

## EL CONTROL EN INVERNADEROS

José Alfredo Palacio Fernández, profesor de microcontroladores y asesor de proyectos de grado  
 Tecnológico Pascual Bravo, Institución Universitaria  
 Cll 41 a. sur #32-13 Envigado Colombia, joseopalacio@hotmail.com.co, tel. (+574) 3323493.  
 Grupo GARPE (Grupo de Automatización, Robótica y Pedagogía, TPBIU)

**Resumen.** Para implementar el control de cultivos agrícolas en invernaderos, se requiere de una serie de sensores, actuadores y métodos de control que varían en precisión, costo y complejidad. En este artículo se recopila algunos de estos elementos con una explicación general de los mismos.

**Palabras Clave.** Sensores, control, automatización, actuadores, invernadero, cultivo, proceso.

**Abstract.** To implement the control of agricultural crops in greenhouses, requires a series of sensors, actuators and control methods that vary in accuracy, cost and complexity. This article collects some of these elements with a general explanation of them.

**Key Word.** Sensors, control, automation, actuators, greenhouse, cultivation, process.

### I. INTRODUCCIÓN

Los cultivos agrícolas en invernaderos se desarrollan de forma manual lo que conlleva una dedicación permanente del agricultor y en ocasiones no se establece un control exacto de los niveles de humedad, temperatura, concentración de CO<sub>2</sub>, circulación del aire, luz, etc. Para solventar estos inconvenientes, diversas entidades de investigación académica y/o comercial, han desarrollado elementos discretos y procesos mediante los cuales se mejoran los niveles de calidad de los productos, se apoya el seguimiento o trazabilidad del mismo y se mejora la producción.

### II. Sensores aplicados a la agricultura

Para ejercer un control sobre un proceso, debemos obtener los valores de la variable física, lo cual se logra empleando sensores que transforman los

niveles de la variable en señales de corriente o voltaje llevados a niveles estándar a la entrada del controlador.

#### A. Sensores de humedad en sólidos

El nivel de humedad en sólidos es una de las variables en los procesos agrícolas que deben ser controladas debido a que su exceso en algunas especies puede ocasionar falta de oxígeno, con ello una detención en el crecimiento y posterior muerte de las raíces y la falta de humedad ocasiona deshidratación caso que es difícil de remediar [1]. Existen diferentes métodos para determinar los niveles de humedad que van desde los más económicos basados en la conductividad entre dos electrodos que pueden ser dos varas de hierro hasta los más costosos como las sondas de neutrones.

#### Secado térmico

Es el método más antiguo y se emplea para comprobar los demás sistemas y consiste en calentar el material asta que no se libere más agua [2]. Una forma es pesando el material seco y después de humedecerlo; el problema es que no se puede repetir en el mismo lugar se deben hacer pruebas en terreno independiente. Este método se conoce como método galvanómetro directo

#### Método de conductividad

Método basado en la colocación de dos electrodos en el material entre los cuales se genera una mayor o menor conductividad debido al aumento en la humedad. Va acompañado de un puente de wheatstone (Figura 1) para acondicionar la señal.

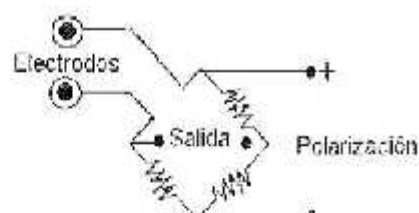


Figura 1 Puente wheatstone que acondiciona la señal proveniente de los electrodos para la medición de humedad.

El problema de alimentar la señal con polarización DC es la posible generación de electrolisis entre los electrodos por lo que se recomienda generar una señal oscilante [3]

### Método de capacitancia

Los dieléctricos en los terrenos cultivados se encuentran entre 2 y 4 en frecuencias mayores a 200MHz mientras que el del agua es 80 se debe tener en cuenta que el dieléctrico a menores frecuencias se incrementa y se hace variable.

Así la capacitancia es más alta si hay mayor nivel de humedad

### B. Sensores de temperatura

Debido al restringido límite del rango de temperaturas que se pueden presentar al interior de un invernadero que va desde 0 a unas pocas decenas de grados Celsius, (depende también de la región del país donde se trabaje) podemos emplear sensores basados en semiconductores como son:

#### Sensor de salida análoga LM335

Es un sensor semiconductor de temperatura que entrega 10mV por cada grado Kelvin y opera a un equivalente en grado Celsius entre -40°C y 100°C rango en el cual están incluidas las temperaturas extremas en un invernadero.

Este sensor debe estar acompañado de un ajuste de ganancia y de cero para dar una referencia en escala Centígrada [4].

