

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

AUTOMATIZACIÓN DE UN INVERNADERO UTILIZANDO COMPONENTES ELECTRÓNICOS COMERCIALES

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE

INGENIERO ELECTRICO ELECTRÓNICO

P R E S E N T A :

LUIS ANGEL CONTRARAS TOLEDO

TUTOR:

ING. RODOLFO PETERS LAMMEL



2007

Dedicatoria

A mi familia, amigos y profesores

A todo aquel que me haya enseñado algo

Introducción 1
1. *Parámetros más importantes en el desarrollo de una planta* 3
1.1. Temperatura 3
1.1.1 Calefacción 3
1.1.2 Ventilación 6
1.2. Contenido de agua en suelo 8
1.2.1 Riego 8
1.3. Humedad relativa atmosférica 11
2. *Tecnología actual* 13
2.1 Métodos de medición 13
2.1.1 Temperatura 13
2.1.2 Contenido de agua en suelo 15
2.1.3 Humedad relativa atmosférica 17
2.2 Sistemas de control climático 18
3. *Propuesta y desarrollo de una alternativa más económica* 20
3.1. Control de temperatura 20
3.1.1 Sistema de control 23
3.1.1.1 El C.I. 555 como controlador con histéresis 23
3.1.1.2 Sistema control de temperatura 25
3.2. Control de humedad relativa atmosférica (HR) 28
3.2.1 Control de humedad relativa 32
3.3. Control de cantidad de agua en suelo 34
3.3.1 Control de humedad del suelo 38
3.4. Control de nivel de agua 40
4. *Implantación del sistema* 42
4.1. Dispositivo experimental 42
5. *Análisis de resultados* 44
5.1. Control de temperatura 44
5.2. Control de humedad relativa atmosférica 45
5.3. Control de cantidad de agua en suelo 46
5.4. Detector de nivel de agua 48
Conclusiones 49
Bibliografía 52

Introducción

La producción agrícola nacional, desde hace varios años, no presenta aumento ni en cantidad ni en calidad a pesar de que se está usando prácticamente toda la superficie agrícola económicamente cultivable. Problemas del suelo como topografía accidentada, de condiciones meteorológicas como precipitación errática e insuficiente, heladas, o de problemas sociales tales como minifundio y subocupación o desocupación de la gente del campo, limitan la capacidad de crecimiento desde una perspectiva de agricultura extensiva de revolución verde (F. Sánchez del Castillo, 2002).

Esto es, la producción agrícola se ve limitada por las condiciones locales, generando excesos de producción y escasez por temporadas, además de reducir la calidad y no alcanzar la producción óptima, ya que las condiciones meteorológicas locales que resultan inestables durante el ciclo de desarrollo de cada planta, además de las condiciones extremas de temperaturas, viento, lluvia o granizo, baja humedad o exceso de radiación solar. Es por esto que los invernaderos aparecen como la solución idónea para los cultivos sensibles a las variaciones climatológicas, permitiendo crear un microclima adaptado a las necesidades de los cultivos en su interior.

Una de las técnicas para superar las limitaciones geográficas que devienen en el tipo de clima y suelo, son los invernaderos, los cuales además de ser una herramienta para controlar las heladas o las bajas temperaturas, con el adecuado diseño estructural y de sistemas de control climático, se pueden regular varios factores ambientales (vientos fuertes, insolación, humedad relativa, excesos de humedad edáfica) y de plagas y enfermedades (barrera física contra plagas y vectores) (F. Sánchez del Castillo, 2002).

Este microclima, que generalmente difiere del exterior permite obtener una producción limpia y sin daños debido a roedores, aves, lluvia o viento, mejorar las condiciones de trabajo, en especial en las condiciones extremas exteriores, además de tener la posibilidad de producir especies no endémicas de la región o fuera de temporada, al poder emular condiciones climáticas especiales, obtener mayor precocidad o acortar los ciclos vegetativos. Se tiene, además, una menor evapotranspiración del cultivo que es la pérdida de agua por transpiración vegetal y evaporación del agua del suelo, lo que economiza el riego, al estar protegidas del viento (Barrios C. O. 2004).

A su vez, la incorporación de innovaciones tecnológicas a los sistemas de producción deriva en una mayor competitividad. Para lograr una interpretación precisa de innovaciones que ofrezcan al mercado productos de la mayor calidad se requiere de la investigación y el desarrollo experimental, la difusión de conocimientos y los servicios de asesoramiento de técnicas ecológicas y saludables con el medioambiente y los productores y consumidores (J. del Águila. 2001). Por ejemplo, se puede, además, incorporar el control nutricional de los sistemas hidropónicos, lo que reduce el consumo de agua y las pérdidas por infiltración al subsuelo, además de la ocupación intensiva de mano de obra, de pequeñas superficies.

Con este trabajo se pretende desarrollar un sistema para el control analógico automático de un invernadero. Aunque no se contarán con sistemas de cómputo complejos para el control de todas las variables que intervienen en un sistema hortícola, se pretende controlar las que más influyen en éste, de acuerdo con las especificaciones técnicas de ingenieros fitotecnistas especialistas en esta área. A su vez, se espera abrir un nuevo

mercado para estos sistemas, ya que aumentarían el rendimiento de los pequeños agricultores y estimularían al cambio a quienes no usan estos sistemas.

Para el desarrollo del sistema de control se emplearan comoponentes electrónicos comerciales (COTS - commercial off-the-shelf) caracterizados por ser componentes electrónicos asequibles por el público en general y listos para ser usados, lo que elimina los costos de investigación y desarrollo en instalaciones especializadas. El desarrollo de sistemas con COTS consiste entonces en la elección de los componentes que cubran los requisitos de diseño, basándose en sus especificaciones técnicas, pues éstas limitan los rangos de operación eléctricos y ambientales.

1. *Parámetros más importantes en el desarrollo de una planta*

El crecimiento y desarrollo de los cultivos está influenciado por el clima donde los procesos de fotosíntesis, respiración, división celular, expansión celular, toma de nutrientes y agua, se ven modificados principalmente por la temperatura, déficit de presión de vapor, luz y CO2. (J.C. López. 2001). El conjunto de estos valores, dentro de unos límites máximos y mínimos, determinan el buen metabolismo de las plantas, pues de lo contrario pueden llegar incluso a la muerte. A continuación se describe el impacto de la temperatura, humedad relativa y la humedad del suelo en un cultivo y la forma de controlar éstos en un invernadero.

1.1. Temperatura

1.1.1 Calefacción

Debido a la influencia siempre presente en el metabolismo de una planta, la temperatura resulta ser un factor determinante en cada una de las etapas del desarrollo de ésta. El metabolismo de éstas y su tasa de reacciones metabólicas se ven afectadas por la temperatura; se tiene además que el buen desarrollo de los cultivos se ve afectado por temperaturas extremas, tanto bajas como altas, lo cual lleva al proceso de desnaturalización de enzimas y proteínas (J.C. López. 2001).

El óptimo control de la temperatura de un cultivo está basado en sus necesidades y limitaciones. Para esto, a continuación se definen los siguientes conceptos de temperaturas que indican los valores objetivo a tener en cuenta para el buen funcionamiento del cultivo y sus limitaciones (www.infoagro.com):

- *Temperatura mínima letal*. Aquélla por debajo de la cual se producen daños en la planta.
- *Temperaturas máximas y mínimas biológicas*. Indican valores, por encima o por debajo, respectivamente, del cual no es posible que la planta alcance una determinada fase vegetativa, como floración, fructificación, etc.
- *Temperaturas nocturnas y diurnas*. Indican los valores recomendados para un correcto desarrollo de la planta.

La distribución del jitomate en climas subtropicales caracterizados por regímenes térmicos poco variables y con temperaturas mínimas elevadas las cuales deben mantenerse para que esta especie mantenga un crecimiento óptimo sin presentar síntomas de deterioro. Se tiene entonces que es necesario un control climático en regiones no subtropicales, para evitar que el desarrollo de estas especies quede sujeto a la climatología local, evitando así la acumulación productiva cuando el clima local sea el óptimo para el desarrollo del cultivo y las amplias variaciones en calidad y cantidad de las cosechas debido a variaciones climáticas; al mismo tiempo, los cambios de la actividad metabólica, en ocasiones abruptos, propiciados por la evolución medioambiental conllevan a un envejecimiento prematuro de las plantas y reducen su potencial productivo (P. Lorenzo. 2000).

El control de la temperatura interior del invernadero con el uso de sistemas de calefacción durante el crecimiento y desarrollo de los cultivos posibilita programar la producción de fruto.

En invernaderos pasivos (sin sistemas de control climático) se produce inversión térmica, especialmente en las noches de cielo despejado, cuando el flujo de aire en el interior es mínimo, ocasionando que el aire caliente se acumule en la parte superior de la estructura, quedando en contacto con las plantas el aire frío, lo que puede producir un daño fisiológico cuando la temperatura está debajo de la mínima nocturna e incluso pudiendo alcanzar la temperatura mínima letal. Verlodt (1990) establece el umbral de las temperaturas mínimas nocturnas entre 15 y 18,5 ºC, por debajo de las que se necesitaría incorporación de calor para un adecuado crecimiento y desarrollo de los cultivos antes mencionados (P. Lorenzo. 2000).

Temperaturas inferiores a la recomendada afecta los procesos metabólicos y la producción de materia seca, lo que provoca estrés térmico a la planta y conlleva a una reducción en la producción.

Las variaciones de temperatura de la planta, del aire y del sistema radicular (situado en un medio diferente al aire, generalmente: suelo, sustrato, agua) se presentan debido a (P. Lorenzo. 2000):

· Ciclos diarios (variación regular).
· Ciclos estacionales (variación regular).
· Nubosidad (variación irregular a corto plazo).
· Posición de las hojas en el dosel vegetal (hojas de sol o de sombra).
· Altura del nivel foliar respecto de la superficie del suelo.
· Dimensión foliar.

Las mayores pérdidas de calor del invernadero se producen a través de las paredes y techo, las cuales dependen de las propiedades del material de cubierta (coeficiente global de transmisión de calor, de acuerdo con la Tabla 1) y de las pérdidas por infiltración estrechamente ligadas al tipo de estructura de invernadero, fijación del material de cubierta y al mantenimiento del mismo (uniones, roturas, degradación del material, etc.) (J.C. López. 2000)

El aporte energético necesario para mantener la temperatura mínima requerida se puede determinar conociendo las pérdidas de calor del invernadero, dada mayormente por la cubierta, y el salto térmico ΔT (Tinvernadero – Texterior) a cubrir.

Tabla 1. Coeficiente global de transmisión de calor 'U' (J.C. López. 2001)

Material de cubierta	U (W m^{-2} K^{-1})
Cristal	6,0-8,8
Doble cristal	4,2-5,2
Doble policarbonato	4,8
Polietileno	6,0-7,8
Doble polietileno	4,2-5,5

Entonces, la potencia Q [W] necesaria para mantener un salto térmico, en una superficie A [m^2] desarrollada del invernadero es (J.C. López. 2001):

$$Q = A \cdot U \cdot \Delta T \qquad (1)$$

La distribución del calor aportado por el sistema de calefacción tiene que ser óptimo y eficiente, minimizando los gradientes térmicos en el volumen de aire contenido en el invernadero. Según la forma o formas en que se transfiera el calor del sistema de calefacción al medio (convección, conducción y radiación), se pueden clasificar los sistemas como (J.C. López. 2000):

1 Sistemas de calefacción por convección

Este sistema distribuye el calor a través del aire, el cual es calentado de forma rápida, y, de igual forma, se enfría rápidamente cuando deja de aportársele calor. Se colocan cerca del cultivo, lo que genera grandes gradientes térmicos y pérdidas de calor por el rápido movimiento del aire y, en consecuencia, la rápida distribución y pérdida del calor. Para mejorar la distribución del calor y, con esto, aumentar la eficiencia del sistema, se emplean tubos perforados próximos a las plantas.

Los sistemas de este tipo más utilizados son los generadores de aire caliente de combustión directa y los de combustión indirecta, así como los aerotermos.

2 Sistemas de calefacción por conducción

Este tipo de sistemas utiliza al suelo como superficie de intercambio de calor con el aire, proporcionando calor al suelo a través de tuberías enterradas en él que transportan agua caliente, a temperaturas óptimas para la zona radicular de la planta, distribuyendo el calor uniformemente, teniendo una mayor eficiencia que los sistemas de aire caliente por la mayor superficie de intercambio de calor suelo-aire, y la capacidad de retención de calor del suelo.

3 Sistemas de calefacción por convección y radiación

Estos sistemas usan tuberías con agua caliente distribuidas sobre o entre el cultivo, usando al aire como medio de distribución del calor por convección, y los objetos cercanos a las tuberías (estructura metálica, cubierta, contenedores, suelo) por radiación. Se tiene con estos sistemas unos bajos gradientes térmicos, al estar situada la fuente de calor en una distribución fija y uniforme a lo largo del invernadero, por lo que resulta más eficiente que los sistemas por aire.

1.1.2 Ventilación

Para no sobrepasar la temperatura diurna recomendada, y evitar llegar a la temperatura máxima biológica, es necesario contar son sistemas de ventilación y de refrigeración de los invernaderos, para no afectar el ciclo de desarrollo de los cultivos y mejorar las condiciones internas de trabajo del personal que labore en el invernadero.

La escasa ventilación incide en un aumento de la temperatura interior, llegando a sobrepasar los límites superiores, y, a su vez, genera un escaso intercambio de aire, alcanzando una deficiencia de CO_2. Asimismo, el poco dinamismo del aire en el interior no favorece la dispersión de las partículas suspendidas en éste, provocando excesos de humedad, la cual puede llegar a la condensación y al goteo interno, además de provocar concentración de pesticidas en el ambiente producto de procesos fitosanitarios (J. J. Pérez-Parra JJ. 2003).

Cuatro factores principales que permiten limitar las temperaturas máximas (Montero et al., 1998, en J. J. Pérez-Parra et al. 2001) son:

- La reducción de la radiación solar que llega al cultivo (blanqueado, sombreo, etc.)
- La ventilación.
- La refrigeración por evaporación de agua (nebulización, «cooling system», etc.)
- La evapotranspiración del cultivo, refrigeración por evaporación producida por las plantas.

Del estudio combinado de las distintas maneras de refrigerar se pueden obtener las siguientes conclusiones generales (J. J. Pérez-Parra. 2001):

1. El sombreo tiene más influencia sobre el clima del invernadero cuando la ventilación es escasa.

2. El sombreo es más eficaz en la reducción de temperatura de los tejidos que transpiran muy poco (frutos y flores) que en los de alta transpiración (hojas).

3. En los invernaderos sin plantas o con el cultivo recién transplantado, el sombreo reduce en gran manera la temperatura. Sin embargo, cuando hay otra fuente de refrigeración, ya sea la transpiración del cultivo, la evaporación de agua o el aumento de la tasa de ventilación, el sombreo pierde importancia relativa y tiene menos efecto sobre el clima interno.

4. Durante el tiempo de uso de los equipos de evaporación el invernadero debe estar ventilado.

5. En las primeras fases de desarrollo del cultivo (baja tasa de transpiración por unidad de superficie) los equipos de refrigeración por evaporación son extraordinariamente eficaces incluso en climas húmedos.

Ventilación natural

En condiciones climáticas externas favorables para el desarrollo de los cultivos, la ventilación natural resulta el método más económico y práctico para el control de la

temperatura interna. Sin embargo, cuando el viento está en calma absoluta, la ventilación natural sólo influye en el control de temperatura, siendo ineficiente en la remoción de partículas suspendidas y aumento de la concentración de CO_2.

Las ventanas laterales tienen una mayor eficiencia por unidad de superficie en invernaderos estrechos (Figura 1). La importancia relativa de la ventilación lateral disminuye a medida que aumenta la anchura del invernadero, mientras que la ventilación cenital mantiene su importancia ya que su área crece proporcionalmente a la anchura del invernadero (Pérez Parra JJ. Et al. 2003).

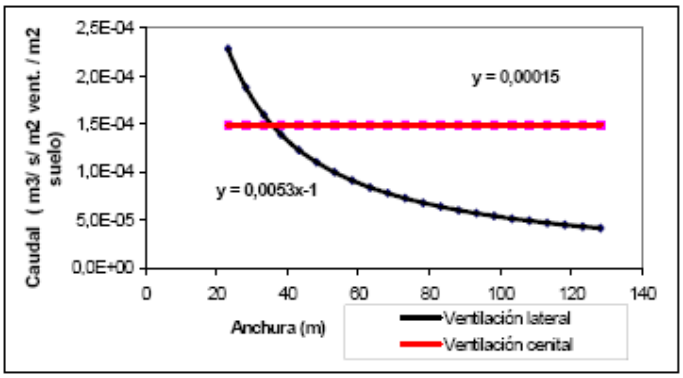


Figura 1. Caudal de ventilación respecto a la anchura del invernadero (Pérez Parra JJ. Et al 2003)

1.2. Contenido de agua en suelo

1.2.1 Riego

El desarrollo de una planta está condicionado a la presencia de radiación solar, CO_2, nutrientes y agua, teniendo así la capacidad de producir biomasa, que incluye raíces, tallos, hojas y frutos. Cuando se abren los estomas de las hojas para permitir la absorción de CO2, se produce una necesaria pérdida de agua a la atmósfera (proceso de transpiración), la cual debe ser repuesta mediante las raíces absorbiendo el agua del suelo. Además de esta cantidad de agua, se tienen que considerar las pérdidas que hay por filtración y evaporación en el suelo, siendo el total de éstas, por transpiración y evaporación, conocida como Evapotranspiración del cultivo la cual debe ser repuesta mediante riego.

La cantidad suministrada de agua debe cubrir sólo las necesidades de evapotranspiración del cultivo. El exceso de agua provoca un lavado de fertilizantes, y su infiltración en el subsuelo, provocando su contaminación. Por otra parte, en suelos pesados es común la concentración de agua provocando encharcamientos y asfixia radicular, en donde, para cultivos sensibles a la cantidad de agua, puede provocar la muerte de la planta. A su vez, la insuficiencia de agua tiende a provocar un déficit hídrico, lo que genera estrés de la planta y, en consecuencia, reducción de la producción. En días muy soleados, la deficiencia en el suministro de agua a la planta, puede provocar quemaduras en las hojas por excesivas pérdidas al momento de la transpiración.

La evapotranspiración tiene como base la evaporación del agua, fenómeno que requiere una fuente de energía, en este caso la radiación solar. Además, es necesaria una diferencia de presión de vapor (déficit de presión de vapor, DPV) entre la superficie evaporante y el aire que la rodea (Fernández M. et al. 2001). El viento actúa removiendo las capas próximas a la superficie evaporante, las cuales contienen una alta cantidad de agua, mezclándolas en el volumen total de aire contenido en el invernadero, evitando así la saturación de las capas próximas a la superficie evaporante, y por tanto se detenga el proceso de la evapotranspiración.

La temperatura y humedad relativa influyen en el DPV. Humedades cercanas al 100%, reducen el índice de evapotranspiración e inhiben la absorción de nutrientes, particularmente el calcio, y todo ello deviene en enfermedades para la planta (Garzoli K., 1989). Se ha observado que la transpiración depende de la radiación, reduciéndose drásticamente en un día nublado respecto a un día soleado; también se puede observar la alta sensibilidad de la transpiración a las variaciones de radiación (Fernández M. et al. 2001).

Se debe tomar en cuenta, además, la salinidad del agua. No solo basta agua de buena calidad, sino también su buen manejo, para obtener una óptima producción. Un agua de mala calidad puede causar problemas relacionados con el suelo y con el cultivo, reduciendo la producción. La calidad del agua empleada se puede medir a través de su conductividad eléctrica, teniendo ésta valores altos, por la mayor presencia de sales que aumentan su conductividad. Para evitar la acumulación excesiva de sales en el suelo, se debe añadir una cantidad extra de agua, denominada fracción de lavado, la cual remueve las sales del suelo. En la Tabla 2 se muestra la cantidad de agua que debe añadirse al

volumen estimado de agua, calculados a partir de la fracción de lavado, en función de la conductividad eléctrica (CAJAMAR, 2005).

C.E. (mmhos/cm) ó (dS/M)	Judía	Pimiento	Pepino	Tomate	Melón
0,5	1,04	1,03	1,03	1,02	1,02
1,0	1,08	1,06	1,05	1,04	1,03
1,5	1,13	1,10	1,08	1,06	1,05
2,0	1,18	1,13	1,11	1,09	1,07
2,5	1,24	1,17	1,14	1,11	1,08
3,0	1,30	1,21	1,18	1,14	1,10
3,5	1,37	1,26	1,21	1,16	1,12
4,0	1,44	1,31	1,25	1,19	1,14
4,5	1,53	1,36	1,29	1,22	1,16
5,0	1,63	1,42	1,33	1,25	1,19

Tabla 2. Valores del factor de mayoración (f) según la conductividad eléctrica del agua de riego (CE) para algunos cultivos hortícolas. (CAJAMAR, 2005)

Los métodos de programación del riego, como el conjunto de procedimientos técnicos desarrollados para predecir cuánto y cuándo regar, se basan en (Fernández M. et al. 2001):

1. Medida del contenido de agua en el suelo

Se establece un rango de humedad del suelo y, a través de sensores que miden la cantidad de agua en el suelo, se programa el suministro de agua de acuerdo con los requerimientos del cultivo a lo largo del día.

2. Medida del estado hídrico de la planta

Se estima la transpiración de la planta a través de la medición directa de las pérdidas de agua de una parte de la planta, de la planta entera o de un grupo de plantas, o midiendo algunas otras características relevantes de las plantas. El uso de sensores como los de medida del diámetro de los órganos de la planta o los de flujo de savia permite determinar el estado hídrico del cultivo.

3. Medida de parámetros climáticos

Mediante ecuaciones, predicciones y relaciones entre parámetros climáticos y el estado de desarrollo del cultivo se estima el volumen de agua consumido por el cultivo.

Las dosis de riego estimadas para cada especie son consumos óptimos, que no toman en cuenta manejos específicos del cultivo en determinadas fases como, la reducción del riego para incrementar el contenido de azúcar del fruto en melón y sandía, aumentar el enraizamiento del cultivo, regular el crecimiento vegetativo, etc. (CAJAMAR, 2005).

Además, en los métodos que emplean la medida del estado hídrico de la planta o de los parámetros climáticos pueden producirse diferencias entre el consumo real de agua por el cultivo y el estimado debido a la variación climática diaria y el desarrollo siempre presente de la planta. Sin embargo esta diferencia no resulta significante si se tiene en cuenta que la capacidad del suelo de almacenar agua, la cual puede ser extraída por el

cultivo para compensar o disminuir las diferencias (CAJAMAR, 2005). En el método que mide la cantidad de agua en el suelo se tendrá siempre la cantidad de agua en suelo en un intervalo predefinido, por lo que resulta más eficiente para el desarrollo de la planta. Por tanto, a continuación se describen las características de éste método.

Medida del contenido de agua en el suelo

El suelo actúa como un depósito de agua, la cuál en un invernadero es suministrada por los sistemas de riego de acuerdo con algún criterio de control. Como se describió, no toda el agua depositada en el suelo es absorbida por el cultivo, teniéndose entonces que el agua almacenada en el suelo y que puede ser utilizada por el cultivo (agua total disponible) resulta de la diferencia entre la cantidad de agua almacenada a Capacidad de Campo (contenido de agua a una tensión de humedad del suelo de 1/3 atm) y Punto de Marchitez Permanente (contenido de agua a una tensión de humedad en el suelo de 15 atm) (Allen et al., 1998). La Capacidad de Campo es el contenido de agua de un suelo cuando ha sido mojado abundantemente por riego y después se ha dejado drenar libremente hasta que éste sea despreciable, y PMP es el contenido de agua que hay en un suelo cuando la planta se marchita de forma permanente (Fernández M. et al. 2001).

A partir del riego hasta alcanzar la capacidad de campo, la transpiración de la planta transcurre libremente; sin embargo, al ir disminuyendo la cantidad de agua, por evapotranspiración, los procesos fisiológicos de la planta y, en consecuencia, su desarrollo se ven afectados conforme se llega al Punto de Marchitez Permanente, por lo que el riego debe presentarse antes de alcanzar el Punto de Marchitez Permanente, tal que la planta nunca sufra de estrés hídrico.

La cantidad de agua en el suelo durante varios ciclos de riego se muestra en la Figura 2. El límite superior se establece para evitar el drenaje, y por tanto lavado de fertilizantes, y el límite inferior para evitar que sufra estrés hídrico el cultivo.

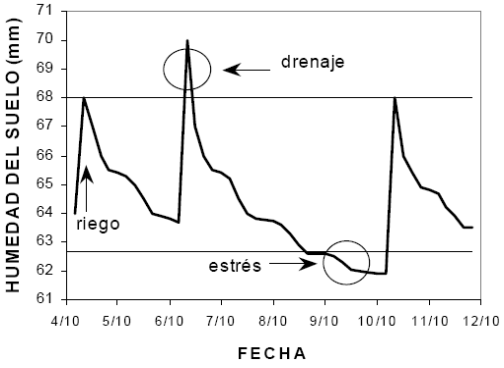


Figura 2. Cantidad de agua en suelo (Fernández M. et al. 2001)

1.3. Humedad relativa atmosférica

La humedad absoluta de un volumen de aire se define como la cantidad de agua que contenga cada metro cúbico, y depende de la evaporación. La capacidad del aire para retener agua es la humedad relativa (medida en tanto por ciento), proceso que requiere de energía para y, por tanto, depende de la radiación solar (ligada generalmente a la temperatura) esto es, la cantidad de agua en cada unidad de volumen en relación con la máxima cantidad que en las mismas condiciones podría retener.

Cuando la humedad relativa es del 100 por ciento se dice que está saturada, por lo que su capacidad de retener agua es cero. Si se mantiene la humedad absoluta pero se aumenta la temperatura, entonces se tiene una disminución de la humedad relativa (por el aporte calorífico) y la capacidad de retener agua aumenta, por lo que se observa una relación inversa entre la temperatura y la humedad relativa.

A diferencia de la temperatura o la cantidad de agua, existe poca información de cómo responden cultivos específicos a la humedad. La humedad puede estresar a las plantas, tanto si es alta o baja. Además, existen muchas dificultades para su medición y control, siendo el método más frecuente el de los intercambiadores de aire, aunque éstos resultan ineficientes en climas húmedos. Además, es fácil incrementar el nivel de humedad interna en un invernadero, en ocasiones como consecuencia de otros procesos como el riego o la pulverización de agua para reducir la temperatura.

La humedad relativa del aire afecta el rendimiento de los cultivos, pues con valores excesivos las plantas reducen la transpiración y disminuyen su crecimiento, se producen abortos florales por apelmazamiento del polen y un mayor desarrollo de enfermedades; la mayoría de esporas patógenas germinan a más de 90 por ciento de humedad relativa, con lo que se tiene un control de enfermedades eficiente, sin recurrir a agroquímicos, teniendo la humedad relativa debajo de este valor. Por el contrario, si es muy baja, las plantas transpiran en exceso, pudiendo deshidratarse, o tener problemas para alcanzar su desarrollo óptimo.

Para reducir la humedad relativa se emplean extractores de aire, sistemas de calefacción y la dosificación de riego, evitando la acumulación excesiva de agua en suelo. Para aumentarla, se requiere de sistemas de ventilación, pulverizadores de agua al ambiente, riego, llenado de canales de agua o de algún método de enfriamiento del invernadero.

Uno de los factores principales que hacen difícil interpretar a cualquier parámetro en el interior de un invernadero, es la interacción entre éstos, en especial el de la humedad y la temperatura. Si la temperatura aumenta, el aire puede retener más agua, y la humedad relativa desciende aunque estrictamente la cantidad de agua sea la misma.

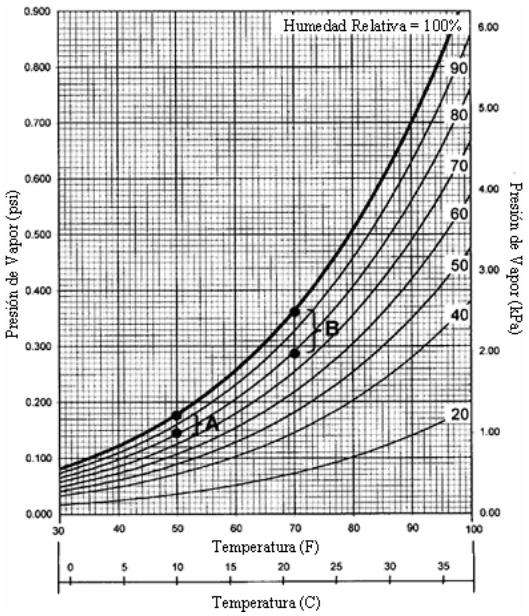


Figura 3. Influencia de la temperatura en la humedad relativa [J. Prenger, Jessica, Ohio State University]

La diferencia entre la cantidad de agua en el aire a una temperatura dada y la cantidad que éste puede contener a esa temperatura se define como Déficit de Presión de Vapor (DPV). A un bajo nivel de DPV (el aire tiende a saturación) la transpiración puede ser demasiado baja. Mientras que a un alto DPV (aire seco) la transpiración puede resultar excesiva.

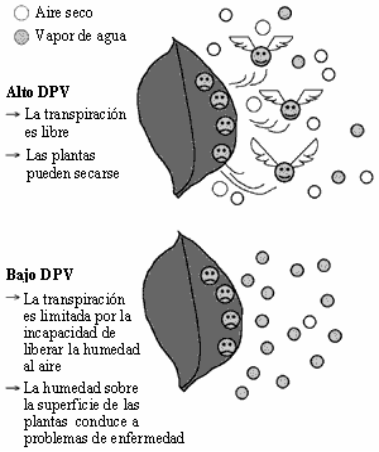


Figura 4. Influencia del valor de DPV en la transpiración de las plantas [J. Prenger, Jessica, Ohio State University]

El Déficit de Presión de Vapor es una forma práctica para expresar el flujo de vapor en el sistema, tanto para condensación como para transpiración [J.J. Prenger, 2001]. Altos niveles de DPV incrementan la demanda de transpiración, influenciando cuánta humedad de los tejidos de la planta se transfiere al aire del invernadero. En consecuencia, el DPV indica que el cultivo requiere ser irrigado. En contraste, un nivel muy bajo de DPV indica una proximidad al punto de saturación, por lo que se puede tener una condensación dañina, pues algunas bacterias requieren concentraciones de agua para desarrollarse en la planta.

1. *Tecnología actual*

Se listarán a continuación los sistemas existentes en el mercado y sus características, así como su precio. Esta información es con fines informativos, para comparación de las características y costos, sacada de sus respectivas páginas de Internet. No se pretende con esto recomendar o no alguno de los sistemas aquí mostrados.

2.1 Métodos de medición

2.1.1 Temperatura

Para medir la temperatura existen muchas técnicas. A continuación se listan algunos de los modelos comerciales, con sus características y su precio unitario al momento de la consulta.

Ductstat Plug-In Thermostat



Figura 5. Ductstat Plug-In Thermostat

Este control es capaz de operar automáticamente un ventilador conectado a ductos internos distribuidores de aire al invernadero. El control se activa cuanto el sensor detecta la temperatura preestablecida en el invernadero. Este sensor soporta una carga maxima de 10A. Su precio en el mercado es de 47USD.

Heating-Cooling Thermostat Model Temp-H/C



Figura 6. Heating-Cooling Thermostat

Este control de temperatura puede cambiar fácilmente entre equipos de calefacción y refrigeración oprimiendo un interruptor. El sensor hidráulico de la bobina externa provee un factor de tolerancia de 4°C para la conmutación de los equipos, con un costo de 149USD. Para un control de la temperatura más exacto, ese puede elegir el modelo con un factor de tolerancia de 1°C, con un costo de 159USD. Soporta una carga de 15A a 110V.

CAP Cooling Thermostat TMP-1



Figura 7. CAP Cooling Thermostat

Fácil de usar, este termostato para controlar la temperatura de refrigeración mantiene la temperatura interna dentro de un rango de 10 a 46 °C (de 50 a 115 °F). Soporta una carga de 15A a 120V. Su costo es de 83.95USD.

CAP Heating Thermostat

Permite el control de los sistemas de calefacción con alguna de las dos posibilidades de control que posee. Puede desactivar sistemas de calefacción puestos en funcionamiento por los operadores, ya que al superarse la temperatura máxima establecida, apaga los sistemas que la elevaron. También puede funcionar para encender algún sistema de calefacción al detectar la temperatura mínima establecida. Soporta una carga de 15A a 110V. Su costo es de 73.95USD.



Figura 8. CAP Heating Thermostat

2.1.2 Contenido de agua en suelo

Ahora se listan los modelos existentes para la medida de la cantidad de agua en suelo, basándose en distintas técnicas y el precio medio en que se encuentran.

Tensiómetro

El tensiómetro opera como una raíz artificial que mide qué tan fácilmente las raíces de la planta pueden absorber agua de la tierra a su alrededor. Se compone de una cápsula cerámica porosa llena de agua que está conectada a un manómetro o indicador de vacío (vacuómetro) a través de un tubo lleno de agua. Se entierra en el suelo a la profundidad de medición deseada, ejerciendo éste una tensión sobre el agua de la columna, que hace descender su altura, pasando al suelo y provocando por tanto una presión negativa. Suelos secos tienen una presión alta, suelos húmedos baja. Son técnicas visuales y no permiten un control automático de forma directa. Su costo medio es de 100USD.



Figura 9. Tensiómetro

Watermark

Consta de dos electrodos envueltos en una matriz de yeso, rodeada ésta por una membrana sintética, para evitar deterioro, quedando protegida contra la salinidad. Los sensores se localizan en el bulbo húmedo y en la zona de las raíces, para así obtener una buena medida. El flujo de agua entre el suelo y el sensor resulta en un cambio en la resistencia eléctrica entre los electrodos en el sensor. La resistencia eléctrica puede convertirse entonces en potencial de agua en suelo (kPa o bar). Su costo medio es de 30USD.



Figura 10. Watermark

TDR (Time Domain Reflectometry)



El método de reflectometría en el tiempo permite medir la constante dieléctrica del suelo midiendo el tiempo de recorrido de un pulso electromagnético que se introduce en el suelo a través de dos varillas de acero inoxidable. Este tiempo de recorrido es proporcional a la constante dieléctrica del suelo, variando ésta con el contenido de agua del suelo. Su precio oscila entre los 3000 y los 7000USD.

Figura 11. TDR

Dielectric Sensor

Para suelos secos, la constante dieléctrica del suelo, cuan fácil el suelo puede conducir una señal eléctrica, tiene un valor bajo, y para suelos húmedos, este valor aumenta. Para medir la constante dieléctrica, este tipo de sensores generan una señal en AC, para evitar errores de lectura debidos a los cambios de temperatura. La señal se aplica al suelo para detectar los cambios de sus propiedades dieléctricas ligados a su contenido de agua. Su costo está entre los 100 y 500USD.



Figura 12. Dielectric Sensor

2.1.3 Humedad relativa atmosférica

Finalmente se listan los controladores de Humedad Relativa existentes.

Green Air Products Model RHC & RHC(R) Relative Humidity Controllers

El controlador de Humedad Relativa RHC puede controlar humidificación o dehumidificación, seleccionando su uso a través de un interruptor. El modelo RHC posee un sensor interno que posee un error de +/-5%. Soporta una carga de 15A a 120V, con un costo de 299USD. El modelo RHC(R) es similar al modelo RHC, excepto por el sensor remoto de 6 metros de longitud que el modelo RHC(R) posee, con un costo de este modelo de 329USD. Proporcionan un control de 5% a 95% de humedad relativa, en intervalos de 5%. Trabaja en un rango de 0 a 50 °C y de 5% a 95% de humedad relativa en ambientes no condensativos.



Figura 13. Green Air Relative Humidity Controller

iGS-030 Day/Night Relative Humidity Controller

El controlador de humedad relativa iGS-030 es capaz de operar los sistemas de humidificación o dehumidificación de acuerdo con las especificaciones diurnas y nocturnas del usuario. El valor de la humedad relativa atmosférica es mostrada en la barra gráfica luminosa. El error de precisión del sensor es de 3% , con la opción de ser calibrada. Tiene un rango de control de 0 a 100% de humedad relativa y soporta una carga de 15A a 120V, o de 1HP. Su costo es de 209USD.



Figura 14. iGS-030 Relative Humidity Controller

Total Humidity Controller



Figura 15. Total Humidity Controller

Este controlador de humedad mantiene la humedad relativa basada en el aire en un valor ajustable por el usuario. Cuando el controlador detecta un valor de humedad demasiado alto o demasiado bajo, éste activa ventiladores o humidificadores, para así reducir o incrementar el valor de la humedad del aire. Soporta una carga de 15A. Su costo es de 125USD.

2.2 Sistemas de control climático

Se listan ahora sistemas que controlan múltiples variables al mismo tiempo.

Model MCC-1 Micro Climate Controller by Green Air Products

El Control de Micro Clima MCC-1 está diseñado para permitir la mayor cantidad de funciones requeridas en un ambiente automático de desarrollo, como son temperatura, humedad, enriquecimiento de dióxido de carbono, iluminación e irrigación. El controlador incorpora un termostato externo para refrigeración, un sensor de humedad para dehumidificación, un reloj de 24 horas como timer, un foto-sensor y un timer cíclico. El enriquecimiento de dióxido de carbono puede ajustarse por medio del timer o por el sensor de luz, al ser ésta máxima, enriquecer el ambiente por la excesiva transpiración de las plantas. El control de irrigación se hace por medio del timer, regando periódicamente de acuerdo con tablas de consumo de la planta. Soporta una carga máxima de 15A a 110V. Su costo es de 749USD.



Figura 16. Green Air Micro Climate Controller

C.A.P. Complete Greenhouse Controller CGC-1

Tiene dos salidas para el control de iluminación por medio del encendido de lámparas. Cuenta con un reloj, con lo que se puede controlar al suministro de dióxido de carbono o la activación de bombas de riego. Dos salidas más del controlador sirven para el control de ventiladores o algún sistema de aire acondicionado. Los sensores internos de temperatura y humedad pueden mantener condiciones preestablecidas de estos parámetros. Las dos salidas hidropónicas permiten el control de las bombas por medio del control interno ART (Adjustable Recycling Timer). Un interruptor selector permite al usuario determinar si el ciclo de riego de las bombas de riego se active sólo cuando haya luz o durante las 24 horas del día. Una salida más se activa cuando se apagan las luces, lo que permite un control nocturno de humedad, mediante un dehumidificador o para la temperatura por medio de un calefactor. Soporta una carga de 15A a 120V. Su costo es de 599USD.



Figura 17. C.A.P. Complete Greenhouse Controller



El modelo C.A.P. Xtreme Greenhouse Controller XGC-1, posee las mismas características que el modelo CGC-1, con la diferencia de que el control de dióxido de carbono es por medio de lógica difusa, reduciendo el suministro de éste conforme se acerca al límite establecido, reduciendo así un sobrepaso y reduciendo el consumo energético. Su costo es de 959USD.

Figura 18. C.A.P. Xtreme Greenhouse Controller

Harvest-Master Climate Controller

Este controlador incluye sensores para humedad y temperatura, así como tres interruptores con relevador. Con las combinaciones apropiadas, se puede controlar la luz, ventilación, nivel de CO_2, refrigeración y aire acondicionado, calefacción, humidificación, dehumidificación, o algún proceso que requiera de un temporizador. Su costo es de 975USD.



Figura 19. Harvest-Master Climate Controller

Micro Climate Controller



El Controlador Micro-Climate incorpora un termostato para refrigeración, un sensor de humedad para dehumidificador, un temporizador para secuencias cronométricas (que permiten regular flujo y reflujo de aire o ciclos de CO_2), un temporizador de 24 horas, y un foto-sensor. Con el relevador adicional que soporta alta corriente se puede controlar además sistemas de refrigeración y calefacción. Su costo es de 625USD.

Figura 20. Micro Climate Controller

3. *Propuesta y desarrollo de una alternativa más económica*

1.1. Control de temperatura

La Figura 21 muestra la variación diaria de la temperatura interna de un invernadero típico sin sistema de control. Para el control se consideran las temperaturas máximas y mínimas biológicas como los topes de temperatura permitidos en el invernadero, con lo que se tienen los parámetros de control.

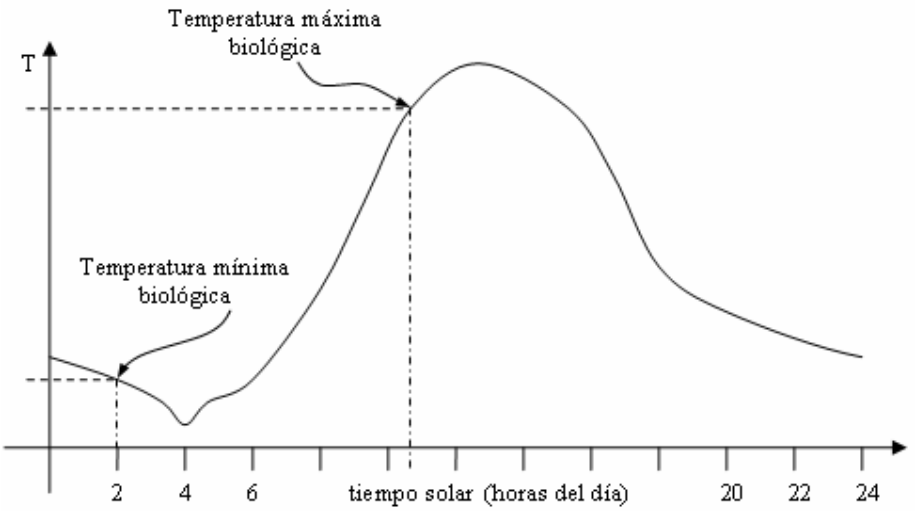


Figura 21. Comportamiento natural de la temperatura interna de un invernadero

De la figura anterior, se observan los dos casos de control, la temperatura superior, Ts, y la inferior, Ti. Para el caso de Ts, en el momento en que la temperatura interna del invernadero, de acuerdo con su comportamiento natural, supere el valor de la temperatura máxima biológica, $T_{MÁX}$, para la especie cultivada, se activará el sistema de refrigeración, que en este caso consiste en la apertura de las cortinas laterales del invernadero, provocando un descenso gradual de la temperatura, hasta alcanzar una temperatura de control superior, T_{CTRLs}, momento en el que se apaga el sistema de refrigeración, con lo que vuelve a aumentar la temperatura, esto con el fin de evitar un encendido/apagado inestable del sistema de refrigeración, dejando un gradiente de temperatura superior $\Delta Ts = T_{MÁX} - T_{CTRLs}$ entre encendido y apagado. Con el sistema de refrigeración apagado, se deja que el sistema retome su comportamiento natural, y si vuelve a sobrepasar $T_{MÁX}$, el sistema de refrigeración vuelve a entrar en funcionamiento.

Para la temperatura inferior, Ti, el valor de control es la temperatura mínima biológica, $T_{mín}$, siendo que cuando el comportamiento natural de la temperatura interna alcance este valor, se active el sistema de calefacción, elevando la temperatura hasta alcanzar una temperatura de control inferior, T_{CTRLi}, apagándose la calefacción en ese momento, con el gradiente de temperatura inferior $\Delta Ti = T_{mín} - T_{CTRLi}$. Si la temperatura vuelve a descender de $T_{mín}$, el sistema de calefacción se activa nuevamente. La Figura 22 muestra el comportamiento de la temperatura interna para cada caso.

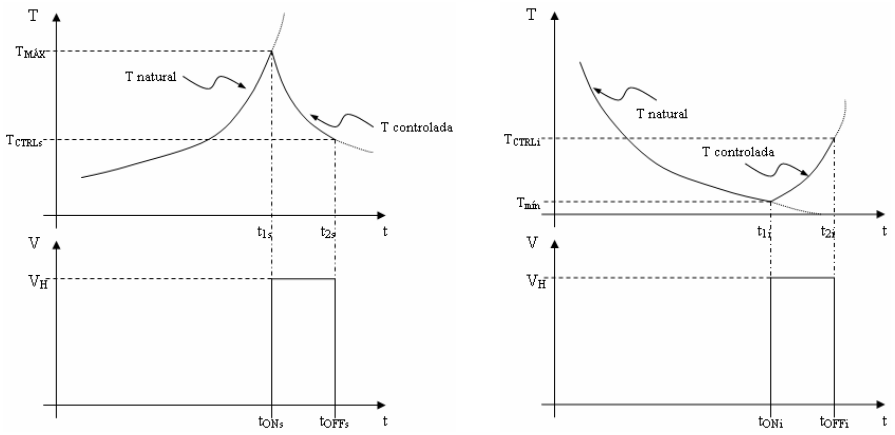


Figura 22. Comportamiento de la temperatura interna controlada (a) superior y (b) inferior

El ciclo diario completo con el sistema de control de temperatura interna del invernadero se muestra en la Figura 23. La línea negra representa el comportamiento natural y la línea roja el comportamiento con sistemas de control inferior y superior.

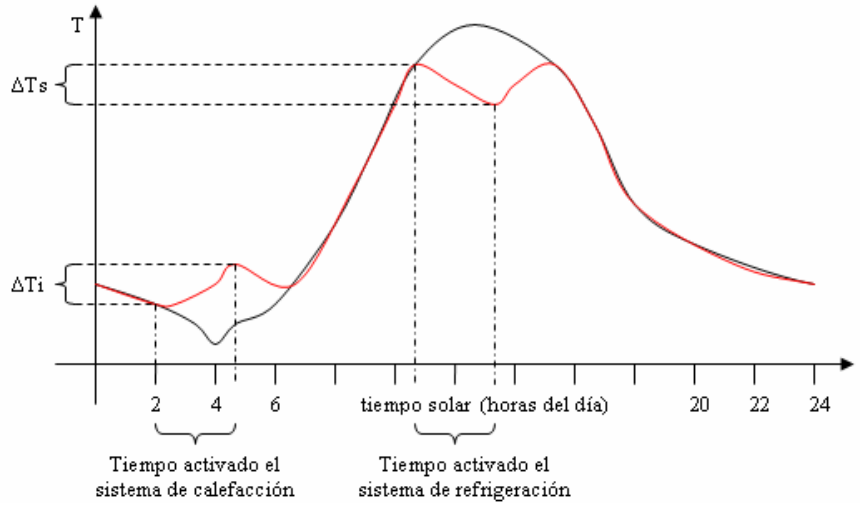
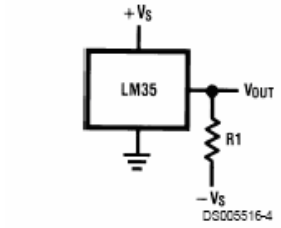


Figura 23. Comportamiento de la temperatura interna sin y con sistema de control

Como sensor de temperatura se usa el circuito integrado LM35, un sensor de precisión de temperatura en grados centígrados, conectado tal que cada 10 mV representan un grado centígrado de la forma que sigue



$R_1 = -V_S/50\ \mu A$
V_{OUT} = +1,500 mV at +150°C
= +250 mV at +25°C
= −550 mV at −55°C

Figura 24. Sensor de Temperatura [°C]

Para el caso que se quiera trabajar en un intervalo de -10 a 90 °C, se tiene que la salida del LM35 está entre (-10, 90) [°C]*0.01 [V/°C], esto es, de -0.1 a 9 V.

Para la etapa de control, se requerirá una entrada de 0 a 10 V, por lo que se debe ajustar la salida del sensor a este rango de valores, usando para ello un amplificador no inversor con Amplificadores Operacionales, con una ganancia de 10, en este caso, y un sumador no inversor para ajustar a cero. El diagrama queda como muestra la Figura 25, en donde el V_{IN} es la tensión V_{OUT} del sensor de temperatura LM35, de la Figura 24.

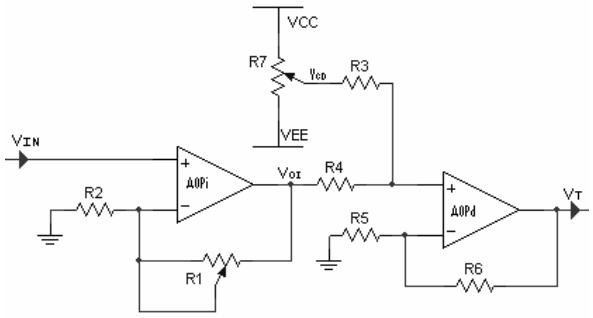


Figura 25. Acoplamiento del sensor de temperatura a la etapa de control

La primera parte del circuito, formada por R1, R2 y el AOP izquierdo, está conectada de tal forma que opera como un amplificador no inversor, cuya salida V_{OI} es

$$V_{OI} = \left(1 + \frac{R1}{R2}\right) V_{IN} \tag{2}$$

Dado que 0.01V equivale a 1°C, se requiere una alta precisión en cuanto a la ganancia, por lo que se operará con una resistencia variable, R1, y la otra fija, R2, para compensar la tolerancia de las resistencias. Para obtener una ganancia de 10, R1 debe ser 9 veces R2, pero para tener un intervalo de ajuste se tendrá a R1= 10R2. Con esto, se tiene un circuito cuya salida va desde Vin, con R1→0, hasta 11Vin, con R1 = 10R2. Se elige, entonces, R1 un trimpot de 10kΩ y R2 una resistencia de 1kΩ.

El circuito del lado derecho, formado por el operacional AOPd y R3 hasta R6 forma un sumador no inversor con una ganancia dada por

$$V_T = \left(1 + \frac{R6}{R5}\right)\left(V_{CD}\frac{R4}{R3+R4} + V_{OI}\frac{R3}{R3+R4}\right) \tag{3}$$

Si R3 =R4 =R5 =R6, entonces $V_T = V_{CD} + V_{OI}$, con lo que se tiene el ajuste a cero variando V_{CD}, el cual se obtiene a través de la resistencia variable R7. Para evitar los problemas de acoplamiento entre el divisor de tensión dado por R7 y la resistencia de entrada al sumador R3, se elige R3 =100kΩ y R7 un potenciómetro de 10kΩ.

Finalmente, la salida V_T, que representa la temperatura T, con ajuste a cero en -10°C, y con $V_{TMÁX}$= 11V para 50°C, está dada por la siguiente expresión

$$V_T = T[°C] * 0.2[V/°C] + 1[V] \tag{4}$$

3.1.1. Sistema de control

3.1.1.1. El C.I. 555 como controlador con histéresis

Para el control de un parámetro de un proceso continuo en el que su variación debe estar dentro de un rango óptimo de operación del proceso, en el cual el valor del parámetro tiende a bajar o a subir hasta un mínimo y un máximo, respectivamente, pero en el que no es necesario mantenerlo constante en los extremos, mientras se encuentre dentro del rango de operación, se puede utilizar un control con histéresis, en el que existe un retardo entre el instante de encendido y apagado del sistema a controlar.

Por ejemplo, al aumentar el parámetro al máximo valor permitido se enciende algún equipo que disminuya su valor hasta un límite especificado en el cual se apaga éste, con lo que el proceso se sujetará nuevamente a su variación natural, como se muestra en la Figura 22.

Para obtener este control de Encendido/Apagado de acuerdo con V_{N1} y V_{N2} haciendo uso del circuito LM555, se conecta como muestra la Figura 26, en donde V_{CTRL} corresponde a la tensión de control que va al sistema a controlar, permaneciendo éste encendido mientras V_{CTRL} esté en HI digital. V_{CC} es común a todo el circuito tal que, para un circuito ideal, $V_{CC} = V_{HI}$, y $GND = V_{LO}$, son los valores que pueden tomar las entradas V_{Nx}.

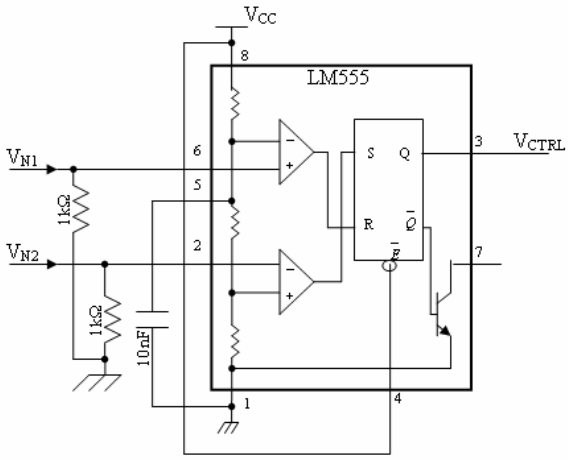


Figura 26. Conexión del circuito LM555

De acuerdo con el modelo interno del circuito 555, mostrado en la Figura 26, se observan dos comparadores operacionales, un Flip-Flop común y un transistor de descarga. La salida del comparador operacional inferior está conectada a la entrada SET (establecimiento) del Flip-Flop, y el comparador superior a la entrada RESET (reestablecimiento). A su vez, se muestra un arreglo de resistencias que operan como divisor de tensión, en tercios iguales, de donde se tiene que en la entrada no inversora del comparador inferior (de establecimiento) habrá $⅓V_{CC}$ y para la entrada inversora del comparador superior (de reestablecimiento) habrá $⅔V_{CC}$.

Se tiene, además, la terminal 4 de ENABLE (restablecimiento) del Flip-Flop en HI, y la terminal 5 de CONTROL del valor de la tensión de la entrada inversora del comparador

de reestablecimiento está conectada a GND a través de un capacitor para minimizar los efectos del ruido eléctrico.

Para el caso en el que se comience con $V_{N1}= V_{N2}= V_{HI}$, se tiene que la tensión en la terminal SET del Flip-Flop, V_{SET}, que es la salida del comparador de establecimiento, está en LO y la tensión en la terminal de RESET, V_{RES}, la salida del comparador de reestablecimiento, en HI, por lo que el Flip-Flop se reestablece y se tiene V_{CTRL}= LO; cuando $V_{N1}=V_{LO}$ y $V_{N2}= V_{HI}$, al variar con el tiempo el valor del parámetro de control hasta alcanzar el valor de apagado, pero sin haber alcanzado antes el de encendido, se tiene V_{SET}= LO y V_{RES}= LO, por lo que el estado del Flip-Flop se mantiene con V_{CTRL}= LO.

Cuando el parámetro de control alcanza el valor máximo permitido, se tiene que $V_{N1}= V_{N2}= V_{LO}$, lo que lleva V_{SET}= LO y V_{RES}= HI, por lo que el FLip-Flop se establece y V_{CTRL}= HI, lo que enciende un sistema de control que cambia la dirección de variación del parámetro de control, llevando casi de inmediato el circuito a la condición $V_{N1}=V_{LO}$ y $V_{N2}= V_{HI}$ con V_{SET}= LO y V_{RES}= LO, lo que mantiene el estado del Flip-Flop con V_{CTRL}= HI. Cuando se alcanza el valor de apagado, se tiene la condición inicial de $V_{N1}= V_{N2}= V_{HI}$, con lo que V_{SET}= LO y V_{RES}= HI y se reestablece el Flip-Flop, teniendo nuevamente V_{CTRL}= LO, reiniciándose así el ciclo de operación de este sistema. En la Tabla 3 se muestra este ciclo de operación.

Tabla 3. Ciclo de operación del sistema de Control con Histéresis

tiempo ↓	V_{N1} [Terminal 6]	V_{N2} [Terminal 2]	Sistema de Control
	1	1	Apagado
	0	1	Apagado
	0	0	Encendido
	0	1	Encendido
	1	1	Apagado

3.1.1.2. Sistema control de temperatura

Para el caso del control Encendido/Apagado, en el que está definido el intervalo de operación del sistema como indica la Figura 22, se tiene el ciclo de operación mostrado en la Tabla 4 para el control superior, tomando como condición inicial una temperatura inferior a T_{CTRLs} y que T está en la etapa ascendente. Este ciclo de operación es equivalente al descrito en el apartado anterior, por lo que su control puede ser hecho con el circuito integrado 555.

Tabla 4. Ciclo de operación del Control Superior de Temperatura

tiempo ↓	Temperatura Interna	V_{TM1}	V_{TM2}	Acción Calefacción
	$T < T_{CTRLs}$	1	1	Apagado
	$T_{CTRLs} < T < T_{MÁX}$	0	1	Apagado
	$T > T_{MÁX}$	0	0	Encendido
	$T_{CTRLs} < T < T_{MÁX}$	0	1	Encendido
	$T < T_{CTRLs}$	1	1	Apagado

$T_{MÁX}$ podrá se fijada por el usuario en cualquier momento y T_{CTRLs} dependerá de la expresión para el gradiente de temperatura superior $\Delta Ts = T_{MÁX} - T_{CTRLs}$, de donde $T_{CTRLs} = T_{MÁX} - \Delta Ts$, pudiendo variar ΔTs en un rango de 1 a 10 °C con un control oculto a la vista del usuario. La Figura 27 muestra el diagrama de este circuito con V_T como entrada y V_{OUT1} como salida.

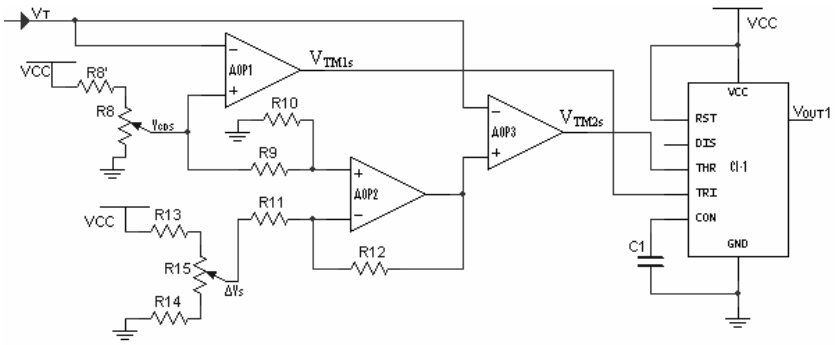


Figura 27. Circuito de control superior con histéresis

Para cumplir con el ciclo de operación descrito en la Tabla 4 se requiere que cuando la temperatura alcance el valor de T_{CTRLs}, la terminal 6 del 555 (THRESHOLD o umbral) pase de V_{HI} a V_{LO}, lo que se logra con el amplificador operacional AOP3 configurado como comparador inversor, cuya entrada es V_T y la referencia está dada por $V_{CTRLs} = V_{CDs} - \Delta V_S$, y su salida es equivalente a V_{TM2s}. El valor de V_{CDs} va de 0V a $V_{CDs_MÁX} = V_{CC} \frac{R8}{R8 + R8'}$, seleccionándose R8' tal que $V_{CDs_MÁX} = 10V$

V_{CTRLs} se obtiene de la diferencia de V_{CDs} con ΔV_S por medio del AOP2 configurado como diferencial, cuya ganancia es unitaria al ser R9= R10= R11= R12. Para que ΔV_S varíe de 1 a 10 °C se emplea un divisor de tensión formado por dos resistencias fijas (R13 y R14) y una variable entre éstas (R15). La tensión de salida máxima para este arreglo es V_{CC}*(R14+ R15)/(R13+R14+R15) y la tensión mínima es V_{CC}*R14/(R13+R14+R15), cuyos valores dependen de V_{CC}.

Cuando la temperatura sea $T_{MÁX}$, la terminal 2 del 555 (TRIGGER o disparo) debe pasar de V_{HI} a V_{LO}. En este caso se emplea un amplificador operacional configurado como comparador inversor con entrada V_T y referencia V_{CDs} y cuya salida es V_{TM1s}.

Para el control inferior, con condición inicial de una temperatura superior a T_{CTRLi} y T en su etapa descendente, su ciclo de operación se describe en la Tabla 5, con lo que se observa que su control puede ser hecho de igual forma con el circuito integrado 555.

Tabla 5. Ciclo de operación del Control Inferior de Temperatura

tiempo ↓	Temperatura Interna	V_{TM1}	V_{TM2}	Acción Refrigeración
	$T > T_{CTRLi}$	1	1	Apagado
	$T_{CTRLi} > T > T_{mín}$	0	1	Apagado
	$T < T_{mín}$	0	0	Encendido
	$T_{CTRLi} > T > T_{mín}$	0	1	Encendido
	$T > T_{CTRLi}$	1	1	Apagado

$T_{mín}$ se fija por el usuario en cualquier momento y T_{CTRLi} depende de la expresión para el gradiente de temperatura inferior $\Delta Ti = T_{CTRLi} - T_{mín}$, de donde $T_{CTRLi} = T_{mín} + \Delta Ti$, pudiendo de igual manera variar ΔTi en un rango de 1 a 10 °C con un control oculto a la vista del usuario. La Figura 28 muestra el diagrama de este circuito con V_T como entrada y V_{OUT2} como salida.

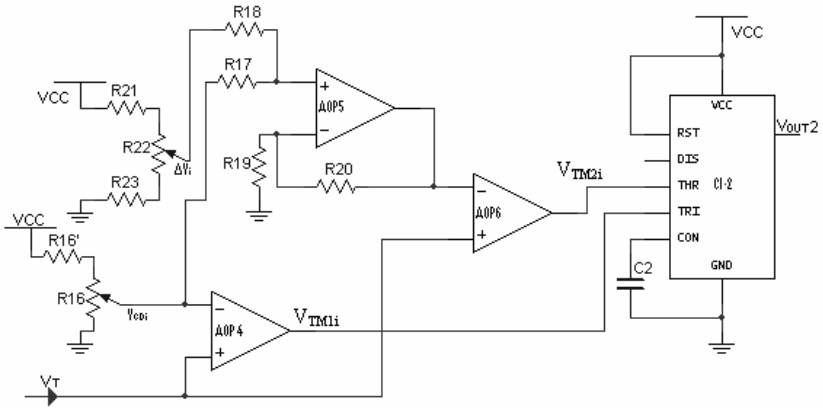


Figura 28. Circuito de control inferior con histéresis

En este caso, se requiere que cuando la temperatura sea T_{CTRLi}, la terminal 6 del 555 pase de V_{HI} a V_{LO}, lo que se logra con el amplificador operacional AOP6 configurado como comparador no inversor, cuya entrada es V_T y la referencia está dada por $V_{CTRLi} = V_{CDi} + \Delta V_i$, y su salida equivale a V_{TM2i}. Para V_{CDi} se aplica la mísma lógica que para V_{CDs}, seleccionando R16 y R16' tal que $V_{CDi_MÁX} = 10V$.

V_{CTRLi} se obtiene de la suma de V_{CDs} con ΔV_i por medio del AOP5 configurado como sumador, cuya salida es la suma de las entradas al ser R17= R18= R19= R20. Para que ΔV_i varíe de 1 a 10 °C se emplea un divisor de tensión formado por dos resistencias fijas (R21 y R23) y una variable entre éstas (R22), al igual que el caso anterior, con una tensión de salida máxima de V_{CC}*(R22+ R23)/(R21+R22+R23) y una tensión mínima de V_{CC}*R23/(R21+R22+R23).

Cuando la temperatura sea $T_{mín}$, la terminal 2 del 555 debe pasar de V_{HI} a V_{LO}. Para esto se emplea un amplificador operacional configurado como comparador no inversor con entrada V_T y referencia V_{CDi} y cuya salida es V_{TM1i}.

Con esto se tiene el circuito de la Figura 29, en donde la entrada es la tensión V_{IN} dada por el sensor de temperatura LM35 y la salida V_{OUT1} para la refrigeración y V_{OUT2} para la calefacción. El usuario se encargará de ajustar V_{CDs} y V_{CDi} usando un tablero y, cuando lo requiera, V_{CTRLs} y V_{CTRLi} por medio de los potenciómetros dispuestos en el impreso.

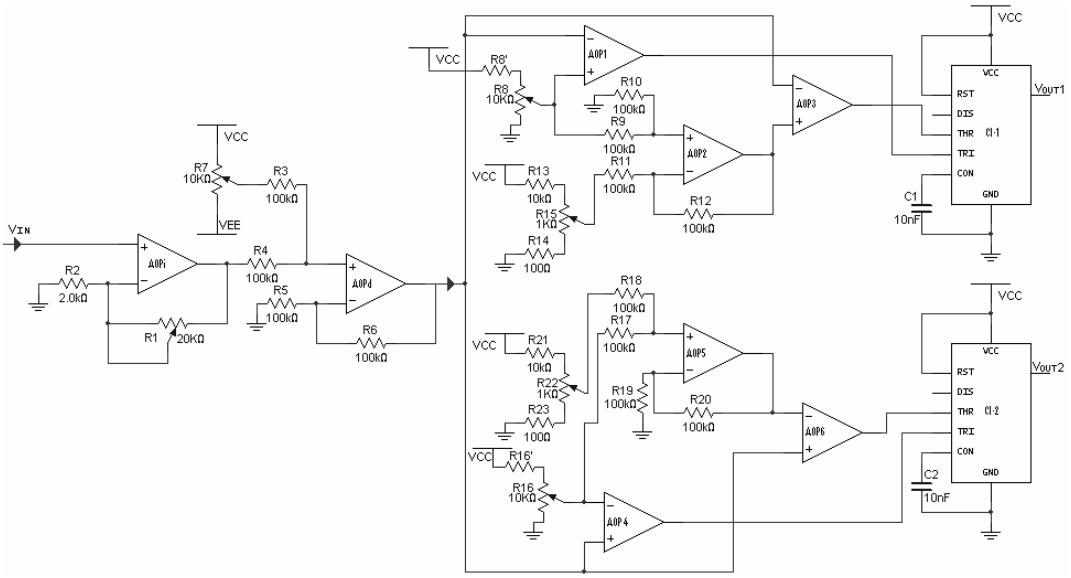


Figura 29. Sistema de Control de Temperatura

3.2. Control de humedad relativa atmosférica (HR)

La humedad relativa deseada varía de acuerdo con la temperatura, por lo que se requiere un control variable de esta. Es deseable que a determinada temperatura, o temperatura media diaria, si se desea, exista una determinada humedad relativa, para que la diferencia de presión de vapor (DPV) sea la adecuada para cada etapa del desarrollo de la planta. La evolución típica diaria de la humedad relativa se muestra en la Figura 30, que es inversamente proporcional a la radiación solar, expresada por sus efectos en términos de temperatura.

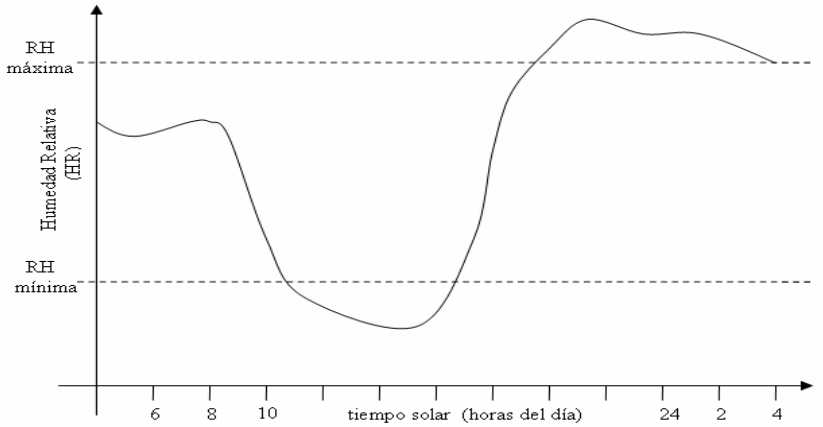


Figura 30. Comportamiento natural de la humedad relativa interna de un invernadero

Al igual que para la temperatura, se observan dos casos de control, la humedad relativa superior, RHs, y la inferior, RHi. Para la RHs, en el momento en que se supere el valor de la Humedad Relativa Máxima, $RH_{MÁX}$, variable con la especie y etapa de desarrollo, se activará un sistema de extracción de aire, provocando un flujo de las partículas de agua suspendidas en éste, hasta alcanzar una humedad de control superior, RH_{CTRLs}, momento en el que se apaga este sistema de extracción, con lo que se vuelve al comportamiento natural del sistema. También se deja un gradiente de humedad relativa superior $\Delta RHs = RH_{MÁX} - RH_{CTRLs}$ entre encendido y apagado, para evitar ciclos de encendido/apagado demasiado cortos. Con el sistema de extracción de aire apagado, se deja que el sistema retome su comportamiento natural, volviéndose a activar si se vuelve a presentar el caso de que sobrepase $RH_{MÁX}$.

Se sigue una lógica similar para el límite inferior de humedad relativa, $RH_{mín}$, siendo que cuando el comportamiento natural del sistema alcance este valor, se active el sistema de humidificación, elevando la humedad relativa hasta alcanzar un valor de control inferior, RH_{CTRLi}, apagándose entonces este sistema, con un gradiente de humedad relativa inferior $\Delta RHi = RH_{mín} - RH_{CTRLi}$. Si la humedad relativa vuelve a descender de $RH_{mín}$, el sistema de humidificación se activa nuevamente.

El ciclo diario completo con el sistema de control de humedad relativa interna del invernadero se muestra en la Figura 31. La línea negra representa el comportamiento natural y la línea roja el comportamiento con sistemas de control.

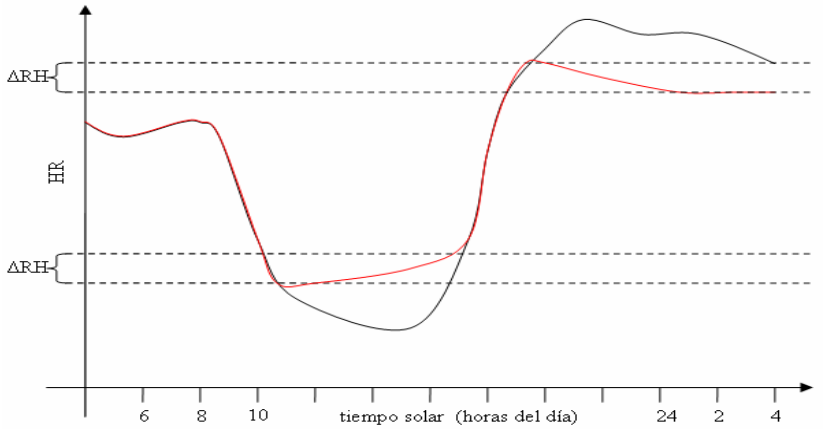
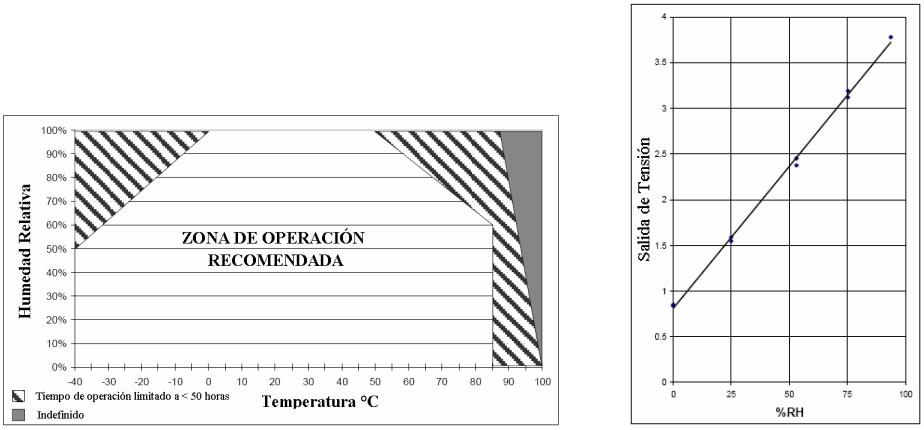


Figura 31. Comportamiento de la temperatura interna sin y con sistema de control

Para medir la HR se utiliza el sensor HIH 4000-003, el cual es un sensor de humedad con una salida lineal de tensión, cuya calibración se muestra en la Figura 32, la cual responde a la ecuación de primer grado dada por

$$V_{out} = V_{\sup ply}\left[0.0062(\%RH) + 0.16\right]$$



(a) (b)

Figura 32. (a) Zona de Operación Recomendada y (b) Curva de Calibración del sensor de Humedad Relativa HIH 4000 [2005 Honeywell International Inc]

Para el caso que se quiera trabajar en un intervalo de 0 a 100 % de HR, se tiene que la salida del sensor, considerando una operación ideal a 5V, está entre 0.8V para 0%HR y 3.9V para el 100% de HR.

Para la etapa de control se requiere adaptar la salida del sensor al sistema de control, usando para ello primero un diferencial con Amplificadores Operacionales, con una ganancia unitaria, para eliminar el offset presente la salida del sensor. La salida del diferencial ha de pasar a su vez por un amplificador no inversor para ajustar la salida a valores operables con más facilidad. El diagrama queda como muestra la Figura 33, en donde V_{HIH} es la tensión V_{out} del sensor de humedad relativa HIH 4000-003.

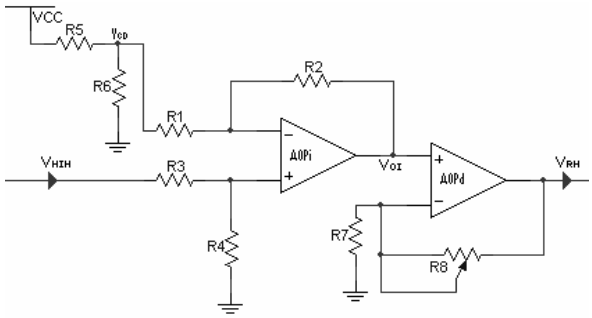


Figura 33. Acoplamiento del sensor de humedad relativa a la etapa de control

La primer parte del circuito, formada por R1, R2, R3, R4, R5 y R6 y el AOPi, está conectada de tal forma que opera como un restador, cuya salida V_{OI} es

$$V_{OI} = \left(V_{HIH} \frac{(R1+R2)R4}{(R3+R4)R3} - V_{CD} \frac{R2}{R1} \right) \tag{5}$$

Si R1= R2= R3= R4, entonces

$$V_{OI} = \left(V_{HIH} - V_{CD} \right) \tag{6}$$

,

$$V_{CD} = V_{CC} \frac{R6}{R5+R6} \tag{7}$$

VCD es el valor de la tensión de offset dada por el sensor de humedad, en este caso, es de 0.8 V, por lo que se deben escoger las resistencias del divisor de tensión para tener este valor.

La salida V_{OI} se conecta al circuito del lado derecho, formado por el operacional AOPd, R7 y R8, que es un amplificador no inversor con una ganancia dada por

$$V_{RH} = \left(1 + \frac{R8}{R7} \right) V_{OI} \tag{8}$$

Para obtener una salida de 0 a Vcc, considerando la salida al 100% de RH, que en este punto es de

$$V_{OI} = \left(V_{IN} - V_{CD} \right) \tag{9}$$

$$V_{OI} = 5(0.0062 * 100 + 0.16) - 0.8$$

$$V_{O1} = 3.1$$

entonces la ganancia del $Av = \frac{V_{RH}}{V_{OI}} = \left(1 + \frac{R8}{R7} \right)$ debe ser

$$Av = \frac{V_{RH}}{V_{OI}} = \frac{V_{CC}}{V_{OI/100\%RH}} = \frac{V_{CC}}{3.1} = 0.323 V_{CC} \tag{10}$$

Para tener este ajuste preciso, se mantendrá fija una resistencia mientras que la otra será variable. En este caso se fijará R7 y se variará con un trimpot R8.

Finalmente, la salida V_{RH} representa la Humedad Relativa, sin offset, dada por la siguiente expresión

$$\begin{aligned} V_{RH} &= 5\left[0.0062(\%RH)\right]\cdot 0.323Vcc \\ V_{RH} &= 1.613Vcc\left[0.0062(\%RH)\right] \\ V_{RH} &= Vcc\cdot(\%RH) \end{aligned} \tag{11}$$

3.2.1. Control de humedad relativa

El control Encendido/Apagado se aplica de la misma forma que para la temperatura, siendo el ciclo de operación para la humedad relativa superior el mostrado en la Tabla 6 siguiente, con condiciones iniciales de una humedad relativa inferior a RH_{CTRLs} y que RH está en ascenso.

Tabla 6. Ciclo de operación del Control Superior de Humedad Relativa

tiempo ↓	Humedad Relativa	V_{HR1}	V_{HR2}	Acción Calefacción
	$RH < RH_{CTRLs}$	1	1	Apagado
	$RH_{CTRLs} < RH < RH_{MÁX}$	0	1	Apagado
	$RH > R_{MÁX}$	0	0	Encendido
	$RH_{CTRLs} < RH < RH_{MÁX}$	0	1	Encendido
	$RH < RH_{CTRLs}$	1	1	Apagado

Este ciclo de operación es equivalente al descrito en el apartado 3.1.1.1, por lo que se puede implementar con el circuito integrado 555, de una forma idéntica al control para la temperatura descrito en el apartado 3.1.1.2, siendo que $RH_{MÁX}$ podrá ser fijada por el usuario en cualquier momento y RH_{CTRLs} depende de la expresión para el gradiente de humedad relativa superior $\Delta RHs = RH_{MÁX} - RH_{CTRLs}$, de donde $RH_{CTRLs} = RH_{MÁX} - \Delta RHs$, pudiendo variar ΔRHs en un rango de 1 a 10 %RH con un control oculto a la vista del usuario. La Figura 34 muestra el diagrama de este circuito con V_{RH} como entrada y V_{OUT1} como salida, cuyo funcionamiento ya ha sido descrito.

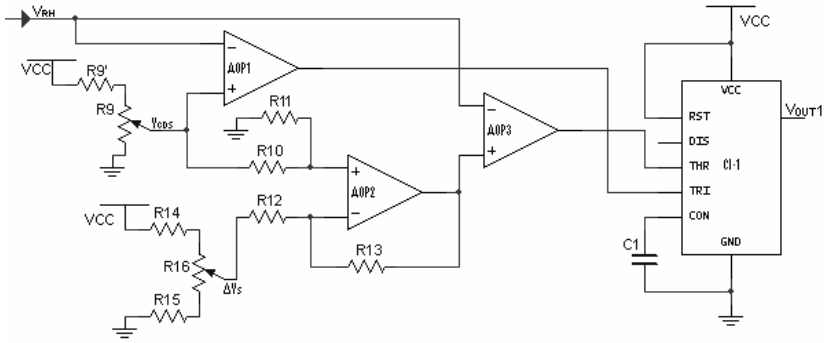


Figura 34. Circuito de control superior con histéresis

Para el control inferior, teniendo como condición inicial una humedad relativa superior a RH_{CTRLi} y RH en descenso, su ciclo de operación se describe en la Tabla 7, con lo que se tiene un control que puede ser realizado con el circuito integrado 555.

Tabla 7. Ciclo de operación del Control Inferior de Humedad Relativa

tiempo ↓	Temperatura Interna	V_{HR1}	V_{HR2}	Acción Refrigeración
	$RH > RH_{CTRLi}$	1	1	Apagado
	$RH_{CTRLi} > RH > RH_{mín}$	0	1	Apagado
	$RH < R_{mín}$	0	0	Encendido
	$RH_{CTRLi} > RH > RH_{mín}$	0	1	Encendido
	$RH > RH_{CTRLi}$	1	1	Apagado

Aquí, $RH_{mín}$ se fija por el usuario en cualquier momento y $RH_{Ctrl.}$, en donde RH_{CTRLi}= $RH_{mín}$ + ΔRHi, variando ΔTi en un rango de 1 a 10 %RH con un control oculto a la vista del usuario. La Figura 35 muestra el diagrama de este circuito con V_{RH} como entrada y V_{OUT2} como salida, ya descrito en el apartado 3.1.1.2.

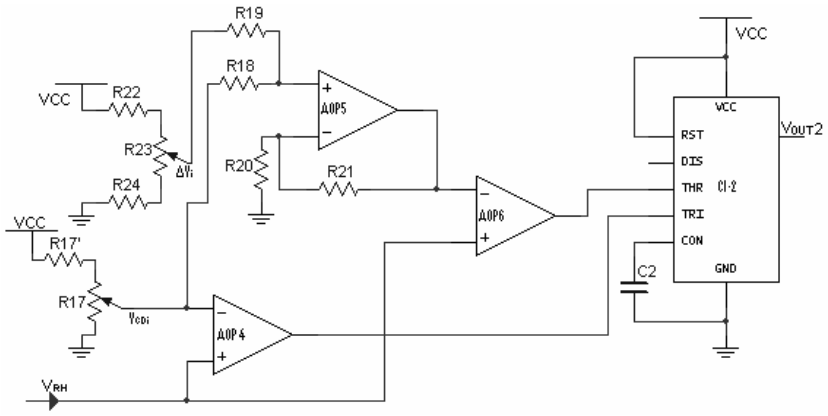


Figura 35. Circuito de control inferior con histéresis

Con esto se tiene el circuito de la Figura 36, en donde la entrada es la tensión V_{HIH} dada por el sensor de humedad relativa HIH4000-003 y la salida V_{OUT1} para extracción de aire y V_{OUT2} para humidificación. El usuario se encargará de ajustar V_{CDs} y V_{CDi} usando un tablero y, cuando lo requiera, V_{CTRLs} y V_{CTRLi} por medio de los potenciómetros dispuestos en el impreso.

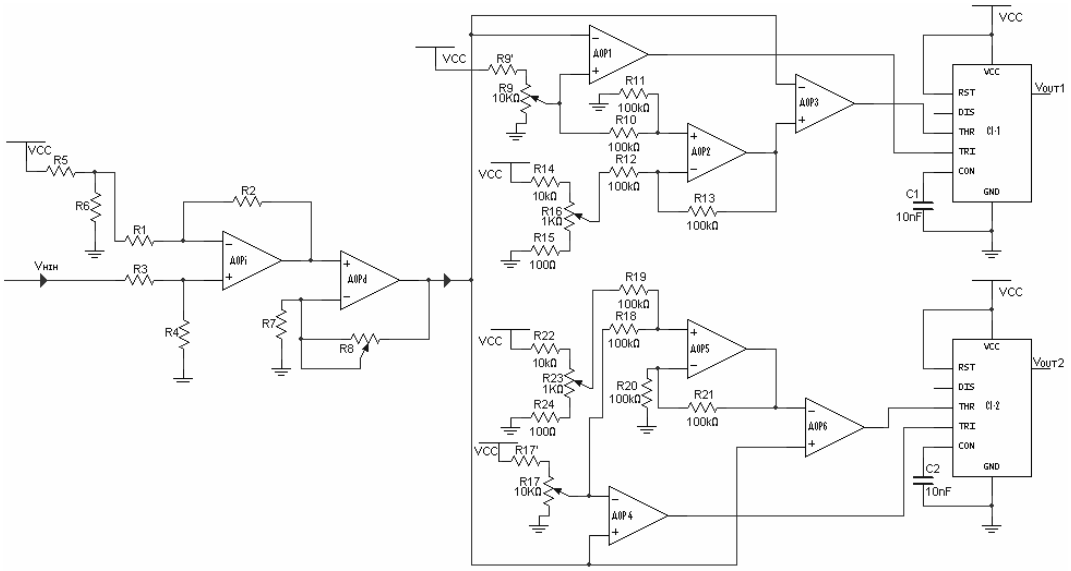


Figura 36. Sistema de Control de Humedad Relativa

3.3. Control de cantidad de agua en suelo

La cantidad de agua en suelo debe mantenerse dentro de un rango tal que evite el estrés hídrico de la planta por falta de agua y la aparición de hongos en el suelo por el exceso de humedad. La Figura 37 muestra la variación típica del contenido de agua en suelo en cada ciclo de riego.

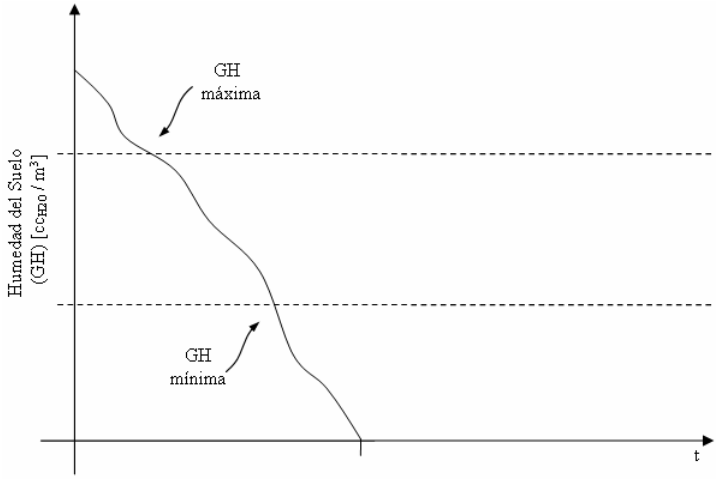


Figura 37. Variación de la cantidad de agua en suelo

Se observa que desde el momento del riego, el comportamiento de la cantidad de agua en suelo es descendente, por lo que se requiere sólo un control para el mínimo, el cual debe restablecer la cantidad de agua hasta el tope máximo, dejando nuevamente el comportamiento libre del sistema, como muestra la Figura 38. Cabe destacar que la variación de agua entre cada ciclo de riego es distinta, porque la evapotranspiración está fuertemente ligada con la radiación solar, temperatura y humedad relativa, así como del estado de desarrollo de la planta.

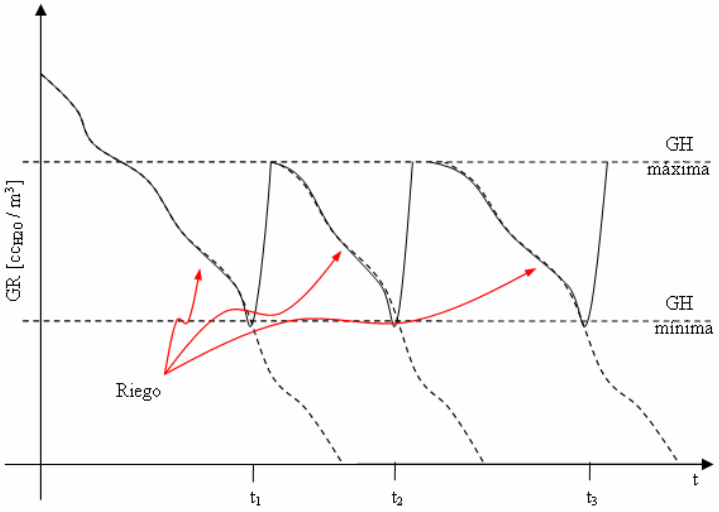


Figura 38. Comportamiento controlado de la cantidad de agua en suelo

Se tiene entonces que al ir descendiendo GR, al llegar a $GH_{mín}$ se activa el sistema de riego hasta que alcance el valor de $GH_{MÁX}$, repitiéndose este ciclo durante todo el desarrollo de la planta.

Como sensor para medir la humedad del suelo se eligió el Watermark (Irrometer Company, Riverside, CA), modelo 200SS-5, un sensor de matriz granular. Consiste de dos electrodos concéntricos envueltos por una matriz de un material como referencia, el cual está rodeado por una membrana de protección contra el deterioro. El flujo de agua entre el suelo y el sensor resulta en cambios de la resistencia eléctrica entre los electrodos. Este valor de resistencia eléctrica es convertido en Potencial de Agua del Suelo (Soil Water Potential) que expresa la cantidad de energía necesaria para que las plantas absorban el agua del suelo. Se expresa generalmente en centibares (cb) o kilopascales (kPa), en donde 1cb = 1kPa.

La relación del valor de la resistencia eléctrica (kΩ) con el valor del potencial de agua en suelo (kPa) para el modelo de watermark 200SSX está dada por la ecuación no lineal [Shock et al., 1998]

$$SWP = \frac{-4.734 + 3.559R}{1 - 0.01856R - 0.01316T} \quad r^2 = 0.949 \qquad n = 731 \tag{12}$$

en donde SWP es el Potencial de Agua en Suelo en kPa, R es la salida del sensor en kΩ, y T es la temperatura estimada o medida del suelo cercano al sensor en °C. De la expresión anterior se tiene una curva de calibración como la mostrada en la Figura 39.

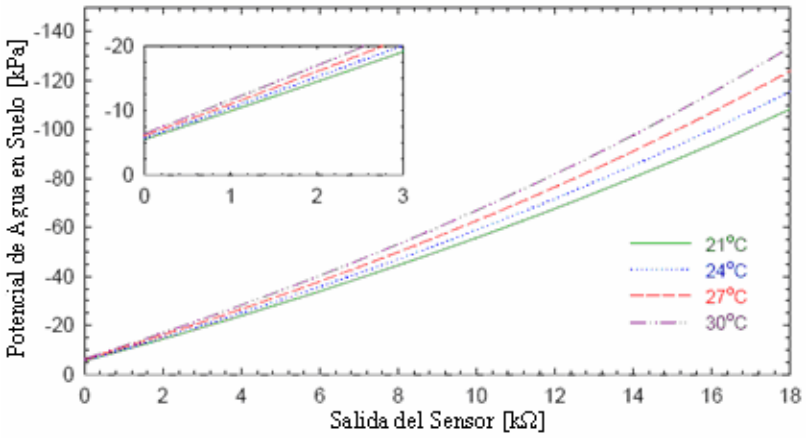


Figura 39. Curva de calibración para el sensor Watermark 200SSX, de acuerdo con la expresión desarrollada por Shock et al. [Juli Chard, 2005]

Para medir SWP en tiempo real y evitar la electrólisis del suelo, se diseña un circuito cuya primera etapa consista en un generador de señal senoidal, cuya salida V_{OSC} esté conectada a un divisor de tensión resistivo, conectando una resistencia fija en serie con una variable, que corresponde al sensor, y la salida V_{OUT} de este arreglo corresponde a la señal senoidal con una atenuación proporcional al valor de la resistencia del sensor, que es inversamente proporcional a la cantidad de agua en suelo.

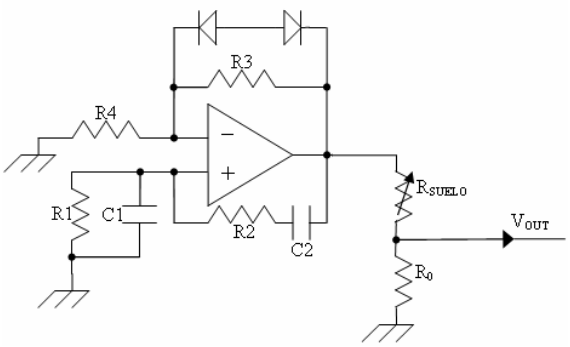


Figura 40. Oscilador senoidal con salida a un divisor de tensión capacitivo

De acuerdo con la la Figura 40, con C1, C2, R1, R2, R3 y R4 se tiene un oscilador senoidal con puente de Wien de frecuencia $\omega_0 = \frac{1}{RC}$ y cuya ganancia, dada por $A = 1 + \frac{R3}{R4}$, debe ser ligeramente mayor que 3, con lo que R3/R4 debe ser poco mayor que 2, para que así empiecen las oscilaciones, teniendo como máximo V_{CC} y como mínimo V_{EE}. Para un suelo totalmente húmedo, en donde R_{SUELO} =0Ω, se tiene $V_{OUT_MÁX}$, y para una tensión de 200cb, la máxima detectable por el sensor, se tiene $V_{OUT_mín}$.

V_{OUT} pasa entonces a un seguidor de tensión a través de R5 y R6, y la salida de éste se conecta a un puente de diodos para hacer una rectificación de onda completa. El valor de DC del puente de diodos se obtiene a través de un circuito diferencial cuya ganancia, de acuerdo con la Figura 41, está dada por

$$V_{REC} = \left(V_{REC+} \frac{(R7 + R8)R10}{(R9 + R10)R9} - V_{REC} \frac{R8}{R7} \right) \tag{13}$$

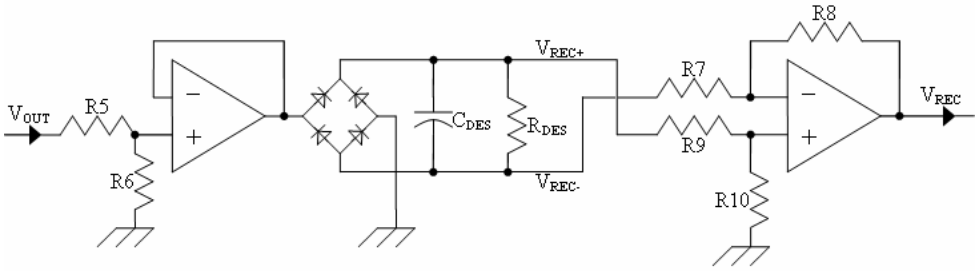


Figura 41. Rectificador de onda completa con salida diferencial

Si R7= R8= R9= R10, se tiene una ganancia unitaria, con lo que

$$V_{REC} = V_{REC+} - V_{REC-} \tag{14}$$

en donde la tensión V_{REC}, representa a la tensión de salida del rectificador de onda completa referenciado a GND del circuito.

Para obtener la salida en CD del sensor de humedad del suelo se lleva V_{REC} a una referencia cero, de acuerdo con las condiciones iniciales del sensor siendo la referencia

cero la salida V_{REC} cuando El Potencial de Agua en el Suelo es de 200cb, que es cuando R_{sensor} es máxima. Para esto se usa un circuito sumador no inversor, teniendo como una entrada V_{OFFSET}, una tensión de CD que va de $-V_{CC}$ a GND, y a V_{REC}, que pasa por un filtro paso bajas, como se muestra en la Figura 42, cuya expresión para la frecuencia de corte es

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_f C_f} \tag{15}$$

Es deseable un valor para la misma próximo a 0 Hz, para filtrar cualquier tipo de ruido eléctrico y dejar pasar solo el valor de DC de V_{REC}.

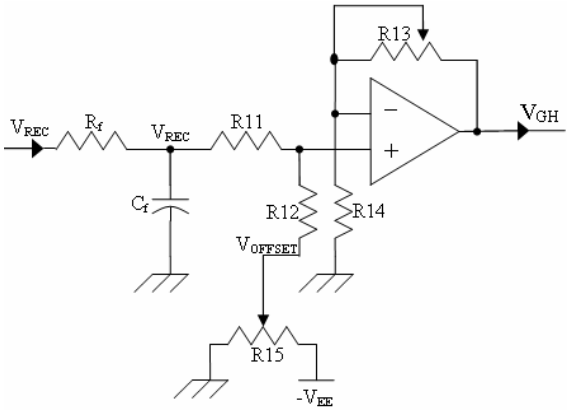


Figura 42. Circuito para ajuste de señal en offset y amplitud

La ganancia del arreglo variará de acuerdo con el número de sensores que se utilicen y la forma en que éstos se conecten (serie o paralelo), tal que la salida del sensor para la máxima cantidad de agua en el suelo (0cb), cuando está totalmente húmedo, sea V_{CC}, variando así de 0 para suelo seco a V_{CC} para suelo totalmente húmedo. Entonces se tiene de acuerdo con la expresión para la ganancia en un sumador no inversor, dada por

$$V_{GH} = \left(1 + \frac{R13}{R14}\right)\left(V_{REC}\frac{R12}{R11+R12} + V_{OFFSET}\frac{R11}{R11+R12}\right) \tag{16}$$

,

haciendo R11= R12, se tiene la expresión final para V_{GH}

$$V_{GH} = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{R13}{R14}\right)\left(V_{REC} + V_{OFFSET}\right) \tag{17}$$

.

Para un ajuste preciso en la amplitud, y la capacidad de ajustar el máximo para cada arreglo de sensores, se deja una resistencia fija y una variable, tal que $V_{GH_MÁX} = V_{CC}$. En este caso R6 variará y R5 será fija.

3.3.1. Control de humedad del suelo

Este control Encendido/Apagado, se aplica de la misma forma que para los anteriores sistemas, teniendo un único ciclo de operación, el de la cantidad de agua en suelo inferior, mostrado en la Tabla 8, con condiciones iniciales de una humedad relativa superior a $GH_{mín}$ y, como se vio, GH en descenso.

Tabla 8. Ciclo de operación del Control de Cantidad de Agua en Suelo

tiempo ↓	Temperatura Interna	V_{GH1}	V_{GH2}	Acción Riego
	$GH > GH_{mín}$	X	1	Apagado
	$GH_{MÁX} > GH > GH_{mín}$	0	1	Apagado
	$GH < GH_{mín}$	0	0	Encendido
	$GH_{MÁX} > GH > GH_{mín}$	0	1	Encendido
	$GH > GH_{MÁX}$	1	1	Apagado

Se pone la X considerando que puede ser el primer ciclo de riego, en donde se comienza con una GH superior a $GH_{MÁX}$, o se modificó esta última por un cambio de clima o ciclo de desarrollo de la especie cultivada.

Se observa entonces que cumple con las condiciones para un control con histéresis por medio de 555. En este caso, $GH_{MÁX}$ podrá ser fijada por el usuario en cualquier momento, al igual que $GH_{mín}$, por lo que, con lo que se modifica el circuito de control que había venido presentándose, quedando como muestra la Figura 43, en donde V_{GH} es la entrada y V_{OUT} la salida de control.

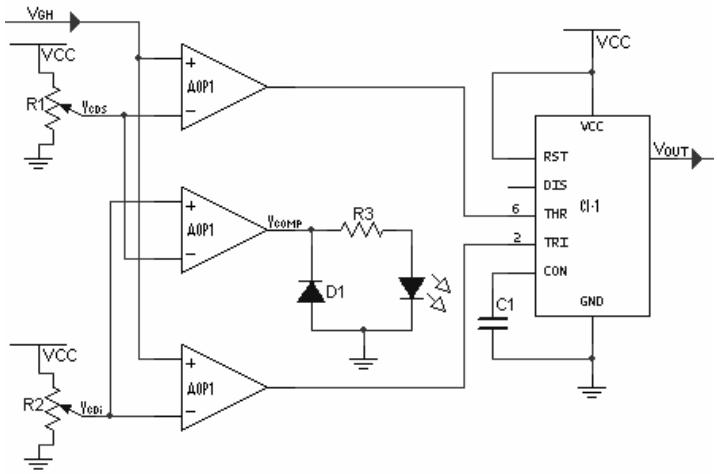


Figura 43. Circuito de control superior con histéresis

En este caso, para fijar $GH_{MÁX}$ se emplea una fuente de DC variable, V_{DCs}, de 0 a V_{CC}, con el potenciómetro R1 configurado como divisor de tensión, que va a la entrada inversora de un amplificador operacional configurado como comparador no inversor, teniendo como entrada no inversora el valor de V_{GH}, y su salida está conectada a la terminal 6 del 555. Para $GH_{mín}$ se utiliza otro circuito comparador no inversor, teniendo como entrada no inversora el valor de DC establecido por el usuario, en este caso la salida del divisor de tensión formado por el potenciómetro R2, V_{DCi}, y su salida conectada a la terminal 2 del 555.

Por otra parte, V_{DCi} y V_{DCs} entran a otro comparador, en donde V_{DCi} se conecta a la entrada no inversora y V_{DCs} a la entrada inversora, dando como resultado que cuando el usuario configura las entradas tal que $V_{DCi} > V_{DCs}$ se encienda una alarma luminosa (LED) para avisar al operador. La corriente en el LED está limitada por R3.

3.4. Control de nivel de agua

El circuito consiste en un detector de presencia/ausencia de agua, funcionando como un interruptor, el cual permite o no el paso de CA, para evitar así la electrólisis del agua y la ionización de los conductores sumergidos en esta. Así pues, la señal de CA entra a un puente de diodos para rectificarla, teniendo que para presencia de agua resulta un valor de $V_{MÁX}$, y para la ausencia de $V_{mín} \approx 0$, debido a la inducción producida en el puente de diodos por el transformador.

El valor de la tensión rectificada del puente de diodos se obtiene a través de un circuito diferencial de ganancia unitaria. De ésta, se obtiene la tensión de control, que corresponde a un valor de $V_{HI}= V_{CC}$ para presencia y de $V_{LO}=$ GND para la ausencia, usando para ello un circuito comparador de la tensión de salida del circuito diferencial con un valor de V_{CD} en donde $V_{MAX} > V_{CD} > V_{mín}$. La Figura 44 presenta el circuito eléctrico del sistema descrito, con un sensor de este tipo en la parte superior del contenedor, con salida V_{N1}, y otro en la parte inferior, cuya salida es V_{N2}. Ambos detectan la misma señal de CA, pues de otra forma pueden ocurrir interferencias o cortocircuitos entre señales distintas.

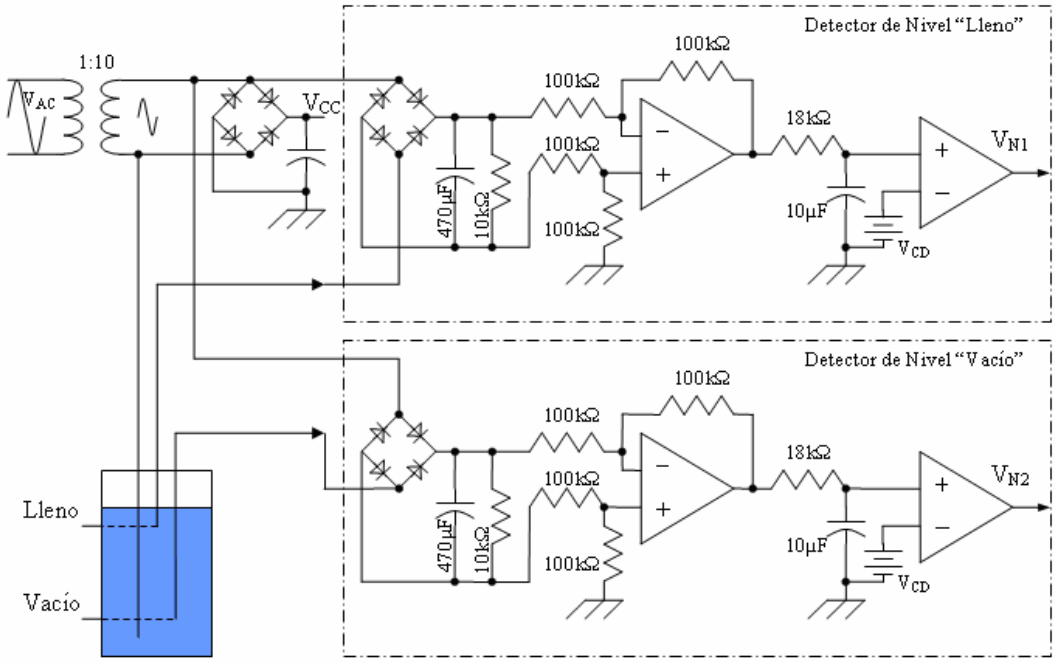


Figura 44. Circuito eléctrico del Detector de Nivel de Agua

Para obtener este control de Encendido/Apagado de acuerdo con V_{N1} y V_{N2}, se utiliza el circuito LM555 conectado como muestra la Figura 26, en donde V_{CTRL} corresponde a la tensión de control de una bomba de agua que permite el flujo de agua al tanque, permaneciendo encendida mientras V_{CTRL} esté en HI digital. V_{CC} es común a todo el circuito tal que, para un circuito ideal, $V_{CC} = V_{HI}$.

Para el caso particular del control de nivel de agua, si se comienza con $V_{N1}= V_{N2}= V_{HI}$, se tiene $V_{CTRL}=$ LO; cuando $V_{N1}=V_{LO}$ y $V_{N2}= V_{HI}$, al irse vaciando el contenedor se tiene el estado del Flip-Flop se mantiene con $V_{CTRL}=$ LO.

Cuando el tanque se vacía completamente, se tiene a V_{N1}= V_{N2}= V_{LO} el FLip-Flop se establece y V_{CTRL}= HI, iniciándose el proceso de llenado, llevando casi de inmediato el circuito a la condición V_{N1}=V_{LO} y V_{N2}= V_{HI} que mantiene el estado del Flip-Flop con V_{CTRL}= HI. Cuando se llena el contenedor nuevamente, se tiene la condición inicial de V_{N1}= V_{N2}= V_{HI}, y se reestablece el Flip-Flop, teniendo nuevamente V_{CTRL}= LO, lo que comienza el ciclo de operación.

La operación del circuito de control de nivel de agua, considerando como condición inicial el tanque contenedor lleno, se muestra en la Tabla 9, siendo V_{CTRL}= HI lo que enciende a la bomba de agua y V_{CTRL}= LO lo que la mantiene apagada.

Tabla 9. Ciclo de operación del sistema de Control de Nivel de Agua

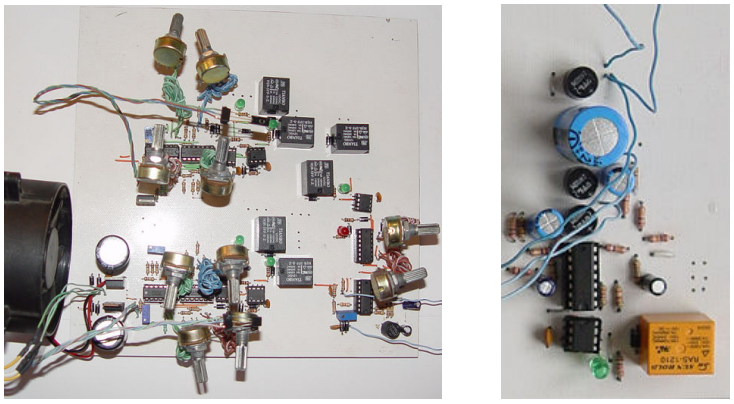
tiempo ↓	Nivel de Agua	V_{N1}	V_{N2}	Acción Bomba de Agua
	Lleno	1	1	Apagado
	Medio	0	1	Apagado
	Vacío	0	0	Encendido
	Medio	0	1	Encendido
	Lleno	1	1	Apagado

De esta forma, se tiene un sistema capaz de mantener la disponibilidad de agua para el riego en todo momento.

4. *Implantación del sistema*

4.1. Dispositivo experimental

El sistema de control cuenta con salidas de 120Vac para equipos que así lo requieran, así como una salida adicional de 24Vac para el sistema de riego, en caso de que se requiera activar una electroválvula de esas características. Se dota además al equipo con un ventilador de DC para mantener un flujo de aire y evitar el calentamiento y la condensación de agua.



(a) (b)

Figura 45. Sistema de control a) de Temperatura, Humedad Relativa y Contenido de Agua en Suelo; b) de Nivel de Agua

La tensión de operación del dispositivo fue de ±12Vdc, por lo que hubo que ajustar las salidas de los amplificadores operacionales a +12Vdc, para poder conectarse a los LM555, como muestra la Figura 46.

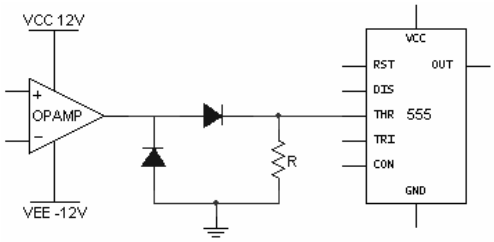


Figura 46. Conexión del AOP con el LM555

Para las salidas de tensión, se realiza el control mediante relevadores 'dos polos un tiro' HJR-3FF con una tensión de operación de 12Vdc y una capacidad de carga de 15A a 125Vac, realizándose entonces la conmutación a partir de las señales de control de cada sistema, con un consumo de potencia de 0.36W, de donde

$$I = \frac{P}{V} \qquad (18)$$

$$I = \frac{0.36}{12} = 0.03A = 30mA$$

A su vez, a partir de la señal de control, en cada salida se encenderá un LED verde para cuando esté en operación la misma. A partir de V_{CC}, V_{LED} e I_{LED}, se tiene que la resistencia limitadora de corriente para el arreglo es $R_{LED} = (V_{CC} - V_{LED}) / I_{LED}$. Para el caso del LED verde, se tiene I_{LED}= 20mA y V_{LED}= 2.1V.

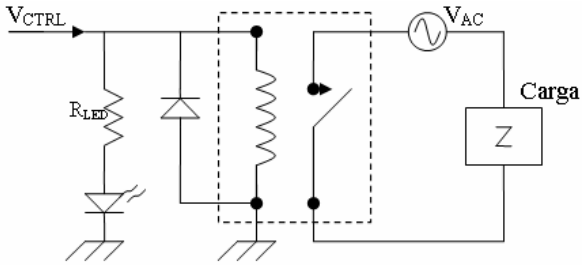


Figura 47. Control de potencia.

Además, se conecta un diodo de protección, para evitar los picos de tensión producidos cuando la alimentación al embobinado se apaga, permitiéndose el flujo de la corriente remanente en el embobinado a través del diodo.

Entonces, el flujo total de corriente en cada relevador resulta de

$$I_{TOTAL} = I_{LED} + I_{RELÉ} \tag{19}$$
$$I_{TOTAL} = 20mA + 30mA = 50mA$$

Siendo la corriente máxima de operación del M555 de 100mA no se requiere una etapa extra para activar al relevador.

5. *Análisis de resultados*

5.1. Control de temperatura

Para las pruebas de temperatura, se varió la temperatura en el sensor artificialmente para observar el comportamiento del equipo ante los cambios de este parámetro.

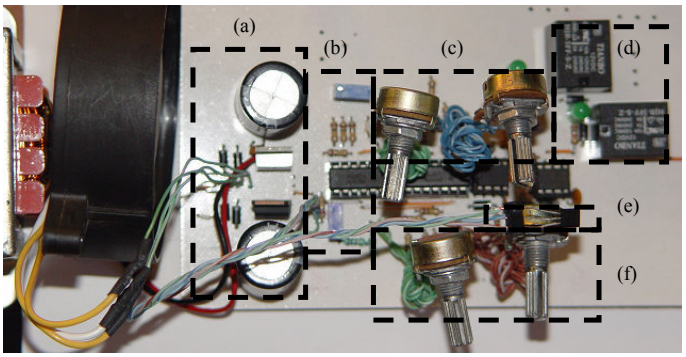


Figura 48. Sistema de Control de Temperatura con las etapas de a) alimentación, b) acoplamiento, c) y f) control, d) potencia y e) el sensor

En la Figura 48 se muestran las etapas que corresponden al circuito de control de temperatura. Se tiene la etapa de alimentación (a), que proporciona una tensión de ±12Vdc, que alimenta a todos los circuitos (temperatura, humedad relativa y cantidad de agua en suelo).

En la etapa (b) se tiene el sistema de acoplamiento de la señal de temperatura del sensor (e) LM35 a una señal de 0 a 12Vdc, como se muestra en la Figura 25.

Las etapas (c) y (f) cubren la parte del control inferior y superior de temperatura, respectivamente, estableciendo con un potenciómetro un extremo de la ventana de histéresis y con el otro el ancho de la misma, no mayor este último a 10°C.

Finalmente, la etapa de salida (d) es la etapa de potencia para cada uno de los controles, el superior y el inferior. Cada una de éstas posee un LED verde que se enciende cuando se activa el relevador correspondiente.

Las pruebas de este sistema de control de temperatura muestran una respuesta inmediata cuando la temperatura llega a los límites establecidos, y no se muestra el efecto de 'rebote', debido esto al control por histéresis.

5.2. Control de humedad relativa atmosférica

Al igual que para las pruebas de temperatura, se varió la humedad relativa en el sensor artificialmente para observar el comportamiento del equipo ante los cambios de este parámetro.

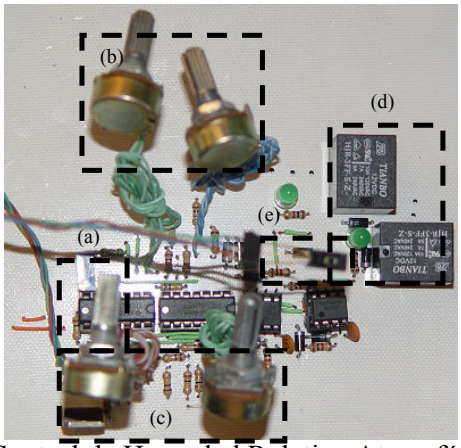


Figura 49. Sistema de Control de Humedad Relativa Atmosférica con las etapas de a) acoplamiento, b) y c) de control, d) de potencia y e) el sensor

Como se muestra en la Figura 49, este sistema cuenta con una primera etapa (a) de acoplamiento de la señal del sensor (e) HIH-4000-003 a una señal de 0 a 12Vdc, como se observa en la Figura 33.

Las etapas (b) y (c) cubren la parte del control inferior y superior de humedad relativa, respectivamente, fijando con un potenciómetro el extremo de la ventana de histéresis y con el otro el ancho de ésta, no mayor este último a 10%.

Finalmente, al igual que para la temperatura, se tiene la etapa de salida de potencia (d), para los controles superior e inferior. Cada una con un LED indicador verde que se enciende cuando entra en operación el relevador correspondiente.

De las pruebas de control de humedad relativa atmosférica se observa una respuesta inmediata cuando la humedad relativa alcanza los límites establecidos, y, al igual que para el caso anterior, no se muestra un efecto de 'rebote', debido al control por histéresis.

5.3. Control de cantidad de agua en suelo

Este sistema consiste en una etapa de oscilación (g) con puente de Wien, esta salida senoidal se conecta a un seguidor (f) a través de un divisor de tensión con una resistencia fija y el sensor Watermark. Esta señal pasa a una etapa de rectificación (e) y de ajuste de amplitud (d), para eliminar la tensión de offset y tener una amplitud de 0 a 12Vdc para un intervalo de 0 a 200 cb (200 kPa), que es el rango de operación del sensor Watermark.

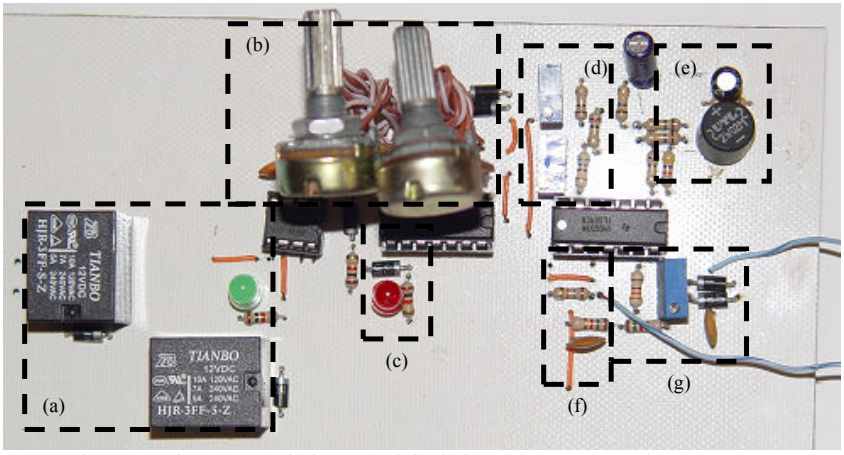
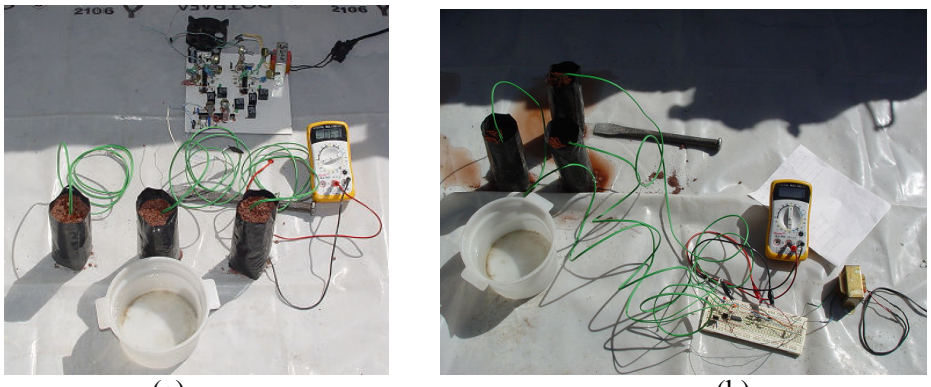


Figura 50. Sistema de Control de Cantidad de Agua en Suelo con sus etapas de a) potencia, b) control, c) advertencia, d) ajuste, e) rectificación, f) seguidor y g) oscilación

La señal de control entra entonces a una etapa de comparación, ajustando con los potenciómetros (b) el valor mínimo y máximo del potencial de agua del suelo. Cuando se establece un valor mínimo mayor al valor máximo se enciende el LED rojo como indicador visual de este error. Finalmente, la etapa (a) es la etapa de potencia, que consta de una salida a 120Vac y una de 24Vac, para el caso que se quiera activar una electroválvula.

Para probar este sistema, se instalaron tres sensores en distintas macetas y se midió la variación de contenido en agua en cada una de éstas [Figura 51 (a)], para determinar el tiempo de respuesta ante los cambios de humedad, el cual resultó lento, pero estando por arriba del gasto del sistema de riego.



(a) (b)

Figura 51. Sistema de pruebas del a) sistema completo y b) del sistema de control de cantidad de agua en suelo

Se observó además que la resistencia inicial para los sensores resultó de entre 0.75kΩ a 1kΩ, sin embargo la respuesta ante las mismas condiciones climáticas y de consumo de agua resultó homogénea [Figura 51 (b)], como se muestra en la Tabla 10, a través de la variación de la resistencia de cada sensor.

Tabla 10.Variación de la resistencia de los Watermark en las macetas de prueba

Hora	R Sensor 1 [kΩ]	R Sensor 1 [kΩ]	R Sensor 1 [kΩ]
16:00	0.75021277	0.75021277	1.00742857
17:00	1.00742857	0.75021277	1.00742857
18:00	1.00742857	1.53304348	1.00742857
19:00	1.00028369	1.78855072	1.25928571
20:00	1.26834532	1.80160584	1.26834532
21:00	0.99323944	1.77568345	0.99323944
22:00	0.49314685	1.52201439	1.52201439
23:00	1.25928571	2.0589781	0.74492958
24:00	1.25035461	1.77568345	0.99323944

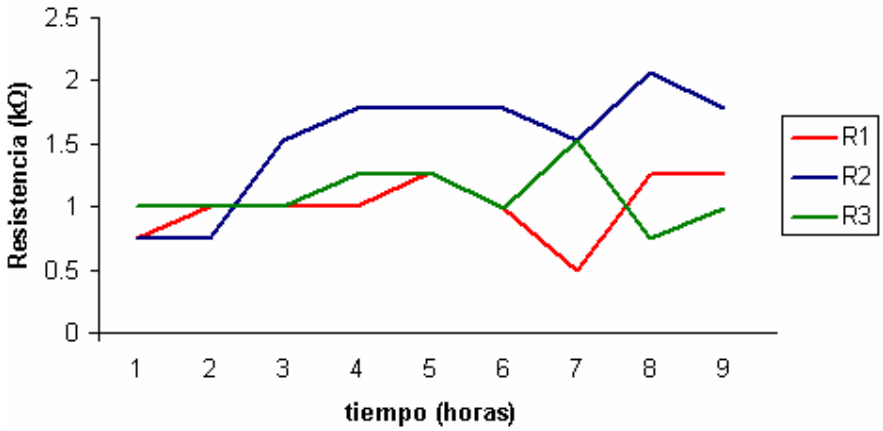


Figura 52. Gráfica Resistencia Salida Watermark vs Tiempo

5.4. Detector de nivel de agua

Este dispositivo es independiente de los anteriores, pues no forma parte de un control climático, sin embargo se consideró su inclusión debido al uso constante de agua en los sistemas de riego. Consta de una etapa de alimentación (a), de terminales de Vac (e) que van al contenedor, de rectificadores para éstas, (b) y (c), y de una etapa de potencia (d).

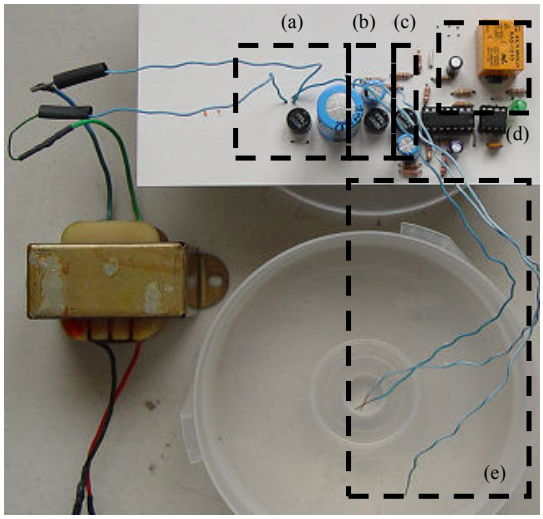


Figura 53. Sistema de Control de Nivel de Agua con sus etapas de a) alimentación, b) y c) rectificación, d) potencia y e) medición

Para el caso de este dispositivo, se realizaron las pruebas en un contenedor prototipo, para observar el correcto funcionamiento, colocando dos terminales del dispositivo en el nivel inferior del sistema, la terminal común y la que modifica la entrada dos del 555 [Figura 54 (b)], y una tercera terminal a la altura de llenado del contenedor, que modifica la entrada 6 del 555 [Figura 54 (a)]. Entonces, se varió la cantidad de agua se observó el comportamiento del dispositivo, teniendo un tiempo medio de respuesta para cada cambio de nivel de 2 segundos, debido a la carga y descarga de los capacitares en la etapa de rectificación.

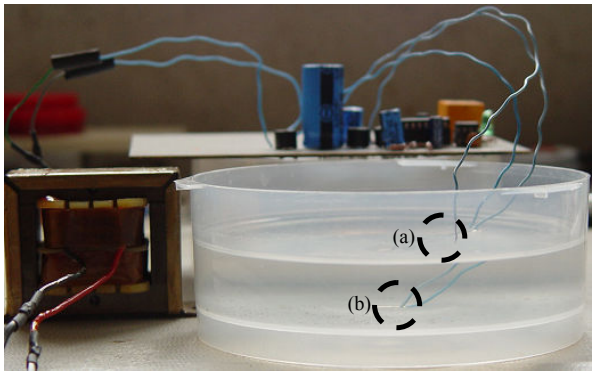


Figura 54. Pruebas de Control de Nivel de Agua con el sensor de presencia de agua en a) el nivel superior y b) en el nivel inferior

Conclusiones

Un invernadero se muestra como una herramienta para la generación de un microclima acorde con las necesidades de un cultivo, siendo necesario un control climático extra para los casos en que las condiciones deseadas difieran mucho de las condiciones climáticas locales. En este trabajo se estudió la forma en que los parámetros climáticos afectan a los cultivos y cómo tener un control sencillo pero eficiente de estos parámetros.

De acuerdo con el capítulo 1, se tienen como parámetros principales para el control climático para el óptimo desarrollo de un cultivo bajo invernadero a la temperatura, humedad relativa atmosférica y la cantidad de agua en el suelo. Estos parámetros están interrelacionados de tal forma que no se puede modificar uno sin que se vean afectados los demás.

Para el control de la temperatura se observó que los límites inferiores y superiores los define el tipo de cultivo del que se trate, de su región de origen y de en dónde se cultive. Se cuenta como datos la temperatura mínima letal, las máxima y mínima biológicas y las temperaturas nocturna y diurna, para poder establecer un control óptimo.

La humedad relativa afecta principalmente la evapotranspiración del cultivo, y los límites dependen de éste y de la etapa de desarrollo en la que se encuentre, así como de la hora del día, pues cuando hay más radiación solar es cuando transpira más el cultivo. Estos parámetros se relacionan con el Déficit de Presión de Vapor que sirve como indicador de necesidades hídricas del cultivo y la atmósfera a su alrededor.

La correcta cantidad de agua en suelo permite, junto con el CO_2, radiación solar y nutrientes, el desarrollo de una planta, teniendo así la capacidad ésta de producir biomasa. El flujo hídrico del suelo de un cultivo está relacionado con la evapotranspiración, que es la pérdida de agua del suelo debido a la transpiración de la planta y la evaporación del agua directamente del suelo. La cantidad necesaria de agua en el suelo se determina por su estado de desarrollo, consumo y hora del día, por lo que se puede evitar tanto el estrés hídrico como el drenaje.

Para el control de estos parámetros, como se vio en el capítulo 2, existen múltiples sistemas, tanto individuales como integrales. La mayoría de ellos presenta un control sencillo en un solo sentido, para controlar que no sobrepase un intervalo o no esté por debajo de éste.

En el caso del control de la temperatura, se tienen a los termostatos, cuya entrada es un valor fijo de temperatura, puesta como límite y al alcanzar este valor se activa un sistema de calefacción o refrigeración, según sea el caso, con una salida de potencia. Para la calefacción existen múltiples variantes de calefactores, con tecnologías de transmisión de calor por convección, conducción o radiación.

Para la humedad relativa, se cuentan con equipos con características semejantes a los de temperatura, proporcionando la posibilidad de controlar equipos de humidificación (microaspersores, evaporación, riego) y dehumidificación (ventiladores, extractores).

Para el control de la cantidad de agua en suelo se tienen múltiples sistemas de medición, de acuerdo con el método que utilicen, como puede ser con la medida directa del contenido de agua en el suelo, medida del estado hídrico del agua o medida de los parámetros climáticos.

Teniendo en cuenta estos antecedentes, a partir del capítulo 3 se propuso un sistema de control climático integral que permita controlar en ambas direcciones, tanto máximos como mínimos, para cada parámetro. La base principal para el dispositivo de control consistió en el desarrollo de un control con histéresis basado en la configuración interna de comparadores y Flip-Flop del circuito integrado LM555, cuyas aplicaciones se restringen comúnmente a la operación como Timer.

La propuesta de usar el LM555 como comparador con histéresis permite realizar controles de este tipo de forma sencilla, y la carga de 100mA máxima que soporta su terminal de salida, permite la conexión directa de relevadores así como de LEDs como indicadores visuales de la activación del relevador sin necesidad de una etapa adicional para el suministro de corriente.

Las etapas de diseño de estos sistemas consisten en la alimentación, el sensor, el transductor, el sistema de comparación (en donde el usuario ajusta los límites) y la salida. Para los casos de los sensores de temperatura y humedad relativa, en los que el parámetro de interés se da en términos de tensión eléctrica, el transductor consiste en la manipulación de esta tensión de salida del sensor para obtener valores de operación de 0 a Vcc, tales que con la salida media un potenciómetro con los extremos a GND y Vcc se pueda abarcar el intervalo de operación.

En el caso de los transductores de cantidad de agua en suelo, debido a que el sensor proporciona cambios en la resistencia eléctrica proporcionales a los cambios en la cantidad de agua, y a las características de operación del sensor, se optó por un generador de onda senoidal conectado a un divisor de tensión resistivo, tal que al variar la resistencia del sensor ésta se refleje en un cambio en la amplitud de la señal senoidal. Este cambio de amplitud se mide rectificando la señal, eliminando el offset y ajustando la amplitud, tal que también se tenga una salida de 0 a Vcc para el intervalo de operación del sensor de 0 a 200 cb (200 kPa).

Se diseñó además un detector de nivel de agua, tal que el suministro para los sistemas de riego o de humidificación no se vea interrumpido. Se decidió un sistema que trabaje con corriente alterna para evitar la ionización de los sensores y la electrólisis del agua. Se tienen entonces tres terminales que van al contenedor, dos de ellas en el nivel mínimo y la otra en el nivel máximo deseado.

Debido al empleo de tecnología analógica, el costo comparado con los sistemas similares resulta drásticamente inferior, así como una gama más amplia de aplicaciones, como es la incorporación simultánea del control superior e inferior de los parámetros deseados, aunque el método de control fijando el valor tope y un diferencial resulta en ocasiones confuso.

Los resultados de las pruebas a estos sistemas muestran un funcionamiento correcto en condiciones experimentales, sin embargo falta probar el sistema en condiciones reales

de uso, con variaciones frecuentes de humedad, iluminación, temperatura y ventilación, así como introducción de polvo y agua.

Resta además, realizar un sistema de captura de las condiciones climáticas del tipo datalogger, registros periódicos automáticos y un programa para computadora capaz de leer estos datos del controlador climático y mostrarlos en forma tabular o gráfica, para el análisis correspondiente por parte de personal especializado, pudiéndose así usar este equipo en condiciones experimentales.

Bibliografía

009017-2-EN IL50 GLO, 2005. Honeywell Sensing and Control Honeywell International Inc. [En Línea] Printed in USA. www.honeywell.com/sensing [Consulta: Mayo 2007]

Allen R. G., L. S. Pereira, D. Raes, M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage. Paper 56.

Amplificadores Operacionales [El Línea]
http://www.monografias.com/trabajos45/amplificadores-operacionales/amplificadores-operacionales2.shtml [Consulta: Mayo 2007]

C. Baker, M. Baker. Relative Humidity [En Línea]. Orchid Species Culture. [Consulta: Mayo 2007]. Disponible en web: http://www.orchidculture.com/COD/humidity.html

C.C. Shock, J.M. Barnum, and M. Seddigh. 1998. Calibration of Watermark soil moisture sensors for irrigation management, pp.139-146, Proceedings of the International Irrigation Show, San Diego, CA. Irrigation Association

C.C. Shock. Granular Matrix Sensors [En Línea]. Oregon State University. Malheur Experiment Station. Junio 2007 [ref. de Junio 2007]. Disponible en web: http://www.cropinfo.net/granular.htm

C.C. Shock et al. A Comparison of Six Soil Moisture Sensors [En Línea]. Oregon State University. Malheur Experiment Station. Agosto 2002 [ref. de Junio de 2007]. Disponible en web: http://www.cropinfo.net/AnnualReports/2001/Popsensortest01.htm

C.C. Shock et al. A Comparison of Soil Water Potential and Soil Water Content Sensors [En Línea]. Oregon State University. Malheur Experiment Station. 2002 [ref. de Junio de 2007]. Disponible en web:
http://www.cropinfo.net/AnnualReports/2002/sensortest02.htm

C.C. Shock et al. El control del Riego Mediante la Tensión Matricial del Suelo. Técnicas de la Agricultura Sostenible. Oregon State University. EM 8900-S-E. Octubre 2006.

Control climático en invernaderos. [En Línea].
http://www.infoagro.com/industria_auxiliar/control_climatico.asp [Consulta: 15 de mayo de 2007]

Dosis de riego para los cultivos hortícolas bajo invernadero en Almería. 2a edición. CAJAMAR. 2005.

E. Brink, S. McClain, S. Rothert. Beyond Dams – Options & Alternatives [En Línea]. American Rivers & International Rivers Network. Mayo 2004 [ref. de Junio 2007]. Disponible en web: http://www.irn.org/basics/alternatives/pdf/BeyondDams.pdf

Estudios técnicos de ambientación climática. [En Línea]. http://www.tpagro.com/textos/ambientacion%20climatica.htm [Consulta: 16 de mayo de 2007]

F. Sánchez del Castillo, P. Espinosa, E. Moreno. "Apuntes de Sistemas Especiales en Horticultura". México, Universidad Autónoma Chapingo. Ciclo: 2002-2003

Garzoli K. V. 1989. Energy efficient greenhouses. Acta Horticulturae 245: 53-62.

Greenhouse Food Production [En Línea]. North Carolina State University. College of Agriculture and Life Sciences. Noviembre 2006 [ref. de Mayo de 2007]. Disponible en web: http://www.ces.ncsu.edu/depts/hort/greenhouse_veg/index.htm

Hobby Greenhouse and Indoor Garden Climate Control Equipment at Home Harvest Garden Supply [En Línea]. http://homeharvest.com/environmentalcontrols.htm [Consulta: Junio 2007]

Horizen Hydroponics – Environmental Control [En Línea]. http://www.hhydro.com/cgi-bin/hhydro/ENVIRONMENTAL_CONTROL.html?pg=Environmental%20Control [Consulta: Junio 2007]

HYPERLABS, Inc.: Time Domain Reflectometer [En Línea]. http://www.hyperlabsinc.com/miva/merchant.mvc?Screen=CTGY&Store_Code=HI&Category_Code=TDR [Consulta: Junio 2007]

J. C. López. 2000 "Sistemas de Calefacción", Estación Experimental Las Palmerillas de Caja Rural de Almería en "Calefacción de Invernaderos en el Sudeste Español. Resultados Experimentales para cultivos de pepino y judía", Edita Caja Rural de Almería.

J. C. López. 2001 "Sistemas de Calefacción", Estación Experimental Las Palmerillas de Caja Rural de Almería en "Incorporación de Tecnología al Invernadero Mediterraneo", Edita CAJAMAR

J. Chard. 2005. Watermark Soil Moisture Sensors: Characteristics and Operating Instructions [En Línea]. Utah State University. Crop Physiology Laboratory. Disponible en web: http://www.usu.edu/cpl/research_instrument.htm#soilmoisture [Consulta: Junio 2007]

J. del Águila. 2001. "Incorporación de Tecnología al Invernadero Mediterraneo", Edita CAJAMAR

J. Ghorhor. Osciladores Senoidales. Práctica Resuelta. Universidad Nacional de Rosario. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Argentina, 2006.

J. J. Pérez-Parra. et al. 2003. "Influencia de las ventanas laterales sobre la ventilación natural en invernadero tipo parral". Actas de Horticultura N°39, X Congreso Nacional de Ciencias Hortícolas. Pontevedra 2003. pp 419-421

J. J. Pérez-Parra. et al., 2001, "Ventilación y refrigeración de invernaderos" en "Incorporación de Tecnología al Invernadero Mediterráneo", Edita CAJAMAR.

J. J. Prenger, P. P. Ling. Greenhouse Condensation Control: An Introduction [En Línea]. Ohio State University Extension. Food, Agricultural and Biological Engineering. Fact Sheet AEX-800-00. Disponible en Web: http://ohioline.osu.edu/aex-fact/0800.html [Consulta: Mayo 2007]

J. J. Prenger, P. P. Ling. Greenhouse Condensation Control: Bottom Heating and Between-row Heating [En Línea]. Ohio State University Extension. Food, Agricultural and Biological Engineering. Fact Sheet AEX-801-00. Disponible en Web: http://ohioline.osu.edu/aex-fact/0801.html [Consulta: Mayo 2007]

J. J. Prenger, P. P. Ling. Greenhouse Condensation Control: Improving Air Circulation [En Línea]. Ohio State University Extension. Food, Agricultural and Biological Engineering. Fact Sheet AEX-803-00. Disponible en Web: http://ohioline.osu.edu/aex-fact/0803.html [Consulta: Mayo 2007]

J. J. Prenger, P. P. Ling. Greenhouse Condensation Control: Keeping Plants Warm with Thermal Screens [En Línea]. Ohio State University Extension. Food, Agricultural and Biological Engineering. Fact Sheet AEX-802-00. Disponible en Web: http://ohioline.osu.edu/aex-fact/0802.html [Consulta: Mayo 2007]

J. J. Prenger, P. P. Ling. Greenhouse Condensation Control: Understanding and Using Vapor Pressure Deficit (VPD) [En Línea]. Ohio State University Extension. Food, Agricultural and Biological Engineering. Fact Sheet AEX-804-01. Disponible en Web: http://ohioline.osu.edu/aex-fact/0804.html [Consulta: Mayo 2007]

La Atmósfera [En Línea].
http://club.telepolis.com/geografo/clima/atmosfera.htm#humedad [Consulta: 16 de mayo de 2007]

M. D. Fernández, F. Orgaz et al., 2001. "Programación de riego de cultivos hortícolas bajo invernadero en el sudeste español", Edita CAJAMAR).

M. Darre. Psychrometric Chart Use (inner frame) [En Línea]. University of Connecticut. Northeast Regional Poultry Research Proyect, NE-127. Disponible en web: http://www.sp.uconn.edu/~mdarre/NE-127/NewFiles/psychrometric_inset.html [Consulta: Mayo 2007]

O. Barrios. 2004. "Construcción de un invernadero". Fundación de Comunicaciones, Capacitación y Cultura del Agro

P. Lorenzo. 2000 Centro de Investigación y Formación Agraria de Almería. "Influencia de la Temperatura en el Crecimiento y Desarrollo de los Cultivos" en "Calefacción de Invernaderos en el Sudeste Español. Resultados Experimentales para cultivos de pepino y judía", Edita Caja Rural de Almería.

Prácticas de Circuitos Analógicos. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación. Curso 02/03.

R. Castañeda-Miranda et al. Análisis y Simulación del Modelo Físico de un Invernadero Bajo Condiciones Climáticas de la Región Central de México. Agrociencia 41: 317-335. 2007.

R. Moghimi. Curing Comparator Inestability with Hysteresis. Analog Dialogue 34-7. 2000

R. Ruiz. Técnicas de Análisis y Diseño Electrónico [En Línea]. Universidad Politécnica de Cartagena. Departamento de Electrónica, Tecnología de Computadoras y Proyectos. Disponible en web: http://wsdetcp.upct.es/Personal/R_Ruiz/Docencia/Tecnicas_de_Analisis_y_Diseno_/tecnicas_de_analisis_y_diseno_.htm [Consulta: Junio 2007]

Recomendaciones para cultivo de jitomate [En Línea]. El Campirano. Zacatecas, México, Agosto 2006 [ref. de Mayo 2007]. Disponible en web: http://www.oeidrus-zacatecas.gob.mx/oeidrus_zac/zacatecas/periodico/CampiranoAgosto/Recomendaciones%20para%20cultivo%20de%20jitomate.htm

Sun Hold Electric Inc. SH Relay [En Línea]. http://www.sunhold.com/ras2.html [Consulta: Junio 2007]

T. J. Maloney. Electrónica Industrial Moderna. Ed. Prentice Hall. 3ra ed. México, 1997.

T. Smith, J. W. Bartok. Reducing Humidity in the Greenhouse [En Línea]. University of Massachusetts Amherst. Noviembre 2003 [ref. de Mayo de 2007]. Disponible en Web: http://www.umass.edu/umext/floriculture/fact_sheets/greenhouse_management/humidity.htm

Technical LED's LED Color Chart [En Línea]
http://www.oksolar.com/led/led_color_chart.htm [Consulta: Junio 2007]

Watermark Soil Moisture Sensor. Irrometer Company. Disponible en web: www.irrometer.com

Y. S. Kwon, H. Chun. Production of Chili Pepper in Different Kinds of Greenhouse in Korea [En Línea]. National Horticultural Research Institute. Rural Development Administration. Suweon 441-440, Korea. Octubre 1999 [ref. de Junio 2007]. Disponible en web: http://www.agnet.org/library/eb/478/