

## Cámara de Ambiente Controlado para la Supervivencia de Plantas e Insectos

Juan P. PAZOS-URREA\*, Jorge A. CARDONA-GIL\*, Marisol OSORIO\*, Carlos A. HINCAPIÉ<sup>+</sup>

*\*Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, <sup>+</sup>Facultad de Ingeniería Agroindustrial;  
Universidad Pontificia Bolivariana; Cir.1 #70-01, Medellín, Colombia.  
juanpablo.pazos@alfa.upb.edu.co*

Resumen: La temperatura, la humedad relativa (HR) y la luz son factores influyentes en el desarrollo de los seres vivos. 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. *Copyright © UPB 2013*

Palabras clave: Ambiente, Controlador, Luz, Temperatura.

Abstract: The temperature, relative humidity and light are influential factors in the development of living beings. By this project we aim to obtain a suitable controller of temperature and relative humidity in a chamber, property of 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 better control over its development when experiments are made over them.

Keywords: Controller, Environment, Light, Temperature.

UPB\_autoArt 2013-07-19, s2013-12-03

## 1. INTRODUCCIÓN

La temperatura y la humedad relativa son variables críticas para favorecer o limitar el desarrollo de plantas e insectos. 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 teniendo 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. Con lo anterior se pretende darle una importancia al proyecto planteado al trabajar con seres vivos que necesitan de unas condiciones específicas, que están en constante cambio, para sobrevivir dentro de un ambiente controlado y artificial.

Las cámaras de crecimiento controlado no se producen en nuestro país, aunque sí en el exterior (Parameter Generator & Control, 2011), es importante entonces, tanto con fines investigativos y didácticos, como para incrementar la independencia tecnológica, que estas cámaras se estudien y se construyan en Colombia.

El prototipo a implementar cuenta con un detector y una serie de sensores y actuadores ubicados de manera estratégica dentro de la cámara, y comandados por medio de un PLC, para generar un

ambiente controlado con las condiciones necesarias para que plantas e insectos puedan sobrevivir.

En este artículo se muestran los resultados obtenidos a la hora de implementar el control diseñado de temperatura y HR en la cámara de maduración ya acondicionada. En la sección 2 se muestra brevemente el estado del arte relacionado a las cámaras de ambiente controlado y las técnicas de control utilizadas generalmente a nivel industrial en este tipo de cámaras. La sección 3 describe la cámara de maduración para productos cárnicos que tiene a su disposición el grupo de investigación de agroindustrial GRAIN para ser acondicionada, con el fin de permitir la supervivencia de plantas e insectos, en especial de los ácaros *Tetranychus Urticae*. En la sección 4 se describen las características generales, las condiciones óptimas de humedad relativa y temperatura para permitir su reproducción y desarrollo y los síntomas y daños a las especies hospederas de los ácaros *Tetranychus Urticae*. La sección 5 describe los elementos adicionados a la cámara de maduración para hacer de ella una cámara de ambiente controlado, la sección 6 muestra de manera concisa el modelamiento de la resistencia de calefacción, actuador que posteriormente fue controlado, la sección 7 describe el diseño, simulación y resultados experimentales del control PID implementado y la sección 8 sección describe el potencial del proyecto, el cual abre paso a implementar nuevos tipos de tecnologías en nuestro país. Finalmente se presentan las conclusiones.

## 2. ESTADO DEL ARTE

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 y 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).

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, 2011). 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).

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 y *series* 9530 de la empresa Parameter Generation & Control. 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).

### 3. CÁMARA DE MADURACIÓN EXISTENTE Y SUS POSIBILIDADES

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, 2012). Para dicho proceso se dispone de una cámara de maduración climatizada.

La cámara de maduración existente 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 estos sistemas permiten el control de la temperatura y de la humedad relativa, y es gracias a ellos que es posible hablar de la creación de ambientes artificiales.

Además de los sistemas mencionados anteriormente, la Cámara de Maduración cuenta con un detector de nivel, un sensor de humedad y temperatura, un controlador *ON-OFF* Humitech Super, una serie de indicadores luminosos, un interruptor selector de dos posiciones, un temporizador y un sistema de llenado automático de agua con válvula solenoide. Cada uno de ellos representa una serie de precauciones con el fin de evitar posibles daños en los diferentes sistemas instalados, al mismo tiempo que muestran el funcionamiento actual de los mismos, dando a entender cuándo algo está mal y qué sistema es el afectado.

El detector de nivel se encarga de vigilar constantemente el nivel de agua del recipiente que contiene el 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 elemento resistivo del sistema de humidificación por sobrecalentamiento, puesto que dicho elemento debe estar sumergido todo el tiempo completamente en el agua. 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.

El detector de nivel tiene asociado un temporizador de marca Autonics ATE, 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. Además del temporizador, el detector de nivel se encarga de dar la orden para llevar a cabo el llenado automático de agua del recipiente que contiene el sistema de humidificación, de esta manera cuando dicho recipiente se encuentre vacío, el detector de nivel activa la válvula solenoide para permitir el paso del agua, la cual se cierra al momento en que el detector de nivel se desactiva. De esta forma se logra proteger la resistencia de este sistema al evitar daños por sobrecalentamiento.

Los indicadores luminosos se encuentran asociados al sistema de calefacción, al sistema de refrigeración, al sistema de humidificación y al detector de nivel por medio del temporizador.

El interruptor selector de dos posiciones permite el encendido del sistema de control y del sensor de humedad y temperatura existentes.

Todos estos elementos brindan la posibilidad de convertir la cámara de maduración en una cámara de ambiente controlado, con el fin de

permitir la supervivencia de plantas e insectos en unas condiciones de humedad y temperatura determinadas.

#### 4. 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 1). 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 1. 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 son más resistentes a productos químicos y a ataques de depredadores. Se les encuentra en el envés de la hoja, 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).

#### 4.1. 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).

*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 (ver Figura 2), 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-Halawany y El-Wahed, 2012). Estos aspectos relevan la importancia de mantener los ácaros en condiciones controladas para facilitar todas las operaciones necesarias para los procesos experimentales.

*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 frijol, 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).



Figura 2. Colonia de ácaro *Tetranychus Urticae* Koch.  
Reproducida con permiso de Toro (2013)

## 5. 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 (ver Figura 3) 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 un PLC Unitronics *Vision 230*. El sensor de humedad y temperatura existente fue reemplazado por un sensor de humedad y temperatura marca Autonics THD-W1-C de salida normalizada de 4-20 mA, ya que el anterior había sido diseñado para trabajar específicamente con la gama de controladores de Full Gauge. Por último se adicionaron lámparas fluorescentes para simular el ciclo del sol, que permitan la supervivencia de los ácaros y de las especies hospederas y se realizó el cambio de la resistencia de calefacción por una de mayor potencia (1500 W), ya que con la anterior (310 W) la HR no se estabilizaba en ningún momento por la actuación no constante del compresor, que encendido todo el tiempo con la resistencia de 310 W no permitía que se obtuvieran los valores de temperatura requeridos por el ácaro. 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 de la Cámara de Ambiente Controlado.

El gabinete instalado 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.

### 5.1. PLC Unitronics *Vision 230* en la Cámara de Ambiente Controlado

El PLC Unitronics *Vision 230* es utilizado en este proyecto 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 activas, 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 y 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 relevantes para este trabajo, las cuales son la temperatura y la humedad relativa.

El PLC *Vision 230* se colocó de manera ergonómica en el gabinete para que el usuario o persona que desee usar la Cámara de Ambiente Controlado y realizar su control, lo pueda hacer de manera cómoda.



Figura 3. Cámara de Ambiente Controlado

## 5.2. Iluminación. Tubos fluorescentes

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.

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

## 6. MODELAMIENTO DE LA RESISTENCIA DE CALEFACCIÓN

El modelo matemático permite conocer la dinámica del sistema con el que se está trabajando bajo unas condiciones determinadas de operación, en donde un cambio en ellas, implica resultados no esperados por el control diseñado, al funcionar bajo un entorno

diferente con el cual se había obtenido el modelo utilizado para su respectivo diseño. El modelo matemático es válido sólo bajo las condiciones de operación del sistema en las que se obtuvo dicho modelo.

Con el fin de obtener condiciones estables de temperatura y HR, el sistema de ventilación y refrigeración se encuentran todo el tiempo encendido. Esto implicó un cambio en el hardware existente, al tener que cambiar la resistencia del sistema de calefacción de 310 W por una de 1500 W, ya que la temperatura en el interior del recinto alcanzaba valores inferiores a los requeridos por el ácaro *Tetranychus Urticae* Koch.

El sistema de humidificación funciona 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.

*Curva estática.* 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).

La curva estática no cubre todos los valores hasta el 100 % del *duty cycle*, ya que los valores por encima del 60 % superan

fácilmente los 45 °C, temperaturas que pueden llegar a causar daños 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 1) 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 %, diferencia que se debe también gracias a la propia inercia térmica de los diferentes sistemas y materiales que conforman la cámara ya acondicionada, sin embargo, debido a la temperatura ambiente, la cámara logra alcanzar un valor de temperatura determinado, el cual tiene una pequeña variación al depender qué tan caliente o frío es ese día.

La curva estática (ver Figura 4) obtenida permite determinar la zona de operación y el punto Q de la resistencia de calefacción de 1500 W. La zona de operación incluye los valores de *duty cycle* entre el 30 % y el 50 % y 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, además de mostrar 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 necesarias para permitir la supervivencia del ácaro *Tetranychus Urticae* Koch.

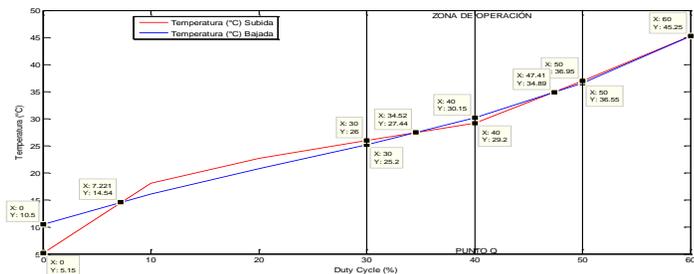


Figura 4. Curva estática de la resistencia de 1500 W del sistema de calefacción

*Curva dinámica.* 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).

Para obtener la curva dinámica (ver Figura 5) de la resistencia del sistema de calefacción, el sistema fue polarizado lentamente al aumentar el valor del *duty cycle* desde el 0 % hasta el 40 % en pasos del 10 % cada 4 horas, a partir de valores cercanos al valor mínimo de temperatura alcanzado en el interior del recinto. Los pasos

aplicados a partir del punto de operación fueron de una amplitud del 10 %.

Tabla 1. Registro de la curva estática de la resistencia de calefacción de 1500 W

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

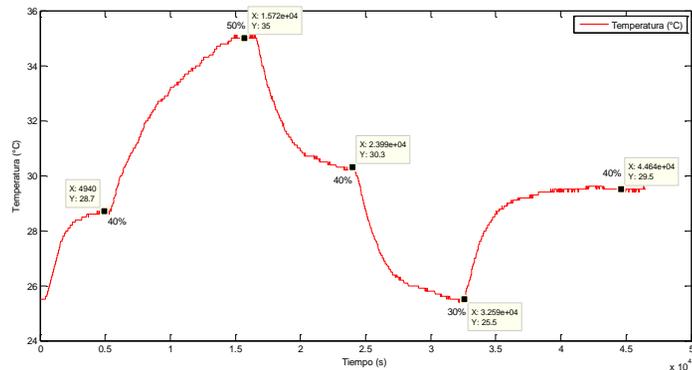


Figura 5. Curva dinámica de la resistencia de 1500 W del sistema de calefacción en la zona de operación

### 6.1. 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, cuya función de transferencia es

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

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

Estos parámetros se calculan en función de las características físicas del sistema.

Se trabajó con dos funciones de transferencia, una de ellas no incluye el retardo, mientras que la otra lo tiene en cuenta con su respectiva aproximación de McLaurin mostrada en (2), con el fin de verificar cuál de los dos reproducen mejor el comportamiento real del sistema. Se debe tener en cuenta que si la magnitud del retardo es grande las aproximaciones 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).

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

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

$$G_2(s) = \left( \frac{K}{\tau s + 1} \right) \left( \frac{1}{1 + Ts + \frac{T^2 s^2}{2}} \right) \quad (3)$$

Los parámetros a reemplazar en (1) y en (3) 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 2), valores que son promediados (ver Tabla 3) con el fin de obtener las funciones de transferencia mostradas en (4) y (5).

$$G_1(s) = \frac{0.0495}{2388.75s + 1} e^{-185.25s} \quad (4)$$

$$G_2(s) = \frac{0.0495}{4.099 \times 10^7 s^3 + 4.597 \times 10^5 s^2 + 2574s + 1} \quad (5)$$

Tabla 2. Parámetros del modelo matemático de la resistencia del sistema de calefacción

<i>Duty Cycle</i> (%)	$X_{SS}$	$Y_{SS}$	K	$\tau$ (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 3. Promedio de los parámetros del modelo matemático de la resistencia del sistema de calefacción

$X_{SS}$	$Y_{SS}$	K	$\tau$ (s)	T (s)
100	4.95	0.0495	2388.75	185.25

Se utilizó el software MATLAB® y Simulink® para verificar que el modelo matemático obtenido sí coincidiera con la respuesta real del sistema, razón por la cual se simuló la prueba realizada experimentalmente para obtener la curva dinámica, gráfica que se superpuso con los resultados experimentales (ver Figura 6) 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.

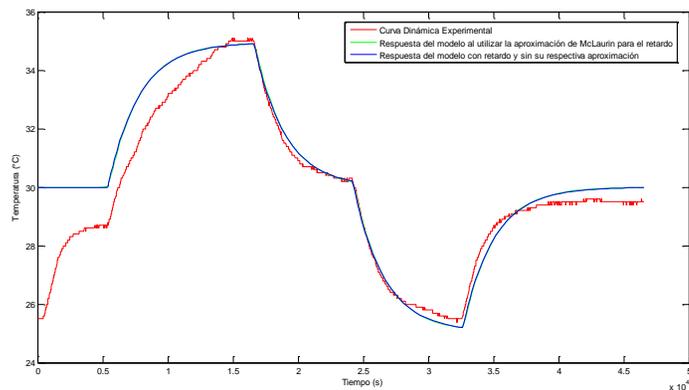


Figura 6. Comparación entre curva dinámica experimental y curvas dinámicas simuladas

“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).

## 7. DISEÑO, SIMULACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL PID

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 diseño 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 Chien, Hrones y Reswick

El método de sintonía 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 4). 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 4. Valores de los parámetros método CHR sobrepaso 0 %

	$Kp$	$Ti$	$Td$
Control P	0.3/a	-	-
Control PI	0.35/a	1.2T	-
Control PID	0.6/a	T	0.5/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. Los parámetros de este método se obtienen de la respuesta al paso del sistema (ver Figura 7), en esta respuesta se encuentran contenidos el tiempo de retardo ( $L$ ), 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 “ $a$ ” y por último el parámetro  $T$ , el cual es el Tau ( $\tau$ ) del sistema, y se seleccionó el más rápido (ver Tabla 5).

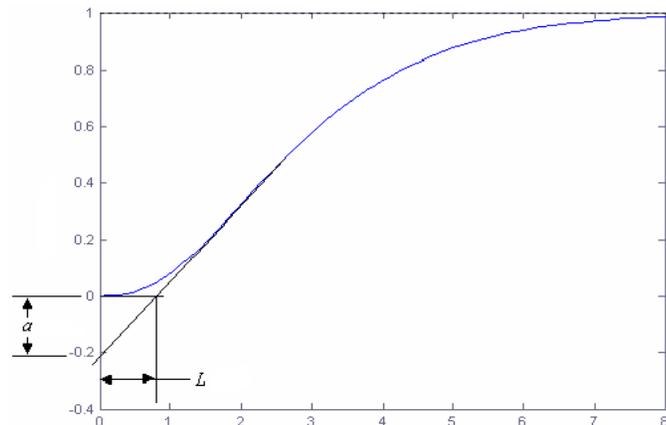


Figura 7. Parámetros respuesta al paso del sistema método CHR sobrepaso 0 %

Tabla 5. Parámetros método CHR sobrepaso 0 %

$a$	$L$	$T$
0.35	185.25	1690

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

$K_p$ : 1.7143

$K_i$ : 0.001

$K_d$ : 0.0046

Diagrama de bloques (ver Figura 8) realizado con ayuda del software MATLAB®:

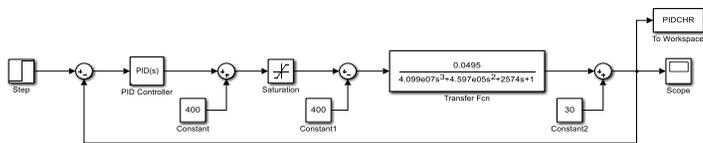


Figura 8. Diagrama de bloques control PID método CHR sobrepasso 0 %

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 9) del sistema controlado:

$K_p$ : 32

$K_i$ : 0.0189

$K_d$ : 0.0864

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 %.

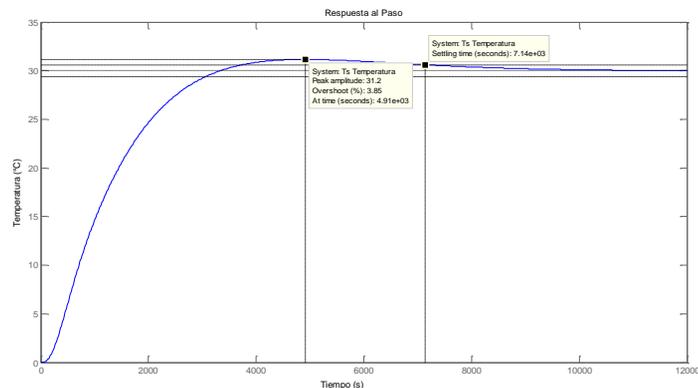


Figura 9. Respuesta Control PID ajustado método CHR sobrepasso 0 %

## 7.2. Resultados experimentales del control PID implementado.

### Método de Chien, Hrones y Reswick

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

$K_p$ : 32

$K_i$ : 0.0189

$K_d$ : 0.0864

A este control se le realizaron pruebas experimentales sin perturbación alguna (ver Figura 10), con la perturbación del encendido de las lámparas fluorescentes y el humidificador, el cual tiene un control *ON-OFF* con variación del 40 %HR al 60 %HR (ver Figuras 11, 12 y 13) y con la perturbación de la apertura de la puerta (ver Figuras 14, 15 y 16) de la Cámara de Ambiente Controlado durante 30 s.

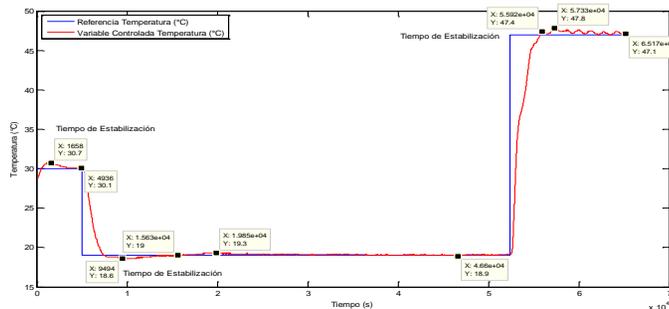


Figura 10. Control PID temperatura sin perturbación con referencia 30 °C, 19 °C y 47 °C (día y noche)

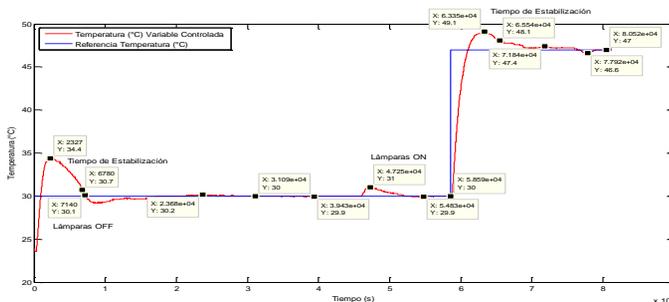


Figura 11. Control PID temperatura referencia 30 °C (día y noche) y 47 °C con perturbación control *ON-OFF* humedad relativa 50 %HR y lámparas fluorescentes encendidas

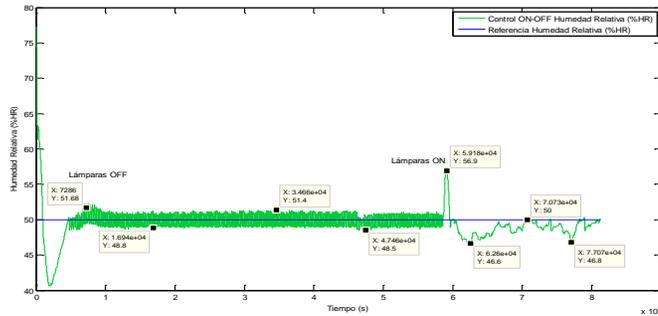


Figura 12. Control *ON-OFF* humedad relativa 50 %HR con perturbación lámparas fluorescentes encendidas (día y noche)

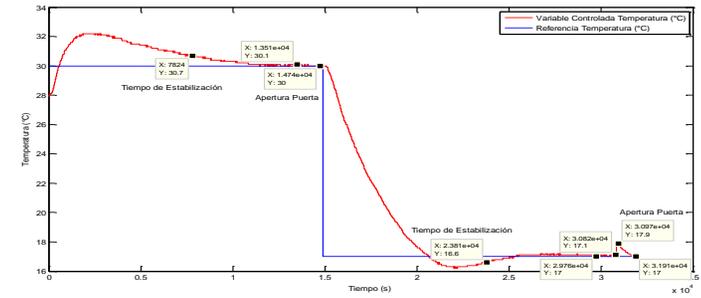


Figura 14. Control PID temperatura referencia 30 °C y 17 °C con perturbación control *ON-OFF* humedad relativa 60 %HR, lámparas fluorescentes encendidas y apertura de puerta

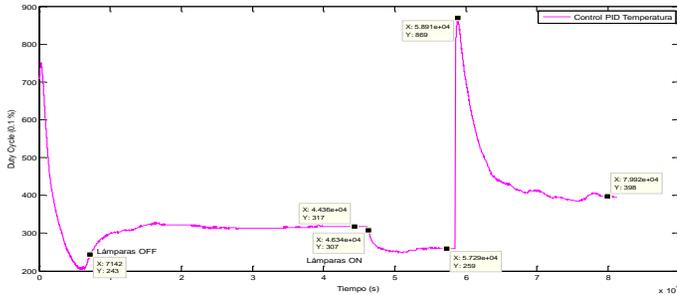


Figura 13. *Duty cycle* control PID temperatura con perturbación humidificador 50 %HR y lámparas fluorescentes encendidas (día y noche)

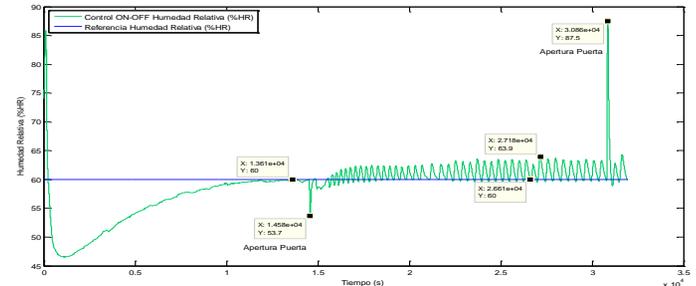


Figura 15. Control *ON-OFF* humedad relativa 60 %HR con perturbación lámparas fluorescentes encendidas y apertura de puerta

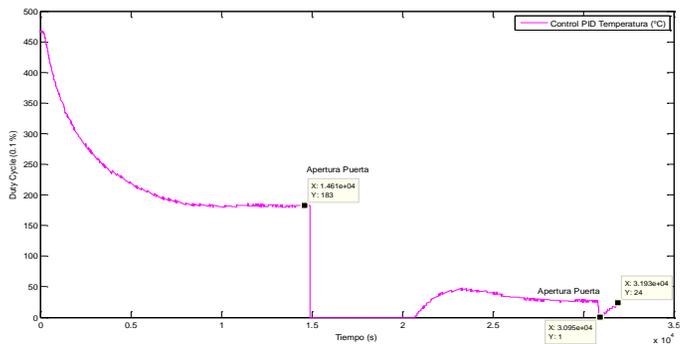


Figura 16. *Duty cycle* control PID temperatura con perturbación humidificador 60 %HR, lámparas fluorescentes encendidas y apertura de puerta

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. 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.

## 9. 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.

## AGRADECIMIENTO

Agradecemos especialmente al laboratorio de IEE, al Centro de Investigación, Desarrollo y Calidad en Refrigeración y Climatización, al Grupo de Investigaciones Agroindustriales (GRAIN), al Ph.D. Manuel J. Betancur, al Ph.D. César Alejandro Isaza Roldán, al Ing. Mecánico Santiago Del Río Rico, al

Ing. Eléctrico Hernán Valencia, al M.Sc. José Isaac Jaramillo y al director de Ingeniería Agroindustrial, Esp. Juan Carlos Palacio Piedrahita. Agradecemos a cada uno de ellos por su apoyo incondicional en cuanto al desarrollo y culminación satisfactoria del proyecto Cámara de Ambiente Controlado para la Supervivencia de Plantas e Insectos.

### REFERENCIAS

- 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.
- Acosta G., A. (1994). *Biología y manejo de Tetranychus spp.* Flores. Revista Acopaflor 1 (2): 5-10.
- 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.
- 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.
- Ayala, O.; R. Ferreto; M. Goitia; J. Marinich; E. Níquen-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.
- Bolland, H. R.; Ch. W. Flechtmann y J. Gutierrez, (1998). *World catalogue of the spider mite family (Acari: Tetranychidae), with references to taxonomy, synonymy, host plants and distribution*. Brill Academic Publishers. Leiden. 392 p.
- 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.
- 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.
- CCI (2009). *Cámaras de ambiente controlado*. En línea [<http://ccicalidad.blogspot.com/2009/08/cámaras-de-ambiente-controlado.html>], consultado 2011-08-04.
- CCI (2012a). *Cámaras de simulación climática y envejecimiento ambiental acelerado*. En línea [[http://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos\\_y\\_documentos/2669/01-36.pdf](http://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/2669/01-36.pdf)], consultado 2011-11-20.
- CCI (2012b). *Cámaras climáticas*. En línea [<http://www.ccicalidad.com/camara02.htm>], consultado 2012-03-10.
- Cogliatti, J.I. (2008). *Control automático de temperatura e iluminación*, consultado 2011-07-31.

- Control procesos (2006). *Glosario de términos Terminología básica en control de procesos*. En línea, [http://istcatalina.blogspot.com/], consultado en 2013-10-17.
- 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.
- 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.
- 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/cpddf.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.
- González, J. A. (2002). *Modelamiento matemático de procesos industriales*. En línea [http://www.univalle.edu.co/~automatiza/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.
- 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.
- I.C.T, S.L. Instrumentación Científico Técnica (2012). *Cámara de crecimiento vertical "GROW/HR"*. En línea [http://www.ictsl.net/productos/aparatos/0000009bf60b7670b.html], consultado en 2012-02-24.
- Infoagro (2011). *Control climático en invernaderos*. En línea [http://www.infoagro.com/industria\_auxiliar/control\_climatico.htm], consultado en 2012-01-27.
- JLC (2012). *Planteo general de la simulación*. En línea, [http://www.frfs.utn.edu.ar/matero/visitante/bajar\_apunte.php?id\_catedra=150&id\_apunte=3045], consultado en 2013-10-22.
- 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.
- Navajas, M. (1998). *Host plant associations in the spider mite Tetranychus urticae (Acari: Tetranychidae): insights from molecular phylogeography*. Experimental & Applied Acarology 22: 201-214.

- 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.
- 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.
- Quintero, P. (1991). *El control de pulgones y ácaros y su incremento en la producción en el cultivo algodonero*. ASIAVA 36: 11-16.
- Ross, C.W. y F. B. Salisbury (1994). *Fisiología vegetal*. Editorial Iberoamérica. México D.F., 759 p.
- Sistemas lineales de primer orden (2007). En línea [http://galeon.com/mcoronado/MODELAMIENTO/02PORDTI.pdf], consultado en 2012-11-01.
- Tecdigitaldelbajio (2012). *Modbus parte iii que es el Modbus*. En línea [http://www.tecdigitaldelbajio.com/blog/27-modbus-part-e-iii-que-es-el-modbus.html], consultado en 2013-09-11.
- Toro, H. D. (2013). *Colonia de ácaro Tetranychus Urticae Koch* [Fotografía de alta resolución]. Medellín, Colombia: Hernán Darío Toro Agudelo.
- Villee, C.A. (1996). *Biología*. 8. Ed. Mc Graww Hill, México D.F. 944 p.
- Wikipedia (2012). *Maduración en carne de vacuno*. En línea [http://es.wikipedia.org/wiki/Maduraci%C3%B3n\_en\_carne\_de\_vacuno], consultado 2012-09-20.
- 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.

## 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.



*Marisol OSORIO CÁRDENAS*, Ing. Electrónica (UPB, 1993), M.Sc. en Ing. y Especialista en Automática, Dra. en Ing. Eléctrica de la *Universidad Nacional Autónoma de México* (2009). Profesora Titular e investigadora en la *Universidad Pontificia Bolivariana*, cofundadora del Grupo de Investigación en Automática (1998) luego fusionado en el grupo A+D, clasificado B en *Colciencias* (2011). Vinculada también al Grupo de Investigación en Gestión de la Tecnología y la Innovación (GTI). Intereses: sistemas no lineales, observadores y sus aplicaciones, e historia y educación en ingeniería.



*Carlos Augusto HINCAPIÉ LLANOS*, Ing. Agroindustrial (UGCA, 1995), Esp. en Sistemas Gerenciales de Ingeniería (PUJ, 1998), M.Sc en Ciencias Agrarias (UN, 2006) y Dr. en Biología (UdeA, 2012). Profesor Titular e investigador en la *Universidad Pontificia Bolivariana* desde 1999, fundador del Grupo de Investigaciones Agroindustriales -GRAIN- (2003) Grupo reconocido en *Colciencias*. Intereses: Identificación y medición de actividad biológica de plantas con miras a la obtención de nuevos productos agroindustriales.