#### Sensor de salida análoga LM35

Este sensor entrega una salida de 10mV/°C. Es lineal, no requiere calibración externa y su rango de trabajo va de -55°C a 150°C. Para que trabaje a full escala el circuito debe estar referenciado a la

salida a una fuente negativa de voltaje (ver figura 2) con  $R = V_s/50\mu A$ . El rango real de trabajo del LM35 va entre 2°C a 150°C con referencia de salida a tierra (ver figura 2) [5].

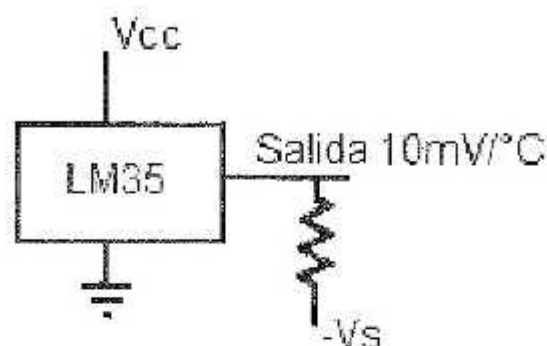


Figura 2. Salida del sensor a full escala

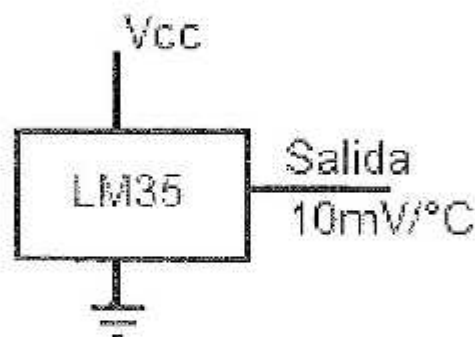


Figura 3. Salida del sensor a escala de 2°C a 150°C

#### Sensor de salida digital ADT7317

Es un sensor fabricado por Analog Device® y que trabaja con varios protocolos de comunicación serial entre ellos SPI e I2C maneja conversión análoga a digital de 10 bit con una resolución de 0.25°C, opera entre -40°C y 120°C [6]

Se puede trabajar con sensores tipo Termocupla pero estos no son lineales y requieren una referencia de punta fría para poder calibrar el sensor a la temperatura real [7]. Además son muy costosas en comparación al las mencionadas anteriormente.

### C. Sensores de CO2

Las plantas usan el CO2 para la fotosíntesis, siendo el crecimiento hasta un 30 % más rápido si el gas se encuentra en niveles de 1500 a 1800 ppm (partes por millón). El CO2 se encuentra de forma natural

en la atmósfera en niveles de 320 a 500 ppm. Las concentraciones superiores al 0,3% resultan tóxicas para los cultivos.

Los niveles aconsejados de CO<sub>2</sub> dependen de la especie o variedad cultivada, de la radiación solar, de la ventilación, de la temperatura y de la humedad. El óptimo de asimilación está entre los 18 y 23° C de temperatura, descendiendo por encima de los 23-24° C. Respecto a la luminosidad y humedad, cada especie vegetal tiene un óptimo distinto.[8]

Es por eso que se debe ejercer un control sobre esta variable. Algunos de los sensores que hay en el mercado son:

#### Sensor TGS4160

Este sensor posee internamente un termistor que debe mantener una temperatura específica para poder tener una buena detección esta temperatura se logra al conectar un voltaje (VH) entre dos terminales de entrada empleados para dicho fin. El sensor se debe medir empleando una alta impedancia lo cual se logra adicionando al circuito un amplificador de alta impedancia superior a los 100GΩ uno de estos amplificadores puede ser el TLC271 de Texas Instrument y la salida de este debe ser llevada a un microcontrolador que procese o acondicione los valores del sensor. La figura 4 [9] muestra la conexión que se realiza con el amplificador operacional como seguidor de voltaje.

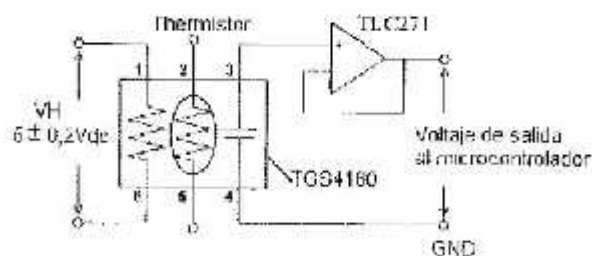


Figura 4. Sensor de CO<sub>2</sub> TGS4160

#### Transmisor GMT220

Es un transmisor industrial de CO<sub>2</sub> de señales entre 0 y 20 voltios o 4 a 20 mA diseñado con norma IP65 que asegura la protección contra el polvo y el agua. Que pueden ser muy comunes en los invernaderos.

#### D. Sensores de luz

La luz es fundamental para la fotosíntesis de las plantas la cual, proporciona la energía mediante la cual las plantas sintetizan los alimentos. Para medir la intensidad lumínica se pueden emplear fotoceldas, las cuales varían la impedancia de acuerdo al nivel de intensidad lumínica. Es importante aumentar el día de luz interno pues algunas plantas mejoran su producción con luz más de 12 horas diarias o luces cíclicas que simulan varios días en la noche.

#### III. Actuadores empleados en los invernaderos

De acuerdo a las variables sensadas, se debe ejercer un control de acuerdo a cada producto agrícola agrícola. Algunos elementos secundarios de control (actuadores) son:

Válvulas: encargadas del control de la cantidad de riego requerida dependiendo si es por goteo o por aspersión y esta puede ser ON-OFF o proporcional tipo electroválvula.

La firma Queen Gil, destaca la su nueva cinta de riego por goteo, con goteros (aberturas) cada 10 cm (10 goteros por cada metro de cinta). Un total de 4 litros/hora por metro a base de solo 0,4 litros por gotero y hora. [10]. Aparte del riego, se debe mantener una atmósfera con condiciones de humedad óptimas; esto se puede lograr empleando nebulizadores los cuales, mediante aspersión por presión de partículas de agua de orden a 10micras, mantienen una atmósfera similar a la neblina. Esta humedad no se debe llevar a la saturación.

También en las heladas presentadas en las madrugadas en algunas regiones de Colombia se deben tener sistemas de calefacción por caldera o por calefactor de combustión directa que además genera CO<sub>2</sub> los cuales no deben superar estándares de toxicidad para las personas y las mismas plantas.

Para la homogenización de las condiciones climáticas, se precisa de ventiladores y controlar la apertura del techo o paredes del invernadero durante cierto tiempo del día.

El control de temperatura puede ser de tipo on-off llevando los actuadores a valores que mantengan la temperatura deseada. La calefacción también puede estar enterrada en el suelo pues este requiere

también un rango de temperatura óptima en las raíces para que estas crezcan más rápido y puedan absorber más nutrientes.

#### IV. Métodos de control en invernaderos

Para determinar el método de control a emplear, se debe tener conocimiento sobre el modelo del proceso. El cual es representado mediante ecuaciones matemáticas.

Un modelo propio para un invernadero se puede llevar a espacio de estados (2)[11] no lineales debido a la heterogeneidad de las variables presentes aplicando balance de energía y masa mediante la temperatura y humedad relativa presentes en el cultivo

$$\rho v_i \frac{d}{dt} x_i = F_{in} + C_{sat} (K + fog)$$

$$\rho v_i C_p \frac{d}{dt} T_i = Q_s + Q_{cc} + Q_m - Q_v + C_{sat} (Q_e + Q_n) \quad (2)$$

$$A_i C_m \frac{d}{dt} T_m = Q_{sm} - Q_m - Q_f$$

Donde  $\rho$  es la densidad del aire

$v_i$ : Volumen del invernadero

$x_i$ : Humedad absoluta

$F_{in}$ : Flujo de renovación del vapor de agua en el aire

$C_{sat}$ : Coeficiente de saturación del aire

$E$ : Evaporación del cultivo

$fog$ : Nebulización

$C_p$ : Calor específico del aire

$Q_s$ : Energía solar suministrada al aire

$Q_{cc}$ : Perdidas de energía por convección y conducción

$Q_m$ : Intercambio de energía con la masa térmica

$Q_v$ : Intercambio de energía debido a la ventilación

$Q_e$ : Perdidas de energía debida a la evapotranspiración del cultivo

$Q_n$ : Perdidas de energía por nebulización.

$A_i$ : Superficie del invernadero

$Q_{sm}$ : Energía almacenada por la masa térmica durante el día

$Q_f$ : Perdidas hacia el fondo del suelo

La figura 5 muestra un modelo MIMO del sistema:

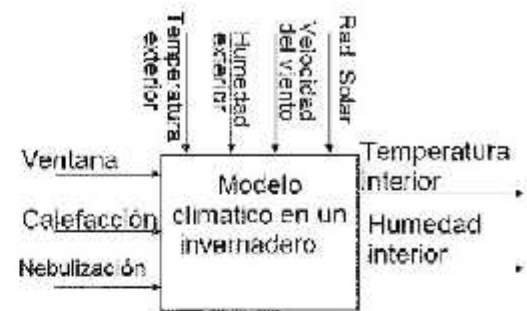


Figura 5 modelo de entrada y salidas

Otro método de control es el que tiene en cuenta los niveles óptimos de nutrientes, luz y dimensiones del producto el cual, mediante algoritmos genéticos y redes neuronales determina la producción óptima [12].

Utilizando redes neuronales (figura 5) y algoritmos genéticos para controlar el radio de las hojas (RTH) y el diámetro tallo (DT). La ecuación a optimizar es (3) y relaciona el cociente entre RTH y DT y la proporción de nutrientes como combinación filial genética.

Donde  $NC(k)$  es la concentración de nutrientes en la muestra  $k$ .

Para la implementación, el estado de la planta del semillero fue dividido en 4 pasos:

- 1) Trasplante
- 2) Vegetación después del trasplante
- 3) Floración del primer racimo
- 4) Colocación del primer fruto para el primer racimo y floración del segundo racimo y los valores de  $RTH(k)/DT(k)$  en el último paso (paso 4).

$$F(NC(k)) = \frac{1}{N - N_{3L} + 1} * \sum_{k=N_L+1}^N \frac{RTH(k)}{DT(k)} \quad (3)$$

Los valores de la concentración de nutrientes  $NC_1$ ,  $NC_2$ ,  $NC_3$  o  $NC_4$ . La función objetivo fue dada por el valor promedio de  $RTH/DT$  en el último paso (paso 4),  $N_{3L} + 1 \leq k \leq N$  en su respuesta

dinámica (1)(N3L+1: primer día del paso 4) relacionado con el esquema de red neural de la siguiente figura:

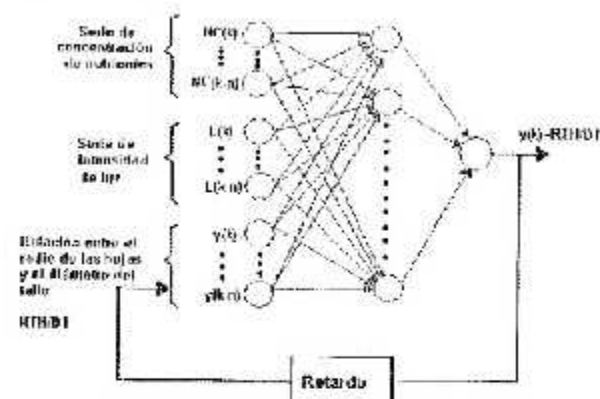


Figura 5. Esquema en red neuronal para el control de un cultivo

5. El problema de optimización es encontrar la consigna para la concentración de nutrientes NC1, NC2, NC3, y NC4, ayudados por el método de algoritmos genéticos los cuales maximizan F(NC).



## V. CONCLUSIONES

En el mercado hay infinidad de sensores aplicables a la agricultura los cuales los cuales varían en costo, precisión y facilidad de adquisición de las señales.

Para controlar alguna variable de un proceso agrícola, se pueden aprovechar los actuadores naturales así como artificiales interactuando entre sí.

El desarrollo del controlador, puede resultar complejo dependiendo del tipo de control escogido y el número de entradas que se deseen controlar.

## REFERENCIAS

- [1] [http://www.abcagro.com/flores/plantas\\_ornamentales/limonium2.asp](http://www.abcagro.com/flores/plantas_ornamentales/limonium2.asp). Consultada en abril de 2008
- [2] Creus Solé, Antonio, Instrumentación Industrial. Ed. Marcombo, 5ª edición, Barcelona, 1993, Pág. 327.
- [3] Fliger, Elias. Sensor de Humedad Con Conductivo en Sólidos con Aplicación en Invernaderos, Universidad nacional de Quilmes Argentina. [iaci.utq.edu.ar/](http://iaci.utq.edu.ar/)
- [4] Miguel, J., Rosado, A., Bataller, M., Guerrero, J., Monitorización y control de un Invernadero, Mundo Electrónico, 2001, N°318, Págs. 52-58
- [5] National Instruments, Analog Products Databook, 2004, Sección 10-18
- [6] <http://www.analog.com>, consultada en abril de 2008
- [7] [www.desi.iteso.mx/elec/instru/cap4.pdf](http://www.desi.iteso.mx/elec/instru/cap4.pdf), Consultada en abril de 2008
- [8] [http://www.infoagro.com/industria\\_auxiliar/control\\_climatico.htm](http://www.infoagro.com/industria_auxiliar/control_climatico.htm), consultada en mayo de 2008.
- [9] <http://www.figarosensor.com/products/>, consultada en mayo de 2008.
- [10] Puerta, C., Agricultura, Revista Agropecuaria, 17 Madrid, 1999
- [11] Martínez, M., Blasco, X., Herrero, J.M., Sauchis, J., Monitorización y Control de Procesos. Una visión Teórico-Práctica Aplicada a invernaderos, Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial, Octubre de 2005, 4(2) Págs 5-24.
- [12] Hashimoto, Y., Murase, H., Morimoto, T. and Torii T., Intelligent system for agriculture in japan. Control System, 21(5):71-81, 2001.