

# DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN INVERNADERO CON CONTROL Y SUPERVISIÓN COMPUTARIZADA DE TEMPERATURA, HUMEDAD E INTENSIDAD DE LUZ

## DESIGN AND CONSTRUCTION OF GREENHOUSE WITH CONTROL AND SUPERVISION COMPUTERIZED OF TEMPERATURE, HUMIDITY AND INTENSITY OF LIGHT

Jorge Alberto Del Carpio Salinas<sup>1</sup>, Samuel Gustavo Huamán Bustamante<sup>2</sup>

### RESUMEN

*Al iniciar el proyecto se planteo resolver algunos de los problemas que surgen en los invernaderos, como la alta temperatura y equipos de costos elevados, con base una experiencia previa en un módulo mucho menor. Los demás parámetros son importantes pero no tan determinantes como la temperatura y son la humedad relativa y la Iluminación. Para tal fin construimos un invernadero tipo túnel de 50 m<sup>2</sup> (se estima como área rentable mínima), rediseñamos y construimos el equipo electromecánico de control que consta de equipo electrónico de control con microcontrolador y donde se programaron los algoritmos de control PI y Difuso; además los actuadores llamados humidificador enfriador e Iluminador Calentador, que tienen doble función en beneficio de los cultivos. El equipo electromecánico es reproducible a bajos costos de construcción y energía pero tiene un comportamiento físico un tanto complejo.*

*Palabras clave.- Invernadero, Microcontrolador, Algoritmo PID, Lógica difusa, Radiación solar, Conservación de energía.*

### ABSTRACT

*When beginning the project outlines to solve some of the problems that arise in the hothouses, as the high temperature and kit of high costs, with base a previous experience in an prototype much smaller. The other parameters are important but not so decisive as the temperature and they are the relative humidity and the Illumination. For such end we built a hothouse type tunnel of 50 m<sup>2</sup>, (it is considered as minimum profitable area) redrew and built the electromechanical kit of control that consists of electronic kit of control with microcontroller and where the algorithms of control PI were programmed and Fuzzy Logic; also the set called Cooler Humidify and Heater Illuminator that have double function in benefit of the farming. The electromechanical kit is reproducible to low construction costs and energy but it has a physical behavior a so much complex.*

*Key words.- Greenhouse, Microcontroller, Algorithm PID, Fuzzy logic, Solar radiation, Conservation of energy.*

### INTRODUCCIÓN

Un invernadero permite logros importantes en investigación y producción agrícola [20],

<sup>1</sup>Dr., Ing., Jefe del Centro de Investigación y Desarrollo del Área de Procesamiento de Señales y Sistemas de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Ingeniería, <sup>2</sup>Ing. de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional de Ingeniería.

pero existen problemas que necesitan ser controlados de manera automática para la producción comercial de calidad y cantidad en poco espacio y diferentes períodos [4]. Esto permite dar un valor agregado al producto agrícola y desarrollo a la agricultura tecnificada.

El proyecto se propuso dar solución a tres puntos importantes de los muchos que existen:

Mostrar la flexibilidad de un microcontrolador para la realización de un controlador de múltiples variables para un invernadero, teniendo en cuenta la complejidad de este sistema termodinámico. Dar solución a uno de los problemas más perjudiciales en invernaderos, como es la temperatura elevada y peligrosa, tanto para las plantas como para la estructura del mismo en determinada estación climática en nuestro país y de manera específica en la Sierra. Los intentos por solucionar este problema de manera mecánica trajeron otros como fuertes corrientes de aire caliente que en muchos casos revienta el material térmico, o también el paso a mosquitos que son perjudiciales a las plantas.

Como la actividad agrícola en nuestro país no permite altos costos en equipos o maquinarias, por lo tanto, el sistema de control automático, debe ser lo suficientemente efectivo, mínima complejidad, consumo de energía mínimo y componentes de bajo costo.

## INVERNADERO

Es una construcción liviana que puede ser usada como laboratorio [17], para adaptación o producción. Permite adaptar y desarrollar cultivos de plantas de diferente propósito (comestible y ornamental) a climas adversos, además, protege de plaga de insectos. Para lograr esto, durante el día un invernadero almacena calor y durante la noche la aísla del frío, esto permite mantener las raíces de las plantas protegidas (órgano vital); el material aislante del que están contruidos puede ser vidrio, polietileno, etc. Son ideales para adaptar plantas de zonas templadas o cálidas, en zonas frías o muy frías.

### Características para su construcción

Buena pendiente en su cubierta; flexibilidad frente al empuje de los vientos; la orientación debe ofrecer mínima resistencia al viento [20]. Los

materiales usados en un invernadero económico y eficiente son:

Polietileno de 250 micras y mallas contra insectos para el recubrimiento. Puntales (Troncos) o arcos de electro soldado y alambres para la estructura y los tensores.

### Instalación de la estructura y recubrimiento del invernadero tipo túnel

La instalación de la estructura del invernadero tipo túnel se realizó en el sector Q, - FIEE., UNI Lima - Perú, aproximadamente entre 50 y 100 msnm a 15° 45' latitud sur. Ver Fig. 1.



*Fig. 1 Fotografía que muestra la instalación del polietileno.*

### VARIABLES A CONTROLAR

Luz e iluminación.- El sensor medirá la iluminación [14] La iluminación se expresa en Lumen / m<sup>2</sup> = Lux. La unidad correspondiente en el sistema métrico, es llamada el metro candela. Las plantas dependen de la luz para sus procesos fisiológicos, y es importante mantener la periodicidad de la claridad y oscuridad.

Las lámparas incandescentes usadas pueden entregar de 100 a 200 lux. Pero la luz solar es equivalente a 4500 lux en día soleado y con nubes, pero puede alcanzar los 9000 lux en días despejados.

Temperatura.- La condición indispensable para un invernadero óptimo es mantener la temperatura bajo control de acuerdo a cada especie [4]. Las demás variables no son tan determinantes como la temperatura. Los rangos mínimos de temperatura según cultivo van de 4 a 10 °C y máximas de 30 a

35 °C, fuera de estos rangos y sobre todo los niveles bajos, son fatales.

Humedad relativa.- Está relacionada con la sensación térmica, (temperatura promedio sobre la piel o corteza de los seres vivos a causa de la evaporación) y la influencia que mantiene sobre el enfriamiento dentro del invernadero. La sensación térmica es importantísima en el caso de acondicionamiento de aire, pues, un ser vivo puede sentir molestias (animales y hombres) y hasta la muerte (plantas), si es que la humedad relativa es menor a 40% producto del aire seco y frío de un equipo que trata directamente el aire, o por mantener altas velocidades de viento en un ventilador que a su vez aumenta la evaporación en el cuerpo de un ser vivo.

Para invernaderos hidropónicos, según los investigadores, los valores óptimos de humedad relativa deben estar entre 65 y 70%, pues, los valores muy altos de humedad propician la aparición de hongos perjudiciales [18, 19].

Función de transferencia para temperatura y humedad específica.- Para calcular el algoritmo de la función de transferencia debemos asumir algunas restricciones:

- El sistema se puede considerar aislado térmicamente (por la cubierta usada en su construcción) y con pequeñas pérdidas.
- Las perturbaciones actúan cíclicamente y con lapsos lo suficientemente espaciados como para considerar que actúan una sola vez en el intervalo de tiempo analizado.
- El ambiente es ocupado por aire y el volumen de éste es considerado mayoritario en comparación de otros objetos.
- Se desprecia la capacidad de almacenamiento de calor del piso y demás objetos.

Con estas consideraciones usamos la primera ley de la termodinámica [7], también llamada "Ley de la conservación de la energía" [5].

Si consideramos las pérdidas en las paredes del recinto las expresiones serán:

$$-Q + Q_p = - \int P dt + Q_{sol} - \Delta \Delta U \quad (\text{enfriar}) \quad (1)$$

$$Q + Q_p = \int P_e dt + Q_{sol} + \Delta U \quad (\text{calentar}) \quad (2)$$

Q	:	Calor transferido. Puede ser + o -.
Q <sub>p</sub>	:	Calor perdido.
P <sub>e</sub> , P	:	Potencia eléctrica o mecánica.
Q <sub>sol</sub>	:	Calor suministrado por el sol.
ΔU	:	Cambio de energía interna.

Al desarrollar y reemplazar las expresiones equivalentes de acuerdo a sus parámetros en función a la diferencia de temperaturas cuando se extrae calor, se tiene:

$$-(C_{pa} + w C_{pv}) \rho \Delta T + \int \frac{KA}{L} (\Delta T) dt = - \int P dt + \int kx \Delta T x dt - nR_A \Gamma \quad (3)$$

Se aplica la transformada de L'aplace

$$\left( C_p \Delta T (s) + \frac{\Delta T (s) * w (s) C_p}{\pi} \right) \rho V + \left( \frac{K}{L} (\Delta T e(s) + \Delta T (s)) \right) = \frac{P(s)}{s} + \frac{kx \Delta T x (s)}{s} \quad (4)$$

## ALGORITMOS DE CONTROL Y PROGRAMAS

Este trabajo de investigación aprovecha una investigación previa [4] para extender sus resultados, por lo tanto, serán intercambiables los algoritmos como es el PI (proporcional e integral) y el otro más completo y multivariable como es el algoritmo difuso.

### Algoritmo PI

Para programar un controlador PI (Proporcional Integral), es necesario conocer la ecuación de transferencia del ambiente o planta. Para diseñar un Sistema de Control Multivariable [12] deben cumplirse los siguientes requisitos:

- *No interacción entre canales (Canales desacoplados).*
- *Exactitud Estática Nula.*
- *Estabilidad.*
- *Insensitividad a las perturbaciones.*

En principio este sistema no cumple con todos los requisitos; es acoplado porque existe convolución entre humedad específica y temperatura, presenta sensibilidad a las perturbaciones por causa de la influencia del sol sobre el sistema; es inestable naturalmente por la humedad. Como debemos dar solución a estos problemas y aproximar lo más que podamos al sistema real, pero cumpliendo las reglas, asumiremos desacoplamiento entre las variables y que las perturbaciones son predecibles (por ejemplo un escalón para la energía dada por el sol). En cuanto a la humedad sabemos que podemos estabilizarla. No es el objetivo realizar nuevamente el análisis, sino extender los resultados ya obtenidos a un nuestro módulo.

### Simulación

Como nuestro objetivo es disminuir el exceso de temperatura agregaremos un controlador PI digital y cerraremos el lazo de control como se ve en la Fig. 2. Pero antes nombraremos las ecuaciones por las cuales se aproxima el comportamiento del humidificador enfriador, a un controlador PI en lazo cerrado sin necesidad de un controlador digital.

$$P(s) = - (K_v K_k / \pi) \cdot \Delta T \cdot [S\tau - (S\tau)^2/2 + \pi i] [1 - 1/(S\tau + 2)] \cdot \Delta T(s) \quad (5)$$

La ecuación 5, expresa la potencia extraída.

$K_v$  es la constante dada por el ventilador,  $K_k$  es la constante del controlador añadido, solo es proporcional,  $\Delta T$  es la diferencial de temperatura máxima,  $\tau$  es la constante que refleja pérdidas y características del aire.

La aparición del término imaginario implicará de todas maneras oscilación amortiguada del sistema. Entonces nosotros podríamos asumir que el término cuadrático desaparece con valores de  $S < 1$  y por lo que el enfriador funciona sólo como un integrador.

$$P(s) = - (K_v K_k / \pi) \cdot \Delta T \cdot (1/S) \cdot \Delta T(s) \quad (6)$$

Si:

$$\begin{aligned} P(s) &= - G_c(s) \cdot \Delta T(s) \\ K1 &= \rho V(Cpa + wCpv - R/M) \\ K2 &= KA/L \\ G_p(s) &= [K1 S + K2]^{-1} \end{aligned}$$

Luego, de la ecuación 4 tendremos:

$$\Delta T(s) = K2 G_p(s) [1 + G_p(s) \cdot G_c(s)]^{-1} \Delta T_e - K_x$$

$$G_p(s) \cdot [1 + G_p(s) \cdot G_c(s)]^{-1} \Delta T_x(s) \quad (7)$$

Donde:  $K1 = 38040$ ;  $K2 = 4024.4$ ;  $K_S \approx 7000$  w/(Soc.); Volumen 123,67 m<sup>3</sup> de aire; Área cultivable = 50 m<sup>2</sup>. Para que el sistema oscile alrededor de 0° C de diferencia el sistema, tiene que ser de segundo orden, entonces el controlador debe ser PI. Pero ya tenemos el controlador que es de la siguiente forma:

$$G_c(s) = K_p + (K_v \cdot K_k / \pi) \cdot \Delta T \cdot (1/S) \quad (8)$$

Donde  $K_p$  del enfriador es tan pequeño comparado con  $k_2$  que se aproxima  $K_p = 0$ . Luego  $K_i = (K_v \cdot K_k / \pi) \cdot \Delta T$ , donde  $K_v$  esta alrededor de 8.5  $\Delta T = 16^\circ$  C y el valor máximo de  $K_k = 0,8$  m / ° C s, por que podremos implementar un PI en el lugar de  $G_{cc}(s)$  en caso se requiera, entonces  $K_i \approx 6.8$ .

En la práctica el controlador es digital, por lo tanto discreto. Debemos reformular la Ecuación 7 en función a la Fig. 2.

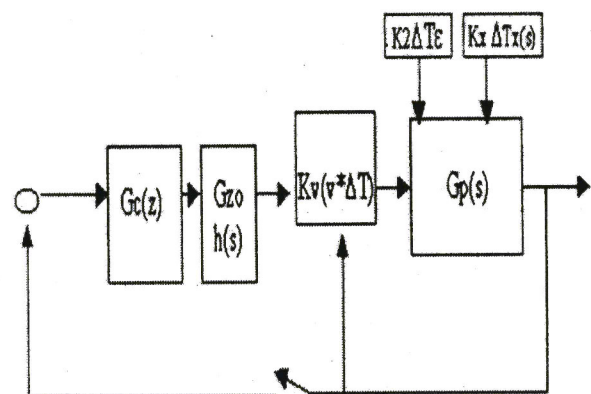


Fig. 2 Control de temperatura digital de lazo cerrado.

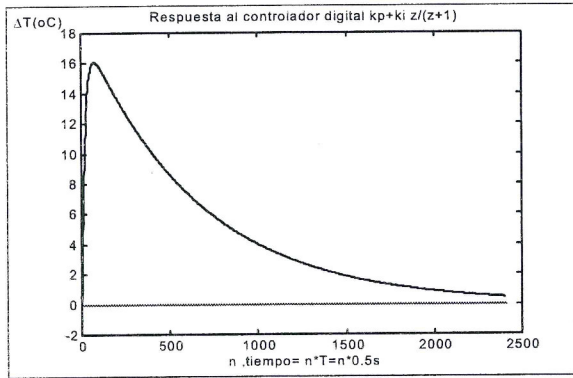
Reemplazando a lo siguiente:

$$\Delta T(z) = (NUM1 \cdot \Delta T_f(z)_o - NUM2 \cdot \Delta T_f(z)_i) / DEN \quad (9)$$

Donde:

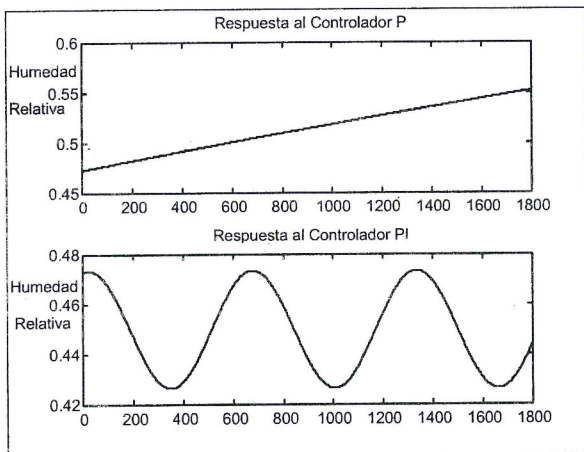
$$\begin{aligned} NUM1 &= (K2/K1)[1 + z^{-1}] \\ NUM2 &= (K_x/K2)(1 - \exp(-k2T/K1))[z^{-1} - z^{-2}] \\ DEN &= K2 + (1 - \exp(-k2T/K1))(K2 + K_p + K_i) z^{-1} + \\ &\quad (\exp(-k2T/K1)(K2 + K_p) - K_p) z^{-2} \end{aligned}$$

La repuesta a esta simulación se muestra en la Fig. 3.



**Fig. 3** Respuesta de temperatura ante un controlador PI digital (humedad específica constante).

También fue analizada la ecuación para la humedad, pero por razones prácticas, que ya se demostraron, es mejor usar lógica difusa para este efecto. Solo conmutaremos al control PI cuando se desee controlar solo la temperatura. Solo a manera ilustrativa mostraremos el comportamiento de la humedad relativa en la Fig. 4.



**Fig. 4** Respuesta de humedad relativa ante controladores proporcional y proporcional derivativo.

**Algoritmo PI programado en un microcontrolador en tiempo real**

Se inicia con la expresión genérica, con forma de un polinomio en 'z' y aplicando las propiedades respectivas para expresar el polinomio en función de variables que dependen del tiempo discreto.

Entonces tenemos:

$$G_c(z) = K_p + K_i / (1 - z^{-1}) = P(z) / \Delta T(z)$$

Usando la propiedad de diferencias en la transformada inversa Z.

$$P(n) = P(n-1) + (K_p + K_i) \Delta T(n) - K_p \Delta T(n-1) \tag{10}$$

Donde, n es el índice para cuantizar el tiempo como n\*T y T es el intervalo de tiempo para el muestreo.

P(n), ΔT(n) : Variable en el tiempo actual.

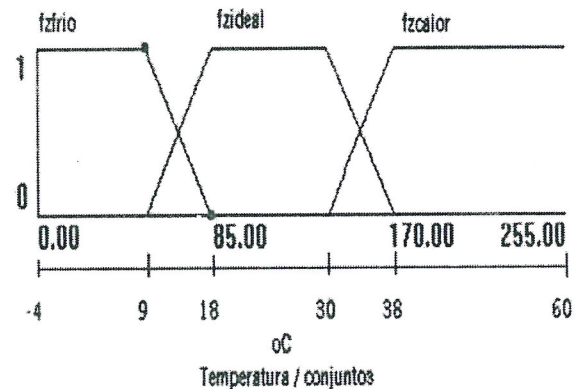
P(n-1), ΔT(n-1) : Variables un instante antes.

Posteriormente se hacen adaptaciones numéricas en función de variables de entradas y salidas.

**Algoritmo difuso**

Difusión (fuzzificación).- Para empezar, definimos 3 funciones de membresía para la temperatura. Solo son necesarios 3 conjuntos, que también son el número mínimo de conjuntos básicos [21] para un control adecuado.

Los límites de los conjuntos son valores promedio, para poder aplicar a la mayor cantidad de cultivos. Si es necesario un rango específico se replantean los límites ver Fig. 5.



**Fig. 5** Funciones de membresía para temperatura.

Para la variable lingüística humedad, se plantean también tres funciones de membresía como en la Fig. 6.

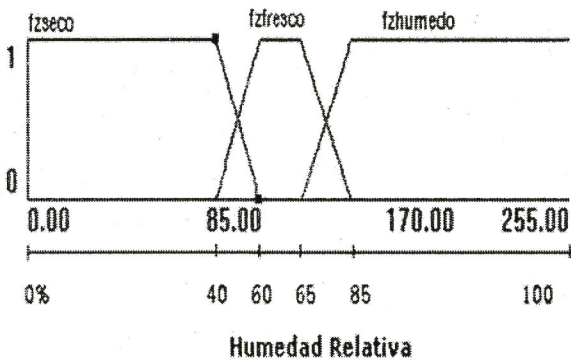


Fig. 6 Funciones de membresía para humedad relativa.

**Reglas base**

Ahora planteamos las reglas base, de acuerdo con lo experimentado, y tratando de prevenir todas las posibles combinaciones para determinar un controlador óptimo. El número máximo de reglas base, se calcula como el producto del número de funciones de membresía para cada variable, como son temperatura y humedad, en este caso 9 reglas. Luego debemos inferir y componer para obtener un subconjunto difuso que exprese el comportamiento del sistema, llamado Enfria\_H. Este subconjunto tiene cuatro (4) funciones de membresía mostradas en la Fig. 7 (se puede aumentar este número para alcanzar precisión). Las funciones de membresía son:

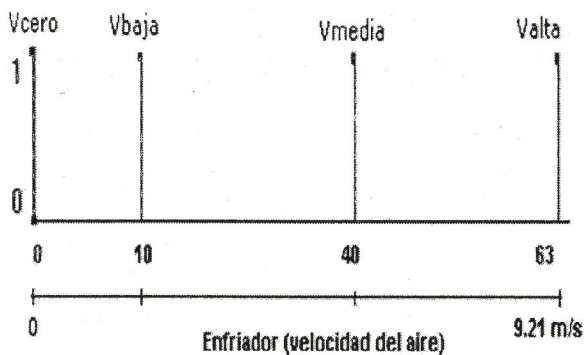


Fig. 7 Funciones de membresía para el actuador (ventilador).

Esta proposición esta basada en que el actuador es un ventilador con velocidad controlable y un intercambiador de calor, (usando agua como refrigerante), que a su vez depende de esta. Lo que nos lleva a crear un subconjunto difuso para activar

la bomba de agua. El subconjunto Bomba es básicamente un conjunto binario por lo que tendrá dos funciones de membresía:

- OfzOFFbom (bomba apagada)
- OfzONbom (bomba activa)

Las reglas son 9 y podemos resumir generando la Tabla 1:

Tabla 1. Tabla de inferencia.

Temperatura	Fzfrio	Fzideal	Fzcalor
Fzseco	Vcero	Vbaja	Valta
Fzfresco	Vcero	Vcero	Vmedia
Fzhumedo	Vbaja	Vbaja	Valta

Usaremos MIN(X,Y) para operar el condicional 'SI' (inferencia), la función MAX(X,Y) para operar y reducir los múltiples valores para una misma función de membresía (composición).

Concreción (desfuzzificación).- Para trasladar, los valores difusos a valores eléctricos y estos a su vez en energía, debemos concretar usando uno de los métodos conocidos, y para esto, hemos asignado un tipo a las funciones de membresía del subconjunto de salida Enfria\_H.

Simulación.- Para simular un sistema difuso debemos conocer la función de transferencia de temperatura y humedad relativa.

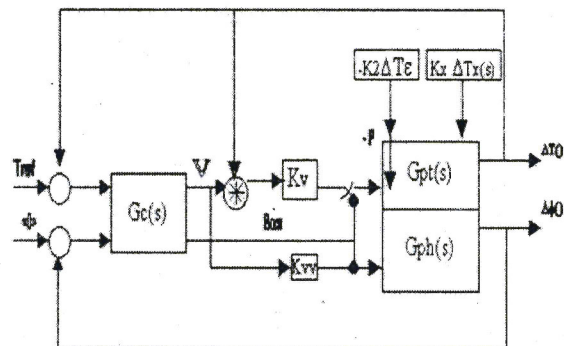


Fig. 8 Control de temperatura y humedad relativa de lazo cerrado para un invernadero.

La Fig. 8, representa la aproximación para el sistema multivariable acoplado para un invernadero. Como explicamos para el diseño de sistemas de control multivariable no debe existir

interacción entre variables y si insensitividad a las perturbaciones, condiciones que no cumple este sistema. Para encontrar las funciones de transferencia primero se asumió no-interacción de variables y perturbaciones predecibles, luego se interrelacionó hasta donde se pudo para simular el sistema real en MATLAB. La Fig. 9 y 10, muestran los resultados de esta simulación.

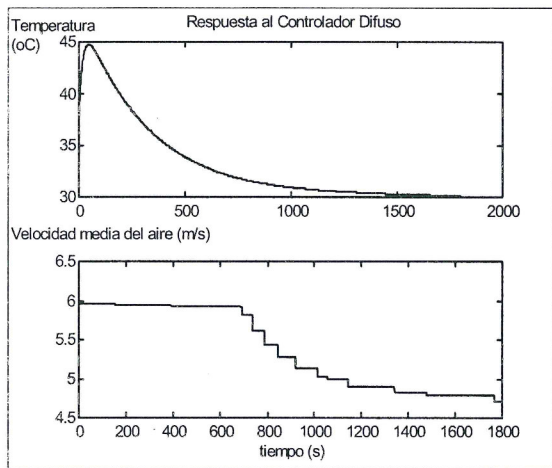


Fig. 9 Temperatura y velocidad de aire del ventilador en el recinto usando un controlador difuso.

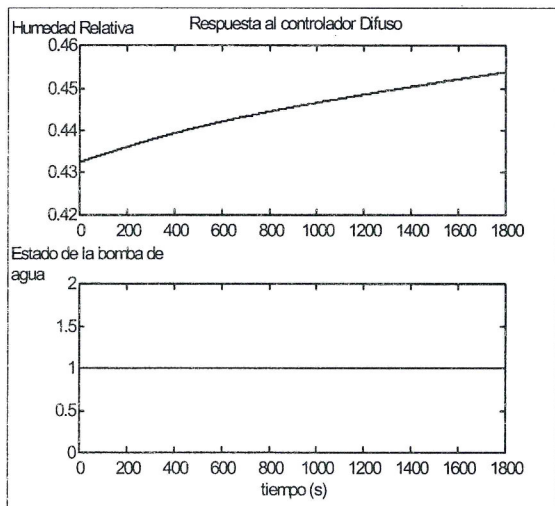


Fig. 10 Humedad relativa y estado de la bomba de agua en el recinto usando un controlador difuso.

Algoritmo difuso programado en un microcontrolador en tiempo real.- Para programar el algoritmo Difuso, no es necesario muchas adaptaciones numéricas y tampoco multiplicaciones y divisiones donde el tiempo de operación es

variable y llenos de lazos, pero sí existe bastante código y tablas por escribir, pero es de fácil entendimiento. Ponemos como ejemplo de inferencia y composición.

$$V_{baja} = \max(\max(\max(\min(Fz_{frio}, Fz_{fresco}), \min(Fz_{frio}, Fz_{humedo})), \min(Fz_{ideal}, Fz_{seco})), \min(Fz_{ideal}, Fz_{fresco}))$$

Para programar el microcontrolador [3], es conveniente usar el método de cálculo del Centro de Gravedad [13] como en la ecuación (11). Para esto es necesario asumir el conjunto singleton, para cada función de membresía y dar un valor unitario de acuerdo a la Fig. 7.

$$PWM = \frac{zV_{max} * 63 + ofzV_{media} * 40 + fzV_{poco} * 10}{(ofzV_{nada} + ofzV_{poco} + ofzV_{media} + ofzV_{max})} \quad (11)$$

La lógica es descrita en la Fig. 11.

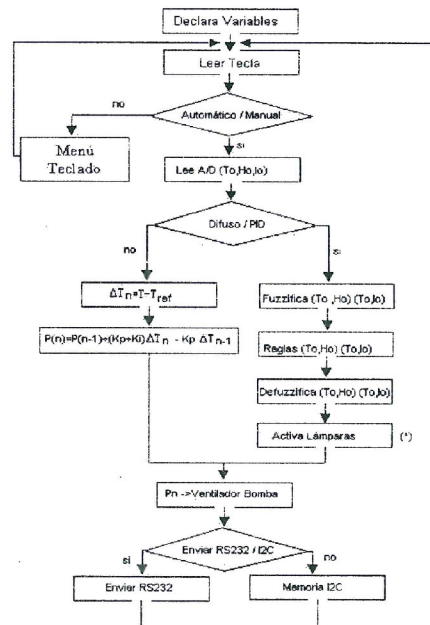


Fig. 11 Diagrama de flujo del programa principal.

### EQUIPO ELECTROMECANICO DE CONTROL

#### Circuitos electrónicos [11]

Circuito para interfase con el microcontrolador.-El diseño de la tarjeta principal, [2] dependió del UC controlador [3] