambientes controlados resultan de gran utilidad, ya que facilitan la obtención de un producto en entornos diferentes a los habituales y durante diferentes estaciones climatológicas”

(Álvarez *et al.*, 2007), ya que 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, ya 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 (Villeg, 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 sólo 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 sólo 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 sólo 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 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, ya 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 éste, 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. Ésta es una forma de “lógica multivariada que se basa en el razonamiento difuso. En contraste con la lógica digital en la cual las variables tienen únicamente los valores uno y cero, las variables en lógica difusa pueden adoptar cualquier valor entre estos dos valores extremos. Este rango ampliado de valores le 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 & 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” y
- 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, las cuales aumentan los precios mostrados anteriormente. Estos precios no incluyen transporte e 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 están ganando terreno frente a los controles tradicionales en lo que se refiere a ambientes controlados, como se da 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 de todos los sistemas mencionados anteriormente permiten 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)

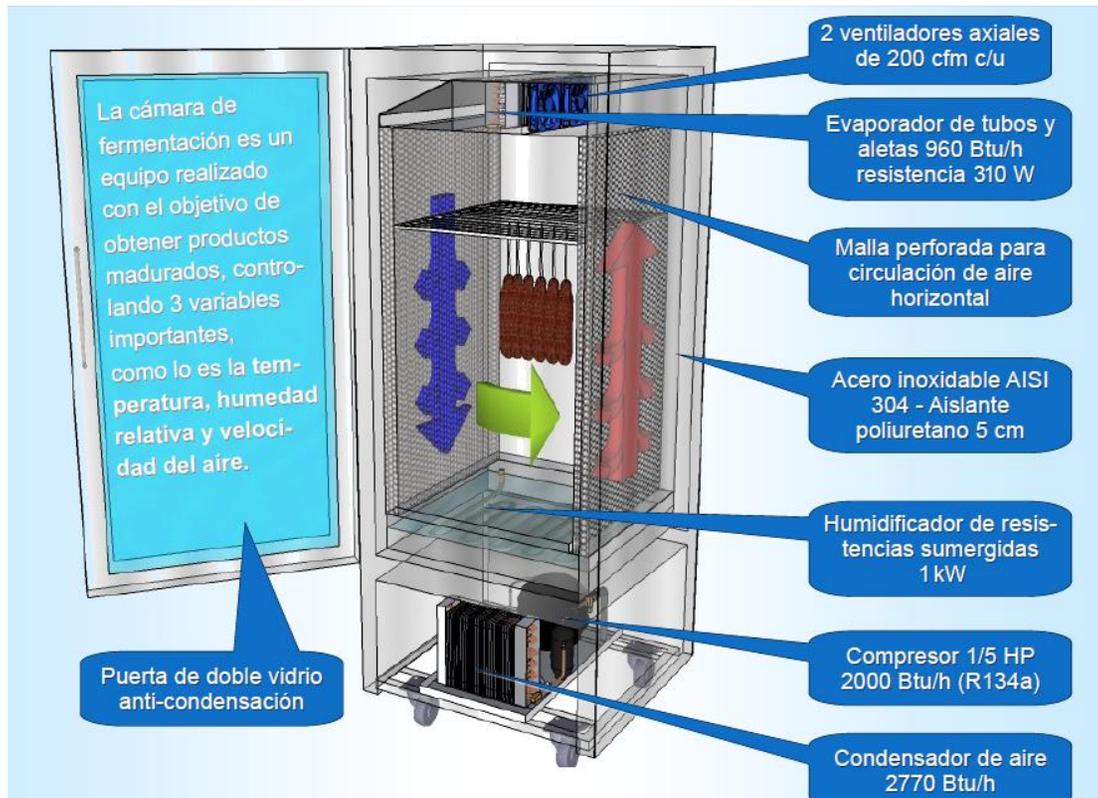


Figura 3. Póster Cámara de Maduración para productos cárnicos existente. Reproducida con permiso de Isaza (2011)

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, dando a entender cuándo algo está mal y qué sistema es el afectado.

“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 sólo 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 encuentran encendidos o apagados, mientras que para indicar el 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, ya que puede generar posibles daños en la resistencia por sobrecalentamiento.



Figura 4. Interruptor selector de tipo muletilla de dos posiciones



Figura 5. Indicadores luminosos instalados actualmente en la Cámara de Maduración

Se le llama detector a un sensor 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 vigilar constantemente el nivel de agua del sistema de humidificación. Dicho detector cumple una función de protección, ya 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.



Figura 6. Detector de nivel

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, ya que 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 éste.



Figura 7. Temporizador Autonics ATE

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, éste energiza la válvula solenoide para que ésta 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, obstruyendo el paso del agua. Lo anterior se conoce como un llenado automático (ver Figuras 8 y 9).



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



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

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.

Además del detector de nivel, la Cámara de Maduración cuenta con otro par de sensores, un sensor de temperatura y un sensor 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 ésta posee al conectar o desconectar uno de ellos.



Figura 10. Sensor de humedad y temperatura Cámara de Maduración

El sensor de temperatura consiste en una NTC 10K y tiene un rango de medición entre -10°C y 70°C , mientras que el sensor de humedad se basa en un sensor 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 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 termodinámicas 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, ya que mientras el sistema de refrigeración por compresión consume energía mecánica, el sistema de refrigeración por absorción consume energía térmica (Gas natural ferosa, 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 expansor a partir del cual se obtiene trabajo, 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.

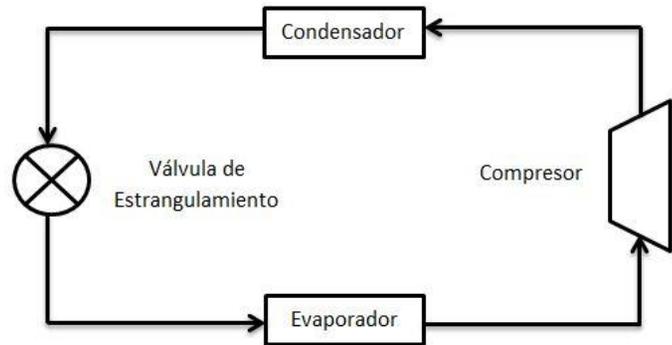


Figura 11. Ciclo de refrigeración por compresión de vapor

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 a las paredes de este aparato y al medio ambiente” (Cooperativa de Mejoramiento Genético, 2004).



Figura 12. Evaporador

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 éste se sobrecalienta.



Figura 13. Compresor

El vapor sobrecalentado se lleva al condensador (ver Figura 14 y Tabla 3), el “segundo intercambiador de calor, fundamental dentro del sistema. Tiene por finalidad condensar los vapores refrigerantes a alta presión provenientes del compresor. La condensación de estos vapores significa convertirlos en líquidos y para ellos 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).

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 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).

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
No. 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
Desplazamiento	7.6 CC
Tipo De Aceite	Poliéster
Viscosidad	32 cSt
Carga De Aceite	250 CC
Resistencia del motor	10.1 Ohm
Resistencia del motor	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
Largo	266.6 mm
Alto	239 mm
Ancho	85 mm
Caudal	300 cfm

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

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 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).

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, siendo la zona geográfica donde 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”.

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 ³)	3.25
Densidad de vapor (0 °C)	(kg/m ³)	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

La Cámara de Maduración existente dispone de un sistema de calefacción eléctrica, la cual consiste en convertir la electricidad a calor a través de una resistencia eléctrica. Este tipo de calefacción presenta las siguientes ventajas en relación a 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 enrarece 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 de dicha calefacción muy llamativa a la hora de utilizar un sistema de calefacción.

Para este tipo de calefacción, lo más aplicable es la instalación de una resistencia aleteada 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

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 (Translimite, 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 periódico 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).



Figura 17. Humidificador por resistencia eléctrica sumergida de 1 kW

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” (QuimiNet, 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 la cámara 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).

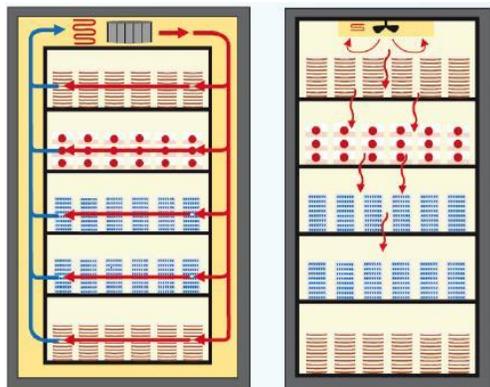


Figura 18. Circulación horizontal y vertical. Reproducida con permiso de Barrios y Uribe (2012)

“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 e intensidad luminosa y entre otros, lo cual permite 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 mediante la generación de nieve, hielo, deshielo, condensación, secado y 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, estabilidad de productos y 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 es posible 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, posee una mayor importancia las cámaras de ensayos climáticos y de

simulación ambiental sobre las cámaras 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 encuentra destinada la cámara a acondicionar.

En los ensayos climáticos es muy importante el elemento a poner a prueba, ya 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 dependiendo 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 de saber de antemano que 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, al tipo de radiación que utilizan, a los tiempos de

exposición, a la cantidad de radiación, a los tipos de muestras y a los sensores que utilizan, entre muchas otras características, de esta manera se logran obtener resultados confiables y exactos 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 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 litros 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 a su interior. Este tipo de cámaras permite crear en su interior 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).

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 presenta 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).



Figura 21. Cámaras climáticas modulares tipo *Walk-in*

3. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS ÁCAROS *Tetranychus Urticae* Koch Y DE LAS ESPECIES HOSPEDERAS

El GRAIN ha venido desarrollando 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 del ácaro como tal. Sin embargo, cabe aclarar que debe poderse criar cualquier otro artrópodo fitófago (insectos o ácaros) 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.

T. Urticae pertenece a la Clase *Arácnida*, Subclase *Acari*, 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 1059 especies de plantas hospederas en 102 países del mundo (Dorkeld y Migeon, (2006-2013).



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

Los individuos de la familia *Tetranychidae* pasan por el estado de protoninfa y ninfocrisálida con 3 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 4 estados quiescentes (huevo y 3 crisálidas) y 4 estados móviles (larva, protoninfa, deutoninfa y adulto). En 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, especialmente 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).

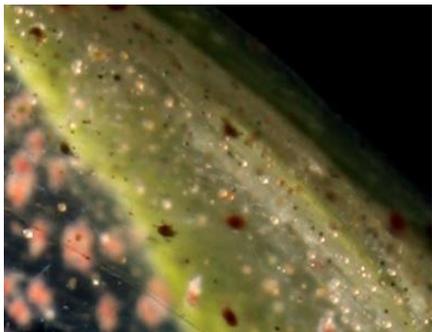


Figura 23. Huevos de ácaro *Tetranychus Urticae* Koch.
Reproducida con permiso de Toro (2013)



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 3 pares de patas, mientras que las Ninfas ya tienen los 4 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, pasando 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 entre 5 y 30 días, lo que depende de las condiciones ambientales, especialmente 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 °C 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 °C 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 anotarse que las altas precipitaciones causan un decrecimiento significativo en la cantidad de individuos (Haque, *et al.*, 2008; El-Halwany 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 destruyendo 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, té y entre otras, incluyendo la mayoría de ornamentales y hortalizas: rosas, flor de calabaza y 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, absorbiéndolos 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 causando muchas lesiones irreversibles en la planta, reduciendo la capacidad fotosintética de la planta y la producción de nutrientes, en ocasiones logran matar la planta. (Wikipedia, 2012a).



Figura 25. Daño producido en hojas

El ácaro *T. Urticae* es bastante resistente y difícil de combatir, ya que existe una elevada reproducción, puesto que 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, con lo que generan manchas amarillentas y/o 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 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) recomienda 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, conviene acertar con el emplazamiento, evitando 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, evitando 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 mojándolas con el agua de la manguera”.
- “Limpiar el polvo de las plantas, ya 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 cultivo de hortalizas en invernadero. *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 éste, es que puede alimentarse en ciertos momento 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* (Gipcitricos, 2010).

3.3.2.1. Lucha biológica

Gipcitricos (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, ya que los depredadores y parasitoides responden con crecimientos más lentos. Esta estrategia de lucha se debe combinar con otras. Los depredadores más usados a nivel comercial son el *Phytoseiulus Persimilis* y el *Amblyseius Californicus* de los que se venden

preparados 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 arbusto 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 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 éstos 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”.
- “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, procurando una buena cubrición de éstas en todas las plantas. Para las aplicaciones en pulverización es aconsejable la utilización de mojantes”.

- “Diferenciar el estado de la plaga predominante y el nivel poblacional de cada estadio al que se dirige el tratamiento, ya que según éstos se realizará la elección del producto más apropiado (ovicidas, larvicidas, adulticidas)”.

Tabla 6. Materias activas

Modo acción	Materia activa	Plazo (s)
Activador del canal cloro	Abamectina3	10
Inhibidores de crecimiento de los ácaros	Clotecifenn	21
	Hexitiazox	14
	Etoxazol	14
Inhibidores del transporte de electrones	Fenazaquin	21
	Piridabén	15
	Tebufenpirad	7
	Fenpíroximat	14
Inhibidores de la síntesis ATP mitocondrial	Propargita	14
	Inhibidores de la síntesis de los lípidos	Espirodiclofén
Físico, asfixia	Aceite parafínico	-

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, envés de las hojas o frutos. Se deben de mojar bien, ya que la tela tejida por estos ácaros les procura cierta protección. Los ataques generalizados requieren de productos específicos (Culturaagraria, 2012).

Los productos deberían de 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, spirodiclofen, 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, consiste en inducir frío artificialmente a plantas provenientes de vivero comúnmente establecidos por la mayoría de los agricultores, esta técnica consiste en empacar las plantas principalmente secas las cuales se introducen en bolsas plásticas transparentes (para evitar el desarrollo de patógenos), 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 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 evitando la proliferación al ácaro, también favorece una mayor inducción floral de las plantas, frutos con mayores características organolépticas (sabor, color, aroma, 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 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 plantas (Culturaagraria, 2012).

3.3.5. Control físico

El utilizar tecnologías de microaspersión como los *fogers* pueden ser de gran utilidad bajo el sistema de cultivo de plantas en macrotúnel, los *fogers* producen gotas de agua muy pequeñas casi imperceptibles las cuales ayudan a disminuir la temperatura interior del túnel y así aumentar la humedad relativa la cual es desfavorable para el ácaro de dos manchas (*Tetranychus Urticae*) y también algunas enfermedades. La desventaja de esta técnica es: 1) Costo, ya 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*), antracnosis (*Colletotrichum Fragarie*) y entre otras (Gipcítricos, 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, ya 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 permita obtener resultados más precisos y la elaboración de conclusiones más acertadas con relación a una determinada investigación.

Se aprovechó al máximo los diferentes elementos instalados en dicha cámara, junto con sus conexiones existentes. Solamente se desconectaron los diferentes elementos (que no requirieron cambio) conectados al controlador de humedad y temperatura anteriormente instalado, teniendo 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 un switcheo entre el controlador y el

PLC, ya que esto implicaba la adición de un nuevo sistema de contactores que se encarguen 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 sus siglas en inglés PLC (*Programmable Logic Controller*), muy utilizado en la industria, es una computadora de gran potencia utilizada en la ingeniería automática o automatización industrial, con el 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 y 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, 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, pudiendo 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. De diseño compacto, estos controladores 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. Ciertos 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 como el 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 que 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 y 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, proporcionando una configuración de I/O que pueden ser analógicas y digitales.

A través del puerto del controlador de ampliación de I/O, se pueden conectar hasta 8 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, analógicas y entre otras, salidas analógicas (0-10 V, 4-20 mA y entre otras), de PWM (*Pulse With Modulation*), por relé y transistor, así como opciones de comunicación vía *Ethernet* TCP/IP, Modbus, Can *Open* y Unican, GSM/GPRS/SMS y entre otras; teclas de función personalizables tanto a nivel de hardware o a nivel 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 fluorescentes) 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 8 salidas por relé para el control de los actuadores en su totalidad y el piloto relacionado al funcionamiento de los ventiladores, y 4 salidas 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 el paro de emergencia (utilizan un mismo piloto) del mismo. De esta manera se observa que este PLC controla 2 variables totalmente relevantes para este trabajo de grado, las cuales son la temperatura y la humedad relativa.



Figura 27. PLC Unitronics *Vision 230*

El PLC *Vision 230* se colocó 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 Autonics THD-W1-C de salida normalizada de 4-20 mA (ver Tabla 7). Gracias a este sensor se facilitó la conexión con el PLC.

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 Ω (500 VDC mega)
Resistencia dieléctrica	500 VCA 50/60 Hz por 1 minuto \pm 0.3 kV onda cuadrada de ruido
Resistencia al ruido	(ancho de pulso:1 μ s) por un simulador de ruido
Protección	IP65
Temperatura ambiente	-20 °C ~ 60.0 °C
Temperatura de almacenamiento	-20 °C ~ 60.0 °C



Figura 28. Sensor de humedad y temperatura

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). Dependiendo de las plantas se puede necesitar de 200-400 W/m². Se colocan a 10 cm del extremo de las plantas al no haber riesgo de excesivo calor. Su costo de instalación es elevado debido a las reactancias y al ocupar mucha superficie sombrean mucho 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 tiene que ser lo más parecida posible 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 amanecer 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), con el objeto de permitir mejores resultados y de crear 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 radiación ultravioleta. Esta radiación excita una sustancia fluorescente con la que se recubre la parte interior del tubo, transformando 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, n.d.).

“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, n.d.).

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, n.d.).

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

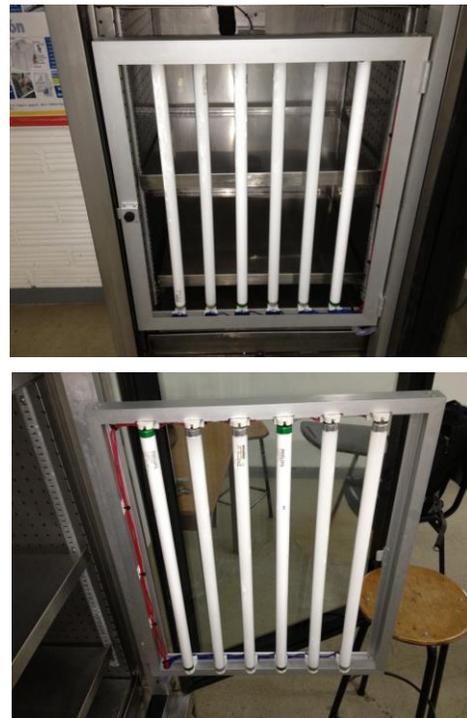


Figura 29. Instalación de tubos fluorescentes

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), ya 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.

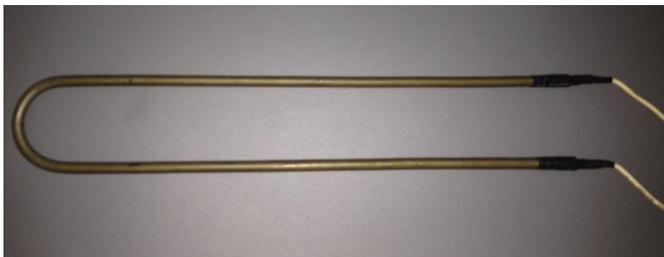


Figura 30. Resistencia eléctrica por aire forzado de 1500 W



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, garantizando la seguridad de los operarios y de las instalaciones en las cuales se encuentran ubicados” (Tablero eléctrico, n.d.).

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 decisión 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 60x60x35 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

Resistencia Eléctrica
de 1500 WSensor de Humedad y
TemperaturaLámparas Fluorescentes
de 17 W c/uCompresor de
1/5 HP y 2000 BTU/hEvaporador de Tubos y
Aletas de 960 BTU/hVentiladores Axiales de
200 cfm c/uCableado
GabineteHumidificador de
Resistencia
Sumergida
de 1 kW

Detector de Nivel

Condensador de
Aire de 2770 BTU/h

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 (Perez *et al.*, 2008). No es necesario conocer en detalle las interacciones entre los componentes que forman dicho sistema, ya que sólo 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 éste 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 éste 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, flujo

y entre otras) para observar su respectiva variación en el tiempo” (González, 2002). Se debe tener cuidado al momento de realizar los cambios, ya 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 éste, 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 (Perez *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 cual el sistema estudiado presenta un comportamiento lineal, con el fin de facilitar los estudios matemáticos posteriores a realizar con él (Perez et al., 2008).

El modelo matemático es válido sólo 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 establecieron 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, ya 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 ésta por sobrecalentamiento. Gracias a esto, se pasó a controlar en lugar de tres actuadores, sólo dos de ellos, ya que 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, ya que éste superaba fácilmente la resistencia de calefacción, es decir, a pesar de que la resistencia se encontraba encendida todo el tiempo, la temperatura disminuía en lugar de aumentar, además de lograr temperaturas inferiores a la requerida 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, ya que si éste permanecía apagado todo el tiempo sólo 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, todo el tiempo.

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

El fabricante del compresor recomienda un ciclo de trabajo no mayor de 4 a 5 veces por hora, dando a entender como ciclo de trabajo el tiempo de encendido y de apagado, sin embargo el

tiempo de apagado no debe ser inferior a 6 min 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 éste 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 15 min, de los cuales 7 min se encuentra encendido y los otros 8 min restantes se encuentra 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 como 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.

5.1. PWM (*Pulse-Width Modulation*)

“La modulación por ancho de pulsos (MAP o PWM, siglas del inglés, *Pulse-Width 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) y 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 modifica la frecuencia de la salida, sólo cambia el tiempo en que la salida se encuentra encendida o apagada (Schneider Electric, 2011).

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	-

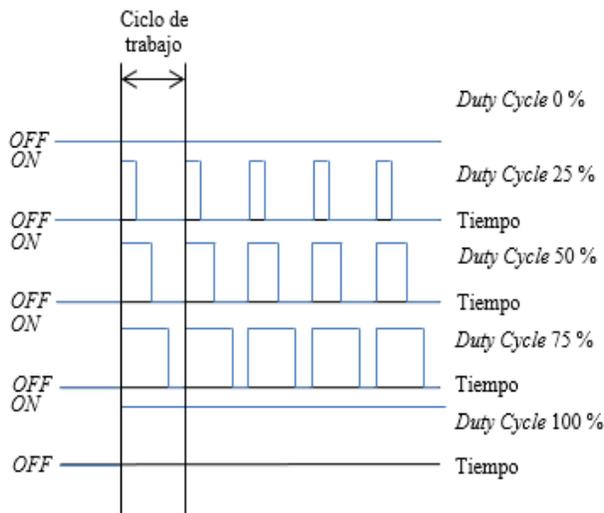


Figura 38. PWM

5.2. Modelamiento estático y dinámico de los actuadores controlados

Los modelos estáticos ignoran las variaciones en el tiempo, ya que representan las relaciones del sistema cuando éste no presenta ningún cambio en su salida, es decir, se encuentra “quieto” o en equilibrio (JLC, 2012). “Para realizar el registro de la curva

característica estática, se debe esperar a que el régimen transitorio haya terminado, y a que la variable de salida llegue a su valor final estacionario” (Control de procesos, 2006). Gracias a esta curva es posible determinar la zona y punto de operación de un actuador determinado.

Es posible conocer la trayectoria temporal específica de algún elemento, gracias al modelo dinámico del mismo (Carmen, 2002), ya que muestra sus cambios a través del tiempo, desde el momento que se inicia y finaliza una prueba concreta (JLC, 2012).

El modelo dinámico de un sistema se puede obtener de dos formas:

1. Polarizar subiendo lentamente hasta el punto de operación, luego aplicar un paso positivo y luego uno negativo de la misma amplitud, dejando estabilizar en cada caso. Este tipo de prueba se debe repetir varias veces.
2. Polarizar subiendo lentamente hasta el punto de operación, luego aplicar un paso positivo, luego uno negativo y luego otro negativo, y luego otro más positivo, dejando estabilizar en cada caso. Los diferentes pasos aplicados en este tipo de prueba deben ser de la misma amplitud.

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 realizar 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 5 min.

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 6 h, pero gracias a este proceso fue posible conocer la planta con la que se está trabajando, además de detectar una serie de problemas y recomendaciones que se deben tener en cuenta a la hora de trabajar con ella.

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

<i>Duty Cycle</i> (%)	Rango de temperatura (°C)	Rango de humedad (%HR)
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 aumentando el *duty cycle* de la resistencia de calefacción de 310 W desde el 0 %

<i>Duty Cycle</i> (%)	Rango de temperatura (°C)	Rango de humedad (%HR)
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

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 ± 2 °C en cada *duty cycle*, oscilación generada gracias al ciclo intermitente del compresor.

Los resultados obtenidos no sólo 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 como este mismo actuador afecta a la humedad relativa del recinto, la cual presenta generalmente 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 dió 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, ya que a medida que se aumenta el *duty cycle* de la resistencia de calefacción, la temperatura aumenta, y si éste disminuye, la temperatura 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 aumentando el *duty cycle* desde el 0 % y disminuyendo 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 cuál 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 %, ya 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, dió como resultado una curva (ver Figura 39) que presenta valores totalmente diferentes a los esperados, además de presentar oscilaciones inconsistentes de una amplitud de ± 6 °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 está comprometida su vida. Razón por la cuál 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 2 h. Al llegar al punto Q, se espera a que se estabilice 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 %.

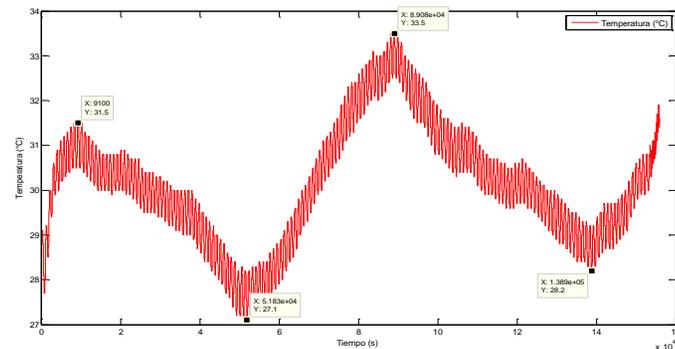


Figura 39. Curva de polarización con un *duty cycle* del 65 % (punto Q)

Al comparar las gráficas de las Figuras 39 y 40 es posible observar como 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 sólo sean de ± 4 °C, todavía se consideran inadecuadas, ya que sobrepasa 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.

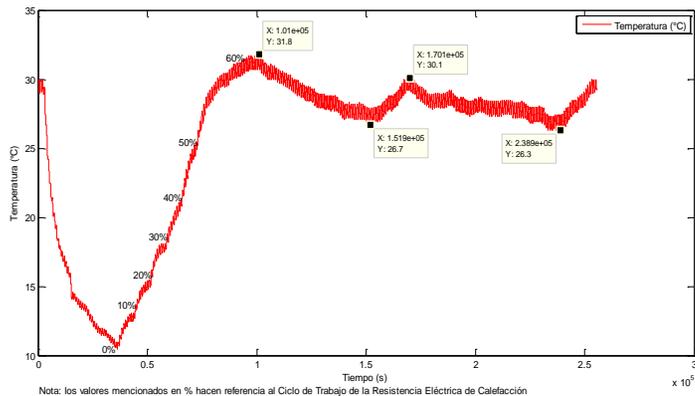


Figura 40. Curva de polarización con un *duty cycle* del 60 % (punto Q)

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

<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

Tabla 14. Nueva 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)
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

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, 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.

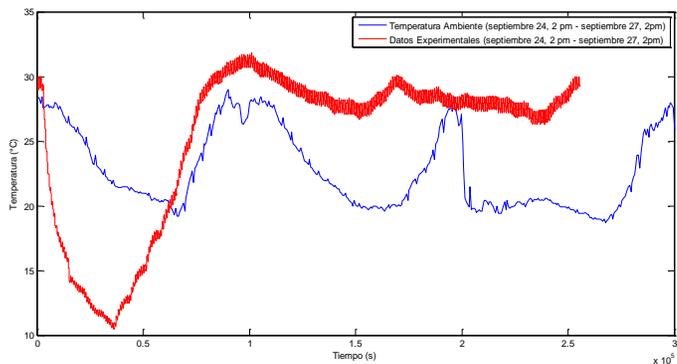


Figura 41. Perturbación de la temperatura ambiente

Estas pruebas no sólo 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 cual 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 sólo 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.

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, ya 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 % éste 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* sólo se daban cuando la temperatura alcanzaba la estabilización o una oscilación en un rango definido.

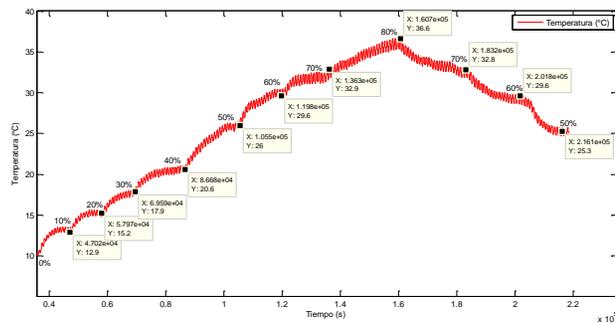


Figura 42. Curva dinámica de la resistencia de 310 W de calefacción

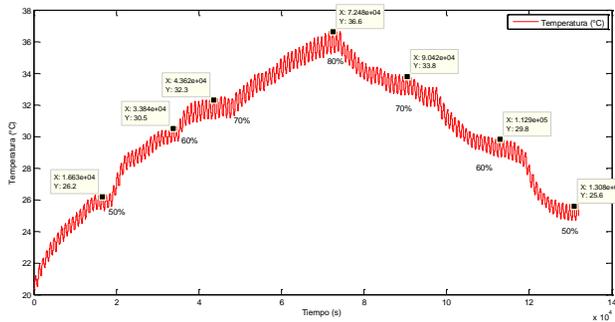


Figura 43. Curva dinámica de la resistencia de 310 W de calefacción en la zona de operación

En este caso la polarización no se realizó aumentando el *duty cycle* cada 2 h desde el 0 % como se había realizado en las pruebas anteriores, ya 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 se encontraba aumentando rápidamente. Por este motivo, a partir del 30 %, el *duty cycle* se aumentaba cada 4 h en pasos del 10 % con el fin de obtener una curva más suave con relación a las pruebas anteriores.

De esta manera es posible observar la dinámica del sistema en la zona de interés y el modelo matemático de dicho actuador se obtendría al realizar un promedio entre los valores calculados en cada uno de los pasos realizados dentro de la zona de operación escogida.

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 cuales 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 encuentra lleno y por lo tanto el piloto que indica el nivel del agua se encuentra 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 seguía aumentando, ya que a pesar de que la resistencia del sistema de humidificación se encontraba apagada, el agua del depósito en donde ésta se encuentra aún permanece caliente, lo que lleva a aumentar poco a poco la humedad relativa del sistema sin la necesidad de encenderlo nuevamente. Esto da a entender que el tiempo de encendido debe ser pequeño en comparación al 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 sólo 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 3 min.

Inicialmente, se buscó el valor máximo del *duty cycle* al cuál se sometería este actuador, ya que se podría dar el caso que valores inferiores al 100 % fueran lo suficientemente altos 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 Figura 45), en donde es posible observar el amplio rango de oscilación con una magnitud del 30 % de la variable en cuestión.

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 sólo 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 dió 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.

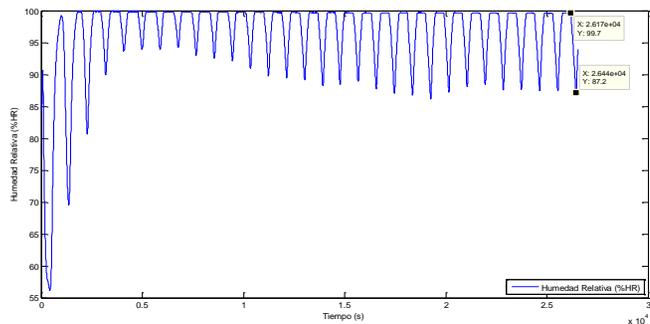


Figura 44. Comportamiento de la humedad relativa con un *duty cycle* del 60 %

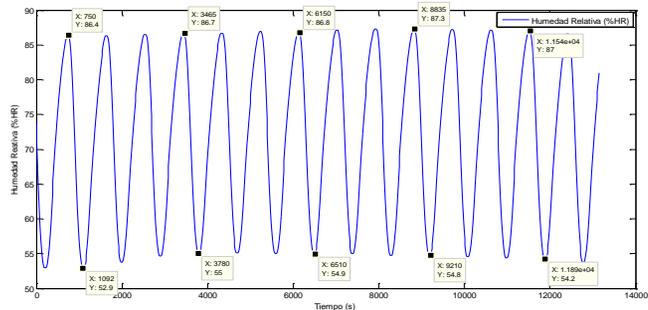


Figura 45. Comportamiento de la humedad relativa bajo las condiciones normales de operación del sistema

Esta variación en la humedad relativa se debe al ciclo intermitente al cuál se encuentra sometido el sistema de refrigeración, ya que mientras éste se encuentra encendido, la humedad relativa logra alcanzar los valores requeridos por los ácaros, sin embargo durante los próximos 8 min 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, ya que la humedad relativa se logra estabilizar en un valor determinado o presenta variaciones aproximadamente de ± 1 % (ver Figura 46).

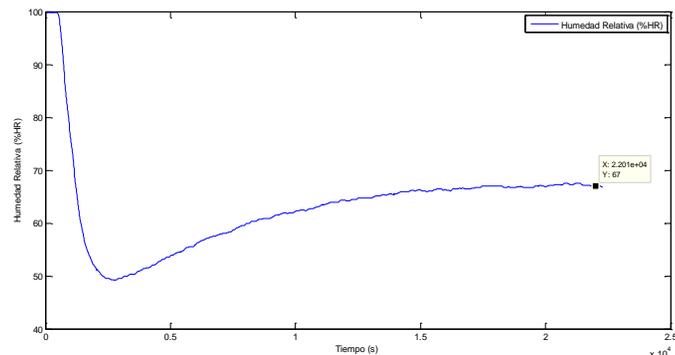


Figura 46. Comportamiento de la humedad relativa bajo un funcionamiento continuo del sistema de refrigeración y ventilación

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 sólo sería necesario para llevar la humedad relativa a un valor determinado por medio de un PWM con un ciclo de trabajo de 1 min y un *duty cycle* del 50 %. Este sistema sólo 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 sólo 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 obtuvieron 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 tuvieron en cuenta el

aumento de temperatura ocasionado por el sistema de humidificación cuando se encuentra 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*, ya 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, ya que de esta manera, es 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 %.

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

<i>Duty Cycle</i> (%)	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

La temperatura en el interior del recinto se ve afectada no sólo 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 cuál tiene una pequeña variación al depender qué tan caliente o frío es ese día.

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

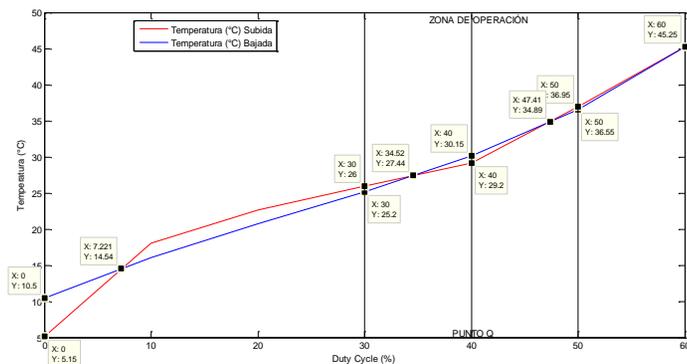


Figura 47. Curva estática de la resistencia de 1500 W del sistema de calefacción

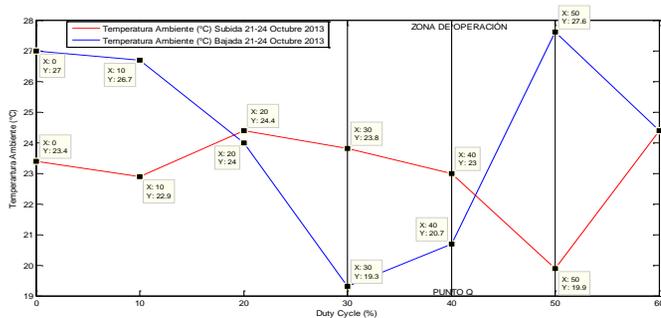


Figura 48. Curva estática de la resistencia de 1500 W del sistema de calefacción al restar la temperatura ambiente en cada *duty cycle*

Esta zona de operación posee valores de humedad relativa cercanos a los deseados, sólo 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) se obtuvo, en este caso, polarizando 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 4 h, a partir de valores cercanos al valor mínimo de temperatura alcanzado en el interior del recinto. Al llegar al punto Q, se aplica un paso positivo, luego un negativo y luego otro negativo, y luego otro más positivo,

dejando estabilizar en cada caso. Los pasos aplicados a partir del punto de operación fueron de una amplitud del 10 %.

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 dan bajas temperaturas, ya que estas disminuciones no afectan mucho el sistema gracias a la nueva resistencia de calefacción instalada. La noche y la madrugada logra disminuir la temperatura en el interior del recinto aproximadamente unos 0.5 °C.

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

<i>Duty Cycle</i> (%)	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 %

<i>Duty Cycle</i> (%)	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

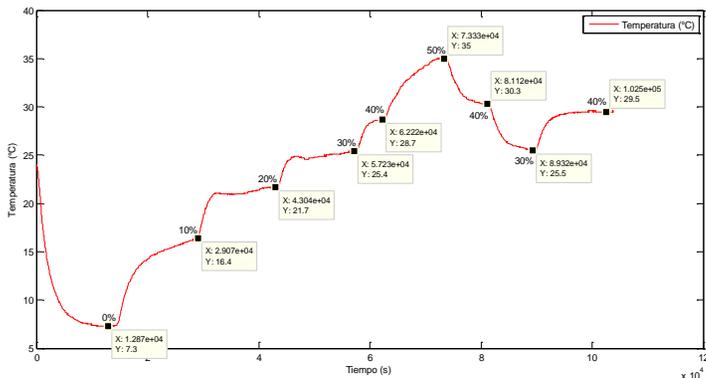


Figura 49. Curva dinámica de la resistencia de 1500 W del sistema de calefacción

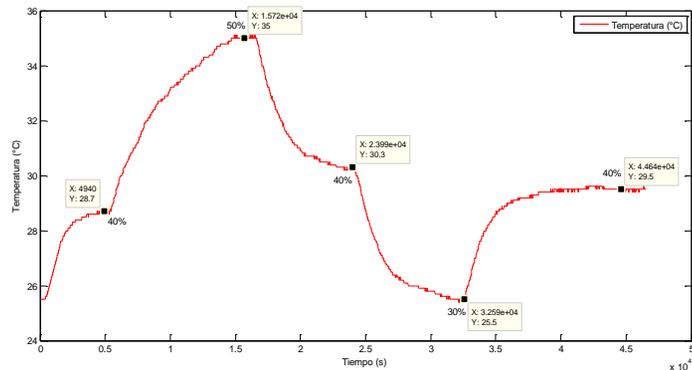


Figura 50. Curva dinámica de la resistencia de 1500 W del sistema de calefacción en la zona de operación

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

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

en donde, K , τ 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,

$$K = \frac{Y_{SS}}{X_{SS}}, \quad (2)$$

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

“La constante 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, ya 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).

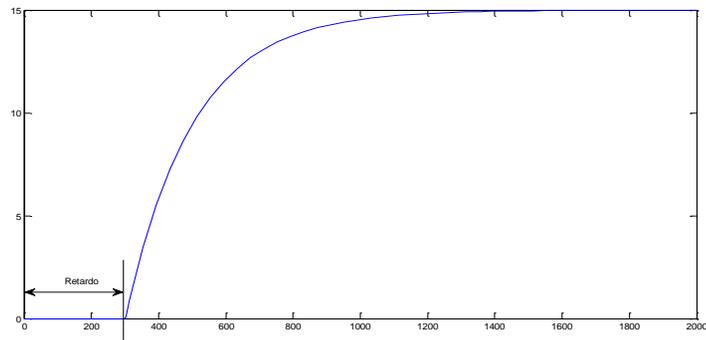


Figura 51. Curva característica de un sistema de primer orden con retardo

Como el término utilizado para representar un retardo es no lineal, éste debe ser aproximado mediante alguna función lineal, si desea ser utilizado 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,

$$e^{-Ts} = \frac{1}{1 + Ts + \frac{T^2s^2}{2}} \quad (3)$$

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, con el fin de verificar cuál de los dos asemejan 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,

$$G_2(s) = \left(\frac{K}{\tau s + 1} \right) \left(\frac{1}{1 + Ts + \frac{T^2s^2}{2}} \right) \quad (4)$$

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	τ (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	τ (s)	T (s)
100	4.95	0.0495	2388.75	185.25

$$G_{-1}(s) = \frac{0.0495}{2388.75s + 1} e^{-185.25s} \quad (5)$$

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

$$G_{-2}(s) = \frac{0.0495}{4.099 \times 10^7 s^3 + 4.597 \times 10^5 s^2 + 2574s + 1} \quad (6)$$

Se utilizó el software MATLAB® y Simulink® para verificar que el modelo matemático obtenido si 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 graficas obtenidas por medio de la simulación con los resultados experimentales, es posible observar su gran similitud en la zona de operación, ya 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 transferencias 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.

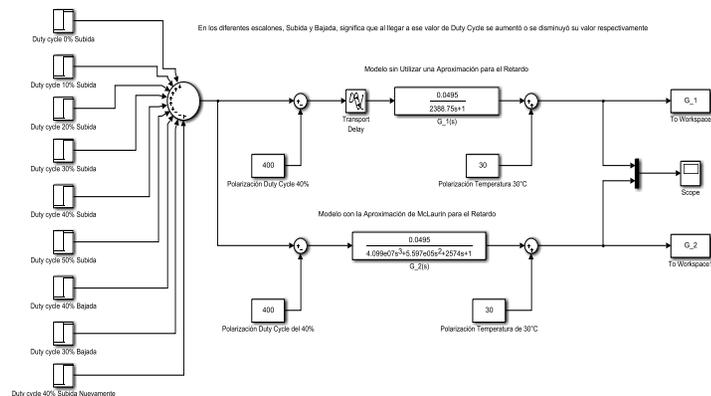


Figura 52. Diagrama de bloques implementado en Simulink® para obtener la curva dinámica

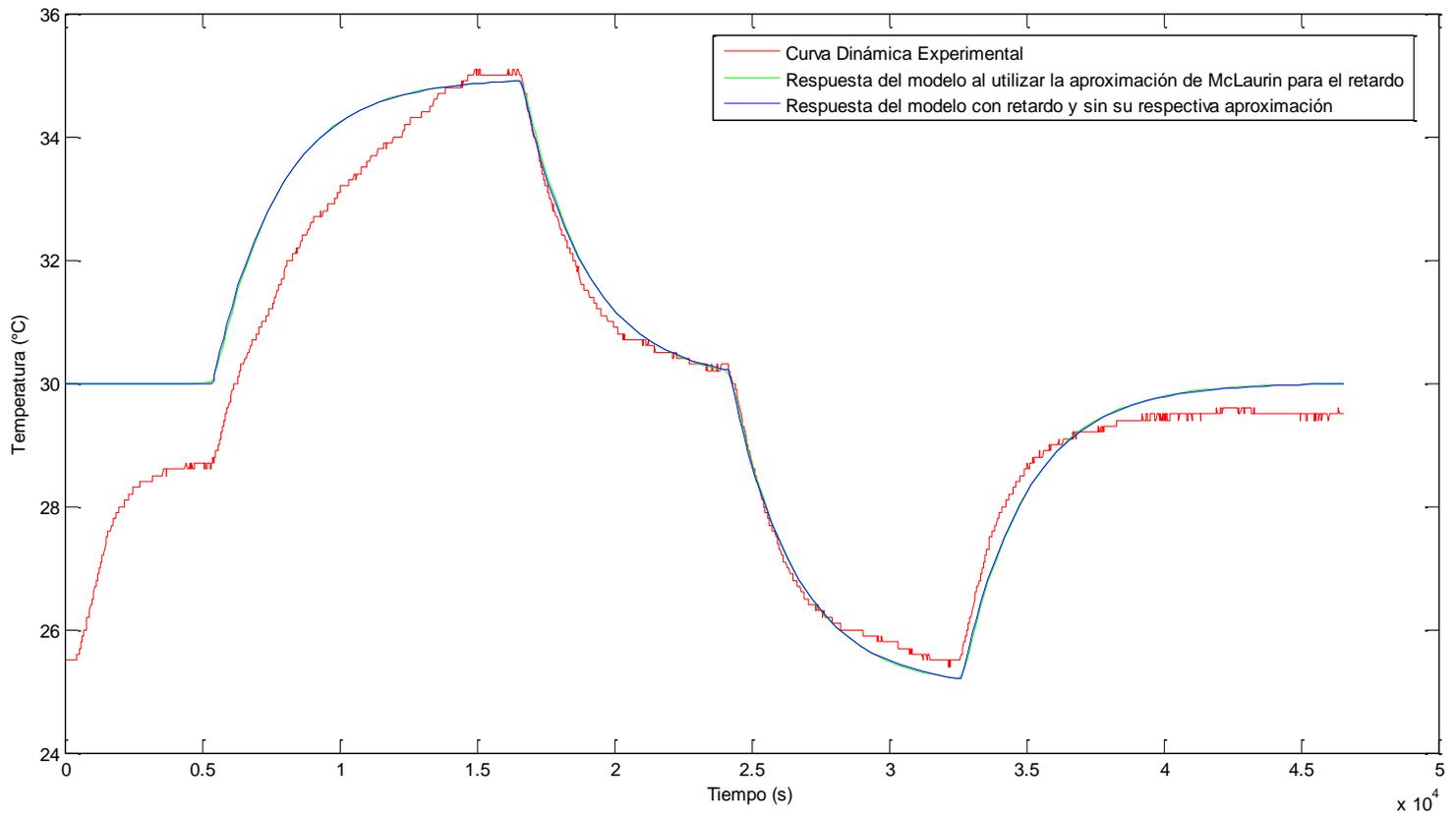


Figura 53. Comparación entre curva dinámica experimental y curvas dinámicas simuladas

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 a nivel 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.

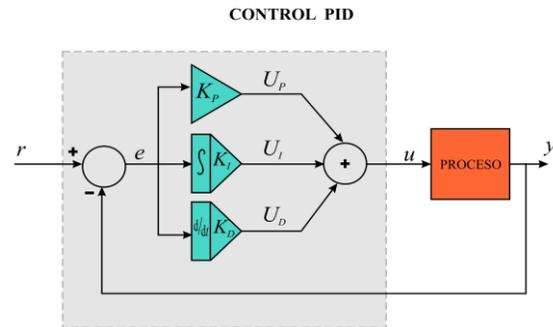


Figura 54. Control PID en lazo de realimentación. Reproducida con permiso de Botero (2009)

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 usada 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 error. 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 proporcionalidad que están ligadas a cada una de las acciones (Améstegui, 2001).

La ecuación en el dominio del tiempo del controlador PID, excluyendo la polarización, es

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

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_{-\infty}^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (7)$$

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 éste tratando de llevarlo a cero. Por último, la parte derivativa mide la velocidad de los cambios en la señal de error, regulando la velocidad de respuesta a la acción de control.

A pesar que los controladores PID tienen sólo 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 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 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 *antivindup* 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, pasando por 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 programabilidad. 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 campo 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, caudalímetro y entre otros” (Botero, 2009).
- “Un controlador, que genere la señal que gobierna al actuador” (Botero, 2009).
- “Un actuador, que modifique al sistema de manera controlada. Puede ser por ejemplo una válvula, resistencia eléctrica, motor y 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), obteniendo así la señal de error, que determina en cada instante la diferencia que hay entre el valor deseado y el valor medido. Usando 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 3 componentes de un controlador PID propiamente dicho para generar las 3 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 esta componente del PID únicamente se encuentra activa cuando el error es diferente de cero. Al tratar con sistemas tipo 0 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 elevados que se encarguen de eliminar por completo el error permanente, ya 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 incluyendo y configurando la acción integral y, si al agregar dicha acción fuese necesario proveer otra para evitar la inestabilización del sistema, entonces 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:

$$BP \propto \frac{1}{Kp} \times 100 \%, \quad (8)$$

“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 revertir 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, entendiendo 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 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 I, (uno) 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 respetando 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

$$Ki = \frac{Kp}{T_i}, \quad (9)$$

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 (Kd) 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 corrigiéndolo 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

$$K_d = K_p T_d \quad (10)$$

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, éste se debe expresar con una ecuación en diferencias cuya solución sea aproximada a la de la ecuación integro-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,

tk, 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, aún 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, es decir 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 integrando el error, ocasionando 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, ya que la planta posee un retardo considerable y con este método se logró describir de manera más exacta, pero posteriormente fue mejorado utilizando el método de Chien, Hrones y Reswick. No se utilizó el método del lugar de las raíces, porque este método 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 puede hallar los diferentes controladores (ver Tabla 21) y verificar cómo se comporta el sistema luego de implementarlos.

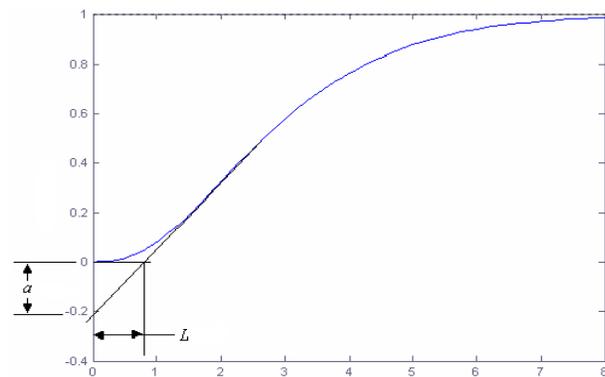


Figura 55. Parámetros respuesta al paso del sistema método 1 Ziegler-Nichols

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

	Kp	Ti	Td
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.

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 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” (Ososrio, 2011).

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

	Kp	Ti	Td
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.

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 aumentando el *duty cycle* 10 % y disminuyéndolo 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 el diseño del control PID por el método 1 y utilizando la Tabla 23 se hallaron las constantes K_p , K_i y K_d de los controladores, colocando especial atención en el PID obtenido.

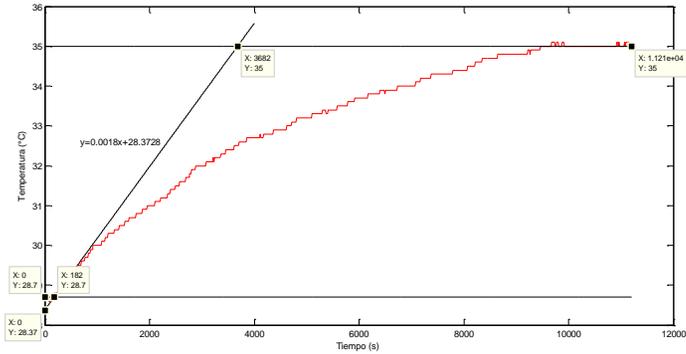


Figura 56. Duty cycle 40 % - 50 %

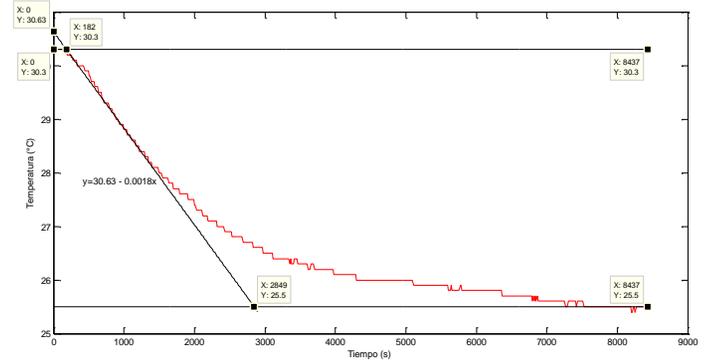


Figura 58. Duty cycle 40 % - 30 %

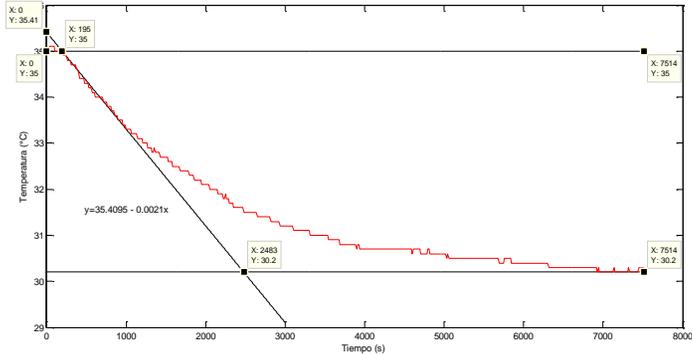


Figura 57. Duty cycle 50 % - 40 %

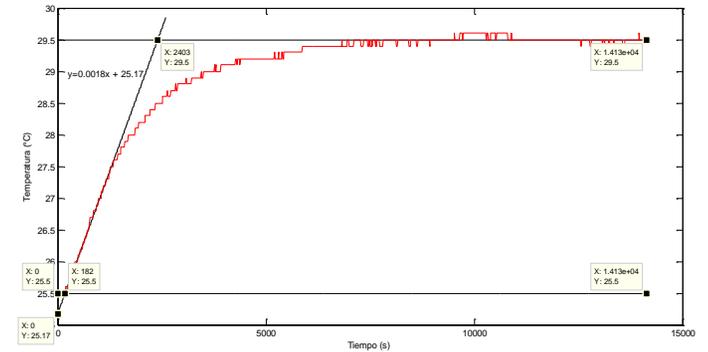


Figura 59. Duty cycle 30 % - 40 %

Tabla 23. Parámetros método 1 Ziegler-Nichols promediados

a	L
0.35	185.25

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

K_p : 3.4286

K_i : 0.0093

K_d : 317

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.

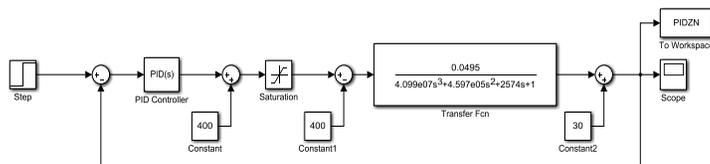


Figura 60. Diagrama de bloques control PID método 1 Ziegler-Nichols

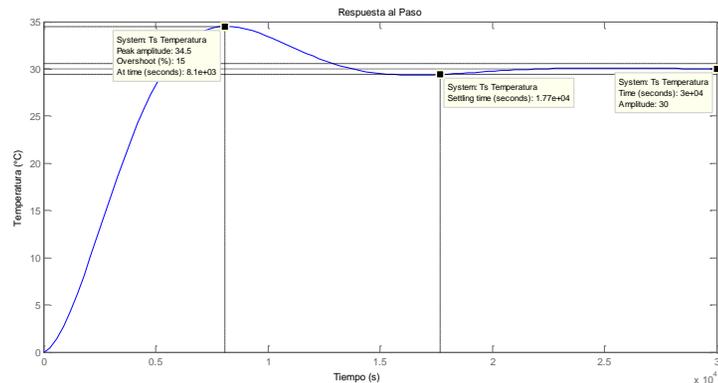


Figura 61. Respuesta al paso 40 % de *duty cycle* (30 °C) del sistema controlado por método 1 Ziegler-Nichols

Ajustando las constantes del control PID obtenidas anteriormente, ya que se poseía un sobrepeaso 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

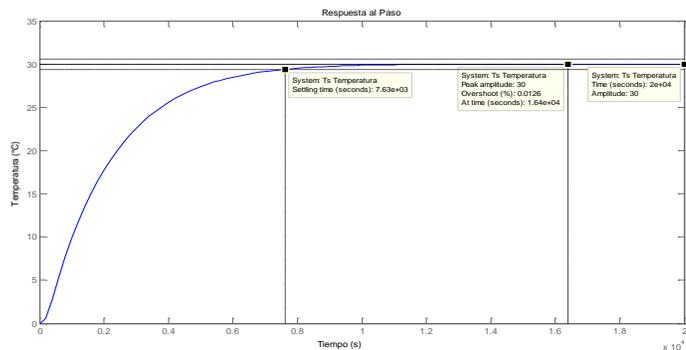


Figura 62. Respuesta Control PID ajustado método 1 Ziegler-Nichols

Este control no fue implementado en la Cámara de Ambiente Controlado, ya 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, ya que al hallar la ganancia crítica (K_u) por medio del diagrama del lugar de las raíces, ésta resulta ser 563.05, es una ganancia muy alta y no es posible implementarla experimentalmente, ya que esto

encendería la resistencia de calefacción a más del 100 % y podría generar altas temperaturas por consiguiente altas presiones, saturando el sensor y posiblemente afectando 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 de la función de transferencia de la planta, que es el tiempo 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).

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

	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 %

	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

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 %, ya que en términos de diseño y de acuerdo a 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 (τ) más rápido del sistema (ver Tabla 26).

Tabla 26. Parámetros método CHR sobrepaso 0 %

a	L	T
0.35	185.25	1690

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.

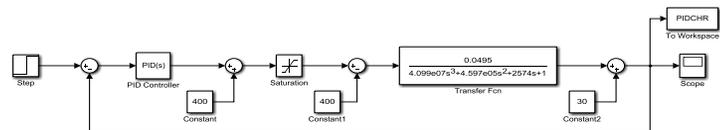


Figura 63. Diagrama de bloques control PID método CHR sobrepaso 0 %

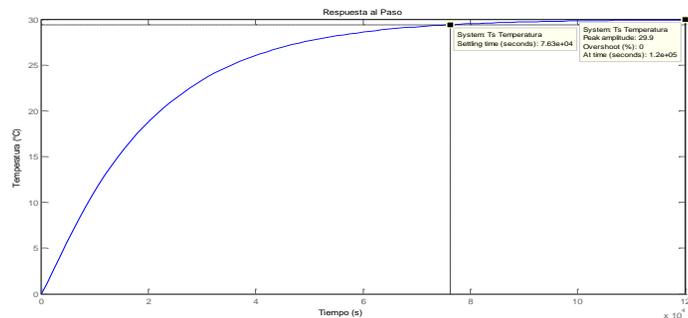


Figura 64. Respuesta al paso 40 % de *duty cycle* (30 °C) del sistema controlado por método CHR sobrepaso 0 %

Ajustando las constantes del control PID obtenidas anteriormente, ya que se poseía un tiempo de estabilización muy lento, se obtiene una mejor respuesta (ver Figura 65) del sistema controlado:

K_p : 32

K_i : 0.0189

K_d : 0.0864

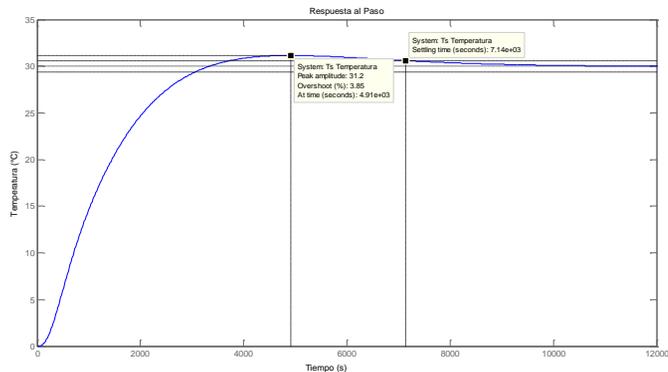


Figura 65. Respuesta Control PID ajustado método CHR sobrepasso 0 %

Este control se implementó en la Cámara de Ambiente Controlado, ya 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 sobrepasso muy pequeño, este sobrepasso se encuentra entre los parámetros establecidos en el diseño del controlador, el cual es que no se tenga un sobrepasso 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 sobrepasso 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.

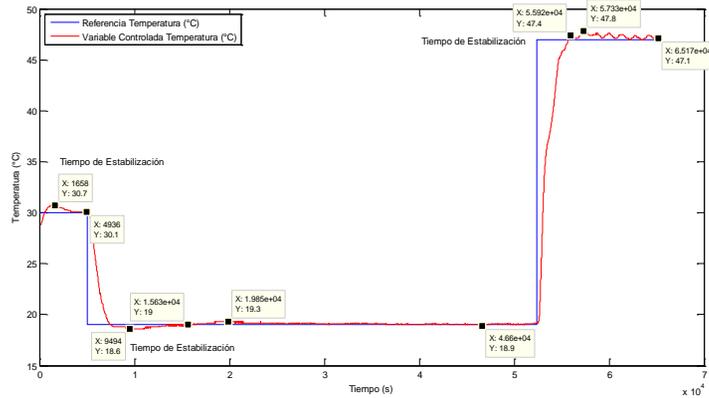


Figura 66. Control PID temperatura sin perturbación con referencia 30 °C, 19 °C y 47 °C (día y noche)

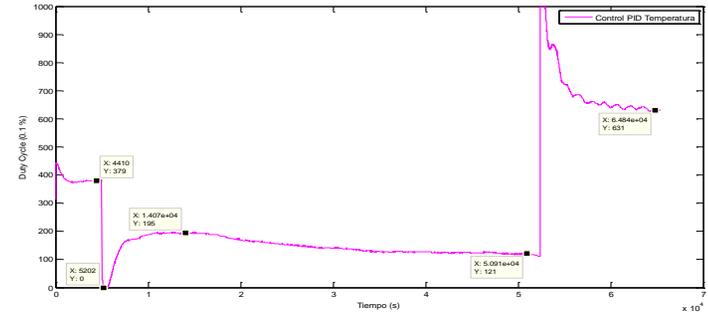


Figura 67. Duty cycle control PID temperatura sin perturbación (día y noche)

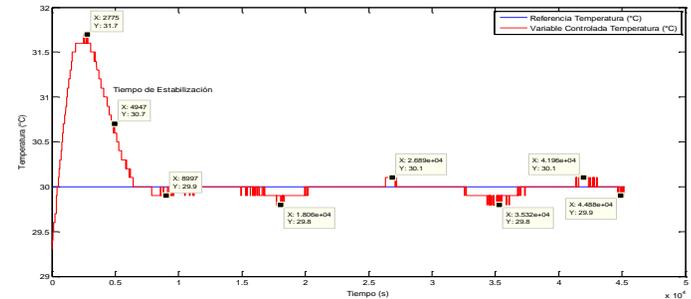


Figura 68. Control PID temperatura referencia 30 °C con perturbación control *ON-OFF* humedad relativa referencia 50 %HR (día y noche)

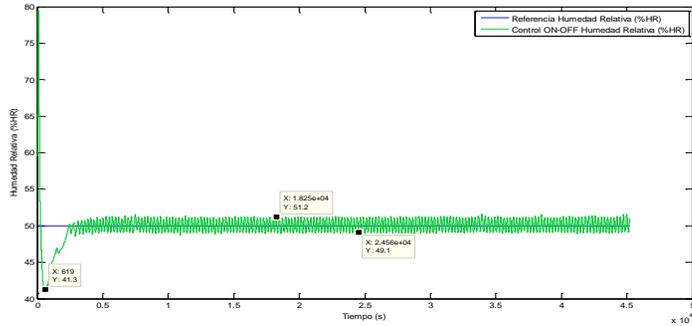


Figura 69. Control *ON-OFF* humedad relativa referencia 50 %HR (día y noche)

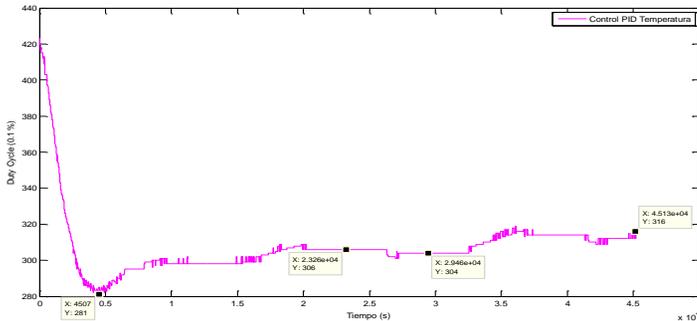


Figura 70. *Duty cycle* control PID temperatura con perturbación humidificador 50 %HR (día y noche)

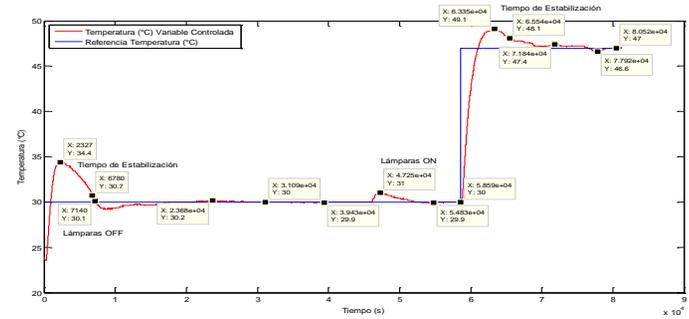


Figura 71. Control PID temperatura referencia 30 °C (día y noche) y 47 °C con perturbación control *ON-OFF* humedad relativa 50 %HR y lámparas fluorescentes encendidas

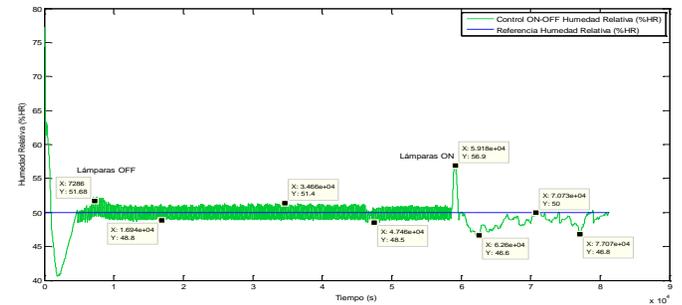


Figura 72. Control *ON-OFF* humedad relativa 50 %HR con perturbación lámparas fluorescentes encendidas (día y noche)

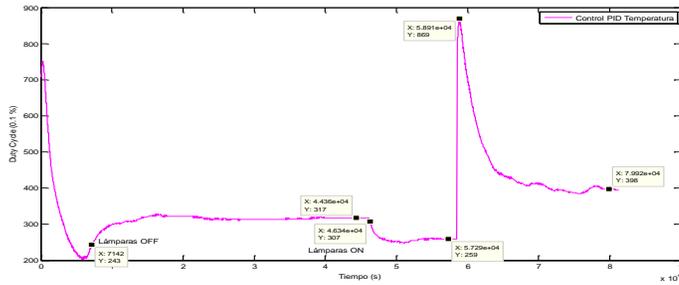


Figura 73. Duty cycle control PID temperatura con perturbación humidificador 50 %HR y lámparas fluorescentes encendidas (día y noche)

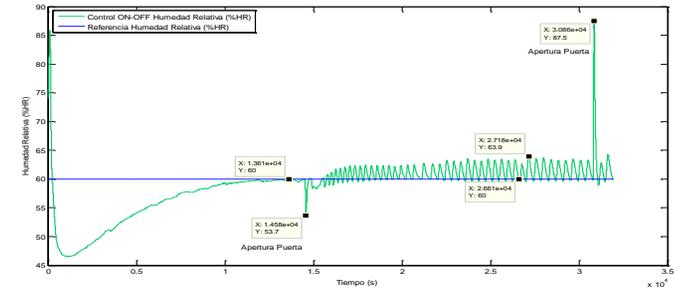


Figura 75. Control ON-OFF humedad relativa 60 %HR con perturbación lámparas fluorescentes encendidas y apertura de puerta

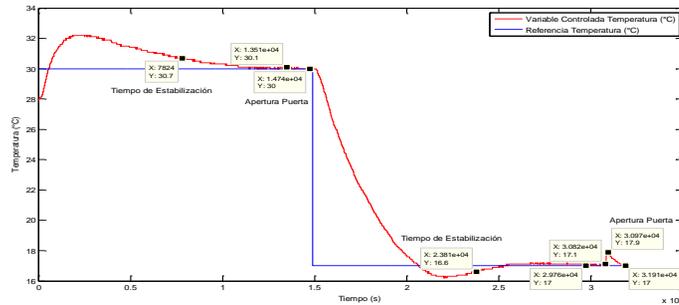


Figura 74. Control PID temperatura referencia 30 °C y 17 °C con perturbación control ON-OFF humedad relativa 60 %HR, lámparas fluorescentes encendidas y apertura de puerta

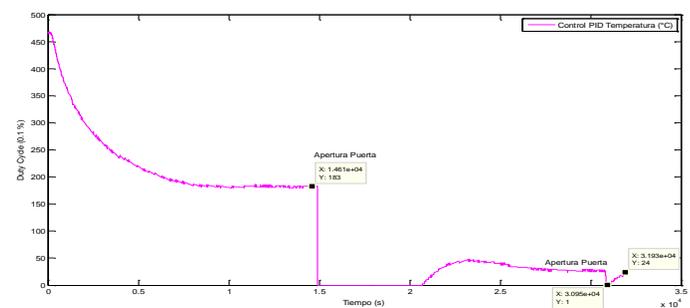


Figura 76. Duty cycle control PID temperatura con perturbación humidificador 60 %HR, lámparas fluorescentes encendidas y apertura de puerta

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 superviva dentro de la Cámara de Ambiente Controlado son las adecuadas.

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 a nivel local como a nivel 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. Existiendo 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 Terminal 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 éste diga.

Un dispositivo conectado al bus ejerce de Maestro solicitando 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).

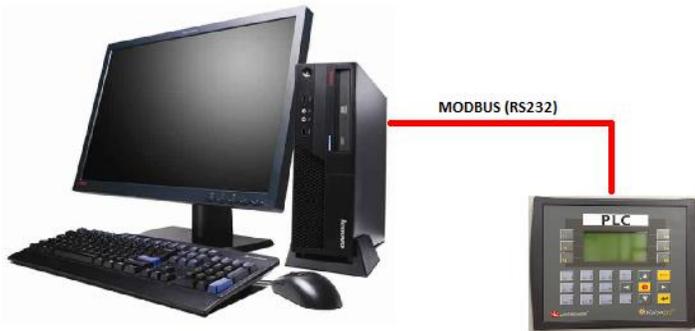


Figura 77. Funcionamiento Modbus PC (Maestro) - PLC (Esclavo)

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 sólo puede ejercer la función de recompilar información de los Esclavos mediante preguntas, sino que puede interactuar con ellos o alterar su estado, pudiendo escribir además de leer información en cualquiera de ellos (Xmcarne, 2013).

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).

Tabla 27. Tabla de datos protocolo Modbus.

Dirección Modbus	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)

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, está 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).

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 sólo 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 programas se configuró de manera correcta el protocolo Modbus.

En Visilogic se hizo uso de bloques de inicialización, comunicación y escaneo, utilizando el puerto 1 del PLC, por este puerto se hizo uso del protocolo Modbus sobre RS-232, en este caso, no se utilizó RS-232 plano porque a una velocidad de 115200 bps no se garantiza una buena transmisión de datos, ya 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 respectiva 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 detallada 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 4 displays diferentes. Los tres primeros tienen una duración de 5 s 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 3 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 sólo basta con presionar ESC del teclado del PLC.

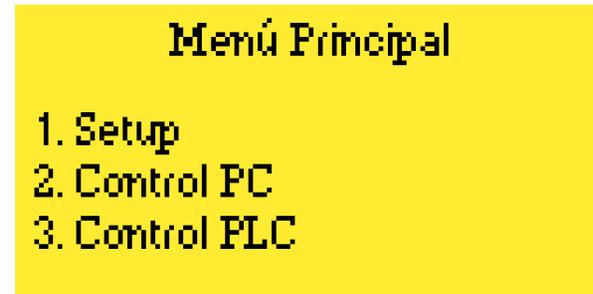


Figura 78. Menú principal

Ya sea que el control lo realice el PLC o un computador externo, siempre se tiene cuenta el estado del detector de nivel del sistema de humidificación, el cual al momento de activarse espera 5 min para revisar su estado de nuevo. Si sigue activado, a pesar de haber pasado los 5 min, 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 5 min 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 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 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 1 del teclado del PLC una vez que se encuentra en el menú principal (ver Figuras 79 y 80).

Este display da a conocer 3 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, sólo debe presionarse la tecla indicada en la parte inferior derecha en cada una de ellas.



Figura 79. Setup. Opciones 1 y 2

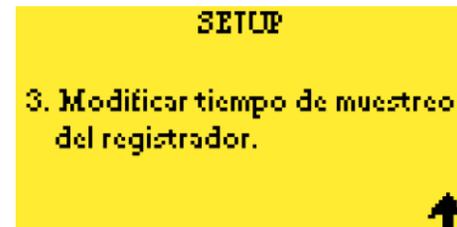


Figura 80. Setup. Opción 3

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	06:00
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

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 determinado, 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 modificar el tiempo en el que se van a registrar los datos, sólo 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*.

9.1.2. 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 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.

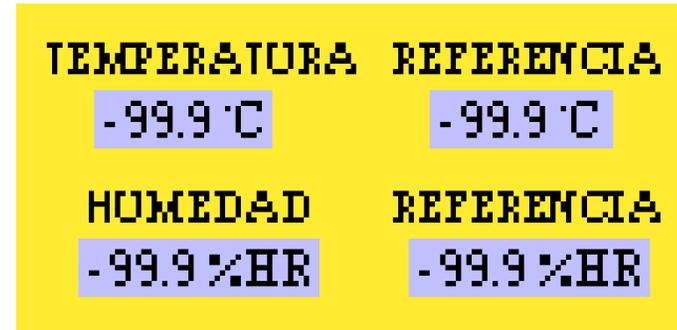


Figura 81. Menú control PC

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

9.1.3. Menú principal. Control PLC

Con sólo presionar el número 3 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 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, 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 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, gracias a la ayuda del software DataXport, 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®, 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 (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® 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® 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.

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 al 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
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	06:00
MI 95	Hora de apagado de los tubos fluorescentes de 3500K	00:00 - 23:59	11:00

9.2.1. Menú control PID temperatura

Este menú es catalogado como el menú principal de la aplicación (ver Figura 82), 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, se configuran las constantes que determinan la acción PID, se configura la referencia deseada de temperatura, se visualiza la temperatura actual del sistema (en indicador numérico y termómetro), se visualiza el estado de encendido y apagado de los ventiladores, compresor y calefacción, se visualiza la acción de control, el error y el *duty cycle* escrito al PLC, se visualizan de manera gráfica la temperatura actual de la cámara y la referencia deseada por el usuario, se visualiza la hora y la fecha actual, se da la orden al controlador para realizar la acción de control y se da la orden de 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.

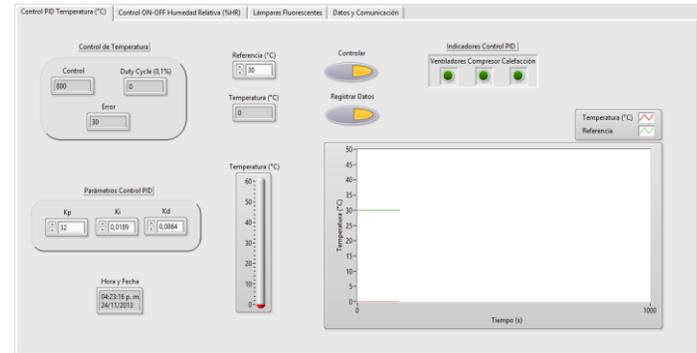


Figura 82. Menú control PID temperatura (°C)

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), ya 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 y se puede visualizar la hora y fecha actual.

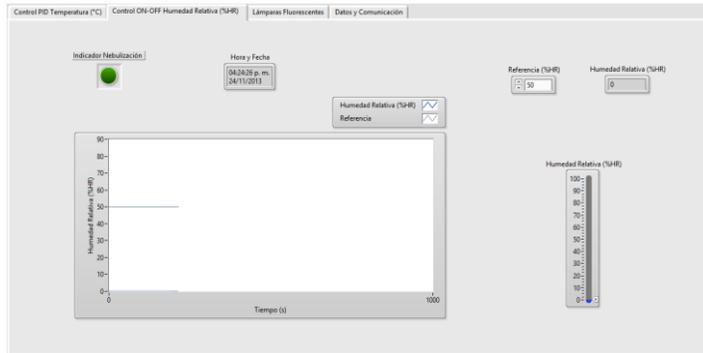


Figura 83. Menú control *ON-OFF* humedad relativa (%HR)

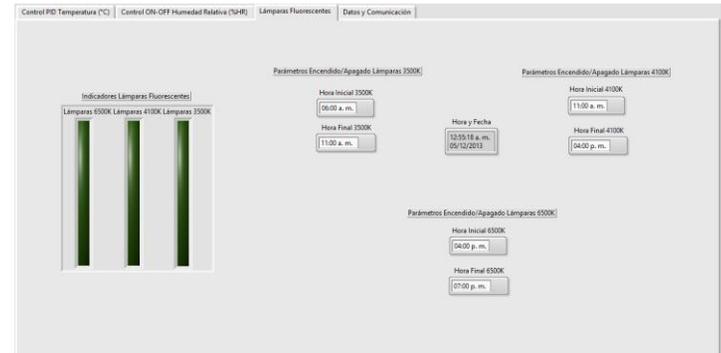


Figura 84. Menú lámparas fluorescentes

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 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, se visualiza la inicialización de la comunicación por medio del protocolo Modbus, se visualiza 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®.
- Software de control implementado en LabVIEW® 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®.
- Simulación del modelo matemático de la planta en Simulink® junto con la implementación de un controlador PID.
- Interfaz gráfica con el usuario.
- Interfaz gráfica en PLC Unitronics®.
- Interfaz gráfica en LabVIEW®.
- 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 de 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 donde 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, ya 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 sólo 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 teniendo 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 debe 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, ya que sus fuertes variaciones, pueden llegar a producir un aumento o disminución en la temperatura en el interior del recinto, convirtiéndose en una perturbación sobre la salida del proceso. El sistema de control diseñado actúa ante ésta y logra disminuir el efecto de esta perturbación. La temperatura ambiente por el simple hecho de ser variable afecta tanto positiva como negativamente el 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, ya 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.

REFERENCIAS

- Abbott, M.M., J. M. Smith y H. C. Van Ness (2007). *Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química*. (7ma Ed., pp. 319-323). México: Mc Graw Hill.
- Acosta G., A. (1994). *Biología y manejo de Tetranychus spp.* Flores. Revista Acopaflor 1 (2): 5-10.
- Acosta, A.; O. Acosta; L. Diaz y M. Yopez (2001). *Ciclo biológico de Tetranychus cinnabarinus Boisduval y Tetranychus urticae Koch en rosa, clavel y alstroemeria bajo siete ambientes*. Asocolflores 60: 25-39.
- Álvarez, M., S. Corp y L. Vásquez (2007). *Carga térmica en las cámaras del clima controlado que utilizan la energía solar*. En línea [<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar12/HTML/articulo04.htm>], consultado en 2011-07-31.
- Améstegui, M. (2001). *Apuntes de control PID*. Artículo publicable, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.
- Aponte, F. y O. R. Aponte (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 (2011). *Cámaras IBERCEX Fitotron*. En línea [http://www.ibercex.com/index_archivos/Page614.htm], consultado en 2011-08-28.
- Ayala, O.; R. Ferreto; M. Goitia; J. Marinich; E. Niquen-Bardales y A. Passenheim (2002). *Determinación de Tetranychus urticae (Koch) en Arachis hypogaea L.* XIII Reunión de Comunicaciones Científicas y Técnicas 2002. Facultad de Ciencias Agrarias – UNNE.
- Barrios, J.P. y D. Uribe (2012). *Diseño y construcción de una cámara de fermentación para la obtención de productos cárnicos madurados*. Tesis de pregrado, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.
- Bartolomé (2011). *El protocolo modbus*. En línea [<http://www.tolaemon.com/docs/modbus.htm>], consultado en 2013-05-09.
- Betancur, M. J. y L. F. Lennis (2009). *El PID digital básico*. Artículo publicable, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.
- Bitsingenio (2011). *¿Qué es un indicador luminoso?*. En línea [<http://www.bitsingenio.com/que-es-un-indicador-luminoso/>], consultado en 2013-06-11.
- Bolland, H. R.; Ch. W. Flechtmann y J. Gutierrez, (1998). *World catalogue of the spider mite family (Acar: Tetranychidae), with references to taxonomy, synonymy, host plants and distribution*. Brill Academic Publishers. Leiden. 392 p.
- Bolton, W. (2006). *Ingeniería de control*. (2da Ed., pp. 1-19). México: Alfaomega.
- Bonet (n.d.). *De lámparas más usuales*. En línea [<http://www.arqhys.com/contenidos/lamparas-uso.html>], consultado en 2013-05-08.
- Botánica morfológica (2013). *Morfología de las plantas vasculares*. En línea [<http://www.biologia.edu.ar/botanica/tema1/glosario1.htm>], consultado en 2013-01-19.

- Botero, M. E. (2009). *Elaboración de las notas de clases y material audiovisual del curso control digital*. Tesis de pregrado, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.
- Bricos (2013). *Interruptores Componentes y clasificación*. En línea [<http://bricos.com/2013/03/interruptores-electricos-clasificacion-y-componentes/>], consultado en 2012-15-01.
- Brodsky, A. B. y C. Naranjo (1976). *Introducción a la fisiología de insectos*. Serie 111.968, No. 1. Facultad de Biología. Universidad de Oriente (Santiago de Cuba). 275p.
- Calderón, L. A.; M. A. Guzmán y E. Rodríguez, (2010). *Reporte de práctica sobre controlador PWM*. En línea, [<http://www.slideshare.net/guestdb8ea2b/pwm>], consultado en 2013-10-20.
- Calderón, J. C. (2009). *Control de procesos multivariables mediante un sistema de control distribuido modificado*. Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Campoy, P. (2010). *Control de procesos industriales*. En línea [<http://ocw.upm.es/ingenieria-de-sistemas-y-automatica/control-de-procesos-industriales/Contenidos/Documentos/capitulo-3>], consultado en 2012-11-02.
- Carel (2012). *Humidificadores por resistencias eléctricas*. En línea [<http://www.humidification-for-life.com/Carel/showVoc eMenu.2puntOT?id=129>], consultado en 2011-12-02.
- Carles-Tolrá, M. (2002). *Catálogo de los Díptera de España, Portugal y Andorra (Insecta)*. Monografías SEA. Zaragoza, vol. 8, 323 p.
- Carmen, J. (2002). *Introducción a los modelos dinámicos*. En línea, [<http://mmc.geofisica.unam.mx/Bibliografia/Matematicas/ODE/Introduccion%20a%20los%20modelos%20dinamicos.pdf>], consultado en 2013-10-22.
- Casanova, J. M. (2012). *Coleópteros*. En línea [<http://miblogdebichos.Wordpress.com/coleopteros/>], consultado en 2013-01-19.
- CCI (2008). *Cámaras Walk-in*. En línea [<http://cci-calidad.blogspot.com/2008/11/camaras-walk-in.html>], consultado 2012-11-01.
- CCI (2009). *Cámaras de ambiente controlado*. En línea [<http://cci-calidad.blogspot.com/2009/08/camaras-de-ambiente-controlado.html>], consultado 2011-08-04.
- CCI (2010a). *Cámaras climáticas*. En línea [<http://cci-calidad.blogspot.com/2010/07/camara-climaticas.html>], consultado 2012-11-15.
- CCI (2010b). *Cámaras Walk-in*. En línea [<http://cci-calidad.blogspot.com/2010/05/camaras-walk-in.html>], consultado 2012-09-17.
- CCI (2011). *Cámara climática con regulación CO2*. En línea [<http://cci-calidad.blogspot.com/2011/10/camara-climatica-con-regulacion-de-co2.html>], consultado 2012-11-25.
- CCI (2012a). *Cámaras de simulación climática y envejecimiento ambiental acelerado*. En línea [http://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/2669/01-36.pdf], consultado 2011-11-20.
- CCI (2012b). *Cámaras climáticas*. En línea [<http://www.cci-calidad.com/camara02.htm>], consultado 2012-03-10.

- CCI (2012c). *Grandes cámaras visitables, climáticas y de ensayos*. En línea [http://www.cci-calidad.com/camara08.htm], consultado 2012-10-21.
- Cogliatti, J.I. (2008). *Control automático de temperatura e iluminación*, consultado 2011-07-31.
- Congote, L. y E. Rincón (2008). *Modelo didáctico de control de tensión para proceso textil*. Tesis de pregrado, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.
- Construmática (2013). *Estanqueidad*. En línea [http://www.construmatica.com/construpedia/Estanqueidad], consultado 2013-01-19.
- Control de procesos (2006). *Glosario de terminos Terminologia basica en control de procesos*. En línea, [http://istcatalina.blogspot.com/], consultado en 2013-10-17.
- Cooperativa de Mejoramiento Genético (2004). *Refrigeración mecánica*. En línea [http://www.icytal.uach.cl/efmb/asignaturas/Unidad%201%20286/Refrigeracion%20mec%C3%A1nica/Refrigeraci%C3%B3n%20Mec%C3%A1nica%20-%20Conceptos.pdf], consultado 2011-12-03.
- Corredor, D., G. Páramo, M. Sánchez (n.d.). *Tabla de vida y parámetros poblacionales fundamentales de tetranychus urticae koch (acari: tetranychidae) sobre rosa sp. en condiciones de laboratorio*. En línea [http://www.revista.unal.edu.co/index.php/agrocol/article/viewFile/20884/21802], consultado en 2012-02-27.
- Culturaagraria (2012). *Araña roja tetranicus urticae*. En línea [http://culturaagraria.blogspot.com/2012/03/arana-roja-tetranicus-urticae.html], consultado 2012-11-12.
- Cyclopaedia (2013). *Quelicero*. En línea [http://es.cyclopaedia.net/wiki/Quelicero], consultado 2012-09-12.
- Diccionarios-Online (2013a). *Diapausa*. En línea [http://www.diccionarios-online.com.ar/largo/diapausa.html], consultado 2013-01-19.
- Dorkeld, F. y A. Migeon. (2006-2013) *Spider Mites Web: a comprehensive database for the Tetranychidae*. En línea [http://www.montpellier.inra.fr/CBGP/spmweb], consultado en 2013-09-18.
- Dycometal (2012). *Construcción compacta*. En línea [http://www.dycometal.com/Gallery.aspx?t=compacta_dycometal], consultado 2012-11-21.
- Educarchile (2013). *Glosario. Términos relacionados con la hidrografía y el estudio del agua*. En línea [http://ww2.educarchile.cl/portal.herramientas/nuestros_sitios/bdrios/sitio/glosario/glosario.htm], consultado 2013-06-20.
- El-Halawany, A.S y N.M.A. El-Wahed (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 (2011). *La araña roja tetranychus urticae*. En línea [http://elhuertoderamon.blogspot.com/2011/02/la-arana-roja-tetranychus-urticae.html], consultado 2012-10-25.
- Flores, A. (2006a). *Repuesta dinámica de sistemas lineales de primer orden*. En línea [http://200.13.98.241/~antonio/cursos/control/notas/dynamics/1order.pdf], consultado en 2012-11-01.

- Flores, A. (2006b). *Control de procesos con retardo*. En línea [<http://200.13.98.241/~antonio/cursos/control/notas/siso/cpddi f.pdf>], consultado en 2012-11-01.
- García, J. y C. Palacio (2010). *Control de temperatura utilizando lógica difusa*. Revista colombiana de física. Vol 42, No. 3, 378-382.
- Gas natural fenosa (2013). *Refrigeración mediante el ciclo de absorción*. En línea [<http://www.empresaeiciente.com/es/catalogo-de-tecnologias/refrigeracion-mediante-el-ciclo-de-absorcion#ancla>], consultado 2012-11-02.
- Guirao, V. (2009). *Recinto para ensayos climáticos controlado por Ethernet*. En línea [<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/7329/1/pfcvictor.pdf>], consultado 2012-10-19.
- Gipcitricos (2010). *Araña roja*. En línea [<http://gipcitricos.ivia.es/area/plagas-principales/tetraniquidos/arana-roja>], consultado 2012-11-28.
- Gómez, J. M. (1958). *Los “antocoritos” de las islas canarias*. Anuario de estudios atlánticos. Vol 4, 85-101.
- González, A. (2011). *Sistemas dinámicos con retardos temporales*. En línea [<http://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/14859/tesisUPV3695.pdf?sequence=1>], consultado en 2012-11-01.
- González, J. A. (2002). *Modelamiento matemático de procesos industriales*. En línea [<http://www.univalle.edu.co/~automatica/Cursos/ControlProcesos/Material/Modelamiento.ppt>], consultado 2013-09-16.
- González, M. J. (2008). *Alteración de la superficie ocular tras la exposición a un ambiente adverso creado en una Cámara de Ambiente Controlado (cac)*. En línea [<http://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/75/1/TESIS25-090715.pdf>], consultado 2012-11-24.
- Guía verde (n.d.). *Festuca glauca*. En línea [http://guiaverde.com/plant_guide/festuca_glauca_676], consultado 2012-11-20.
- Haque, M. M.; W. Islam; M. Khalequzzaman y N. Naher (2008). *Study on the developmental stages of spider mite (Tetranychus urticae Koch) infesting country bean*. Journal of Bio-Science, 16(Naher 2005), 109–114.
- Hincapié, C. A. (2013). *Ácaro Tetranychus Urticae Koch* [Fotografía de alta resolución]. Medellín, Colombia: Carlos Augusto Hincapié Llanos.
- Hruska, A. y S. Gladstone (2003). *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*. En línea [http://www.nisperal.org/docs/Guia_MIP_esp.pdf], consultado 2012-10-02.
- Hughes, H. G., F. Nicholas, E. Porceddu y A. Zaid (2004). *Glosario de biotecnología para la agricultura y la alimentación*. En línea [<ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/004/y2775s/y2775s00.pdf>], consultado 2012-06-20.
- I.C.T, S.L. Instrumentación Científico Técnica (2012). *Cámara de crecimiento vertical “GROW/HR”*. En línea [http://www.ic_tsl.net/productos/aparatos/0000009bf60b7670b.html], consultado en 2012-02-24.
- Infoagro (2011a). *Control climático en invernaderos*. En línea [http://www.infoagro.com/industria_auxiliar/control_climatico.htm], consultado en 2012-01-27.

- Infoagro (2011b). *Diccionario agrícola: Radiación PAR*. En línea [http://www.infoagro.com/diccionario_agricola/traducir.asp?i=1&id=546&idt=1&palabra=radiaci%F3n%20PAR__radiacion%20par_radiaciones%20par_], consultado en 2012-06-19.
- Infojardin (2013). *Estilete – Estiletos*. En línea [http://www.infojardin.net/glosario/estanque/estilete-estiletos.htm], consultado en 2013-01-19.
- Intrave (2013). *Unitronics*. En línea [http://www.intrave.com/unitronics.htm], consultado en 2013-01-22.
- Isaza, C. A. (2011). *Cámara de fermentación para la obtención de productos cárnicos madurados* [Póster trabajo de grado]. Medellín, Colombia: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Isaza, C. A. (2012). *Cámara de Maduración para productos cárnicos existente* [Fotografía]. Medellín, Colombia: Universidad Pontificia Bolivariana.
- JLC (2012). *Planteo general de la simulación*. En línea, [http://www.frsf.utn.edu.ar/matero/visitante/bajar_apunte.php?id_catedra=150&id_apunte=3045], consultado en 2013-10-22.
- Juarez, A. (n.d.). *Humedad Ambiente*. En línea [http://www.oni.esuelas.edu.ar/2008/CORDOBA/1324/trabajo/humedadambiente.html], consultado en 2012-06-19.
- Kalipedia (2013). *La biocenosis*. En línea [http://co.kalipedia.com/ecologia/tema/biocenosis.html?x=20070418klpcnaec1_15.Kes], consultado en 2013-01-19.
- Laboratorio de Investigación Aplicada y Desarrollo (2012). *Cámaras de ambiente controlado*. En línea [http://www.liade.efn.uncor.edu/proyectos/camaras.htm], consultado en 2012-11-23.
- La guía (2013). *Fitoquímica*. En línea [http://biologia.laguia2000.com/botanica/fitoquimica], consultado en 2013-01-19.
- Lahura, E. (2003). *El coeficiente de correlación y correlaciones espúreas*. En línea, [http://departamento.pucp.edu.pe/economia/images/documentos/DDD218.pdf], consultado en 2013-10-22.
- Lanfri, S. (2011). *Desarrollo de una metodología para la detección de cuerpos de agua mediante el análisis de imágenes SAR COSMO SkyMed y de DEMs*. En línea, [http://www2.famaf.unc.edu.ar/carreras/posgrado/documents/maestria_aearte/tesisSofiaLanfri.pdf], consultado en 2013-10-20.
- Marco, Vicente (2001). *Modelización de la tasa de desarrollo de insectos en función de la temperatura. Aplicación al manejo integrado de plagas mediante el método de grados-días*. En línea [http://entomologia.rediris.es/ aracnet/7/12entoaplicada/], consultado en 2012-11-02.
- Mejía, M. (2005). Calentamiento global y distribución de plagas. *Boletín de la NAPPO* (Ontario, Canada). Pp 5-6.
- Miliarium (2008). *Glosario de arquitectura sostenible*. En línea [http://www.miliarium.com/bibliografia/GlosarioArquitecturaSostenible.asp], consultado en 2012-06-19.
- 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. (2011). *Módulo “implementación de un vivero de especies frutales, enfocado al durazno”, dirigido al*

- COCODE de la comunidad Sacanillá, Cobán, Alta Verapaz.* En línea [http://biblioteca.usac.edu.gt/EPS/07/07_1595.pdf] consultado en 2012-06-15.
- Núñez, D. G. A. (2005). *Efecto de la temperatura en la capacidad depredadora de Neoseiulus californicus (McGREGOR) sobre tres especies de ácaros fitófagos en laboratorio.* En línea [http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2005/nunez_d/sources/nunez_d.pdf], consultado en 2013-01-19.
- Ogata, K. (1987). *Discrete-Time Control Systems.* Prentice Hall Inc, New Jersey.
- Osorio, M. (2004). *Modelación experimental.* En línea, [<http://eav.upb.edu.co/banco/sites/default/files/files/2%20PROCESOS%20CONTINUOS%20%20MODELACION%20C3%93N.pdf>], consultado en 2013-09-15.
- Osorio, M. (2011). *Métodos de sintonía de Ziegler-Nichols.* Sistemas Automáticos de Control, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.
- Parameter Generator & Control (2011). *30 CF Calibration Chamber.* En línea [<http://humiditycontrol.com/product/30-cf-calibration-reach-in-chamber/>], consultado en 2011-08-25.
- Perez, M. A., A. Perez y E. Perez (2008). *Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo.* En línea [<http://dea.unsj.edu.ar/control1b/teoria/unidad1y2.pdf>], consultado 2012-09-16.
- Plcdev (2013). *¿Qué es un PLC?.* En línea [<http://www.plcdev.com/>], consultado en 2013-01-16.
- QuimiNet (2012). *Evite obstrucciones en su sistema de ductos y ventilación.* En línea [<http://www.quiminet.com/articulos/evite-obstrucciones-en-su-sistema-de-ductos-y-ventilacion-2854100.htm>], consultado en 2012-11-27.
- 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. (2004). *Factores climáticos: Efecto de las altas temperaturas sobre la calidad de los frutos,* consultado en 2011-05-31.
- Rebosio, N. (2005). *Niveles luminicos y parámetros de calidad lumínica (Parte Iª) Temperatura del color y reproducción cromática.* Electromagazine, número 12. En línea [<http://www.electromagazine.com.uy/antiores/numero12/iluminacion1.htm>], consultado en 2013-05-06.
- Rosales, C. J. M. (2005). *Micropropagación de calahuala Phlebodium psedoareum (Cav.) Lellingier con tres tipos de explantes en diferentes medios de cultivo in vitro,* consultado en 2012-06-19.
- Ross, C.W. y F. B. Salisbury (1994). *Fisiología vegetal.* Editorial Iberoamérica. México D.F., 759 p.
- Schneider Electric (2011). *Preguntas técnicas frecuentes (FAQs).* En línea, [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], consultado en 2013-10-20.

- Sistemas de calefacción (2012). *Sistemas de calefacción*. En línea [<http://www.sistemascalefacci on.com/>], consultado 2012-11-14.
- Sin autor (2007). *Sistemas lineales de primer orden*. En línea [<http://galeon.com/mcoronado/MODELAMIENTO/02PORDT I.pdf>], consultado en 2012-11-01.
- Sodeca (n.d.). *Información técnica: caudal y presión del ventilador*. En línea [<http://www.sodeca.com/tecnica.html>], consultado en 2011-06-18.
- Tablero eléctrico (n.d.). *Tablero eléctrico*. En línea [<http://es.scribd.com/doc/59206879/TABLERO-ELECTRI CO>], consultado en 2013-06-12.
- Tecdigitaldelbajio (2012). *Modbus parte iii que es el Modbus*. En línea [<http://www.tecdigitaldelbajio.com/blog/27-modbus-par te-iii-que-es-el-modbus.html>], consultado en 2013-09-11.
- The free dictionary by Farlex (2013). *Ninfa*. En línea [<http://es.thefreedictionary.com/ninfa>], consultado en 2013-01-19.
- Translimite (2012). *Humidificación*. En línea [<http://www.translimite.com.mx/humidificacion/>], consultado en 2011-11-09.
- Toro, H. D. (2013). *Colonia de ácaro Tetranychus Urticae Koch* [Fotografía de alta resolución]. Medellín, Colombia: Hernán Darío Toro Agudelo.
- Universidad Salamanca (2011). *Tisanópteros*. En línea [<http://dicciomed.eusal.es/palabra/tisanopteros>], consultado en 2012-11-09.
- Villee, C.A. (1996). *Biología*. 8. Ed. Mc Graww Hill, México D.F. 944 p.
- Wikcionario (2013). *eclosionar*. En línea [<http://es.wiktionary .org/wiki/eclosionar>], consultado 2012-10-03.
- Wikipedia (2012a). *Tetranychus urticae*. En línea [http://es. wikipedia.org/wiki/Tetranychus_urticae], consultado 2012-11-22.
- Wikipedia (2012b). *Maduración en carne de vacuno*. En línea [http://es.wikipedia.org/wiki/Maduraci%C3%B3n_en_carne_d e_vacuno], consultado 2012-09-20.
- Wikipedia (2012c). *Sistema frigorífico*. En línea [http://es. wikipedia.org/wiki/Sistema_frigor%C3%ADfico], consultado 2012-11-29.
- Wikipedia (2013a). *Clorofila*. En línea [<http://es.wikipedia .org/wiki/Clorofila>], consultado 2013-01-19.
- Wikipedia (2013b). *Incrustación*. En línea [<http://es.wikipedia. org/wiki/Incrustación>], consultado 2013-01-19.
- Wikipedia (2013c). *Entropía*. En línea [<http://es.wikipedia.org/w iki/Entrop%C3%ADa>], consultado 2013-01-19.
- Wikipedia (2013d). *Staphylinidae*. En línea [<http://es.wikipedia. org/wiki/Staphylinidae>], consultado 2013-01-19.
- Wikipedia (2013e). *Festuca*. En línea [<http://es.wikipedia.org/ wiki/Festuca>], consultado 2013-01-19.
- Wikipedia (2013f). *Larva*. En línea [<http://es.wikipedia.org/wiki/ Larva>], consultado 2013-01-19.
- Wikipedia (2013g). *Sumidero*. En línea [<http://es.wikipedia.org/ wiki/Sumidero>], consultado 2013-01-19.

- Wikipedia (2013h). *HMI*. En línea [<http://es.wikipedia.org/wiki/HMI>], consultado 2013-05-24.
- Wikipedia (2013i). *UTR*. En línea [http://es.wikipedia.org/wiki/Unidad_Terminal_Remota], consultado 2013-07-05.
- WordReference (2013a). *Defoliación*. En línea [<http://www.wordreference.com/definicion/defoliaci%C3%B3n>], consultado 2013-01-19.
- WordReference (2013b). *Herrumbroso*. En línea [<http://www.wordreference.com/definicion/herrumbroso>], consultado 2013-01-19.
- Xmcarne (2013). *Introducción Modbus*. En línea [<http://www.xmcarne.com/blog-tecnico/introduccion-modbus>], consultado en 2013-09-11.
- Youney, J. (2007). *A comparison and evaluation of common pid tuning methods*. En línea [http://etd.fcla.edu/CF/CFE0001716/Youney_Justin_J_2007_8_MS.pdf], consultado 2013-10-30.
- Zaragoza, M. A. (2012). *Manejo integrado del ácaro de dos manchas*. En línea [http://edialogo.ning.com/group/mp/forum/topics/manejo-integrado-del-acaro-de-dos-manchas-tetranychus-urticae?xg_source=activity], consultado en 2012-12-12.
- Zegarra, C. (2011). *Determinación del fotoperiodo en el Perú*. En línea [<http://es.scribd.com/doc/95513211/fotoperiodo-teoria>], consultado en 2012-06-18.

AUTORES



Jorge Andrés CARDONA GIL, Bachiller 2007, promoción 56 del *Instituto San Carlos De La Salle*, participó en las olimpiadas matemáticas de la *Universidad de Antioquia* en 2005, certificado por el *SENA* en el curso de Programación Orientada a Objetos en JAVA y en C++ Nivel I y Nivel II en 2011, certificado por la empresa *3M* en Cableado Estructurado en 2012, participó en *Campus Party Colombia 2011* y *2013*, ponente en *Ingeniar 2013* y en el VII Encuentro Interno de Semilleros de

Investigación 2013 de la *Universidad Pontificia Bolivariana*, realizó la práctica en la empresa *Cadena S.A.* en los primeros 6 meses del año 2013. Egresado próximo a graduarse del programa de Ingeniería Electrónica de la *Universidad Pontificia Bolivariana*, integrante del semillero A+D de la *Universidad Pontificia Bolivariana*, nacido en Medellín, Colombia.



Juan Pablo PAZOS URREA, bachiller académico del *colegio Corazonista*, 2007 (Medellín, Antioquia), certificado por la empresa *3M* en Cableado Estructurado, participó en *Campus Party Colombia 2011*. Egresado próximo a graduarse del programa de Ingeniería Electrónica 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*, nacido en Medellín, Colombia.

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

ANEXO D. MANUAL DE OPERACIÓN DEL SISTEMA CONTROLADO

*NOTA: Los anexos se encuentra en un CD-ROM de nombre Cámara de Ambiente Controlado para la Supervivencia de Plantas e Insectos, en la carpeta Anexos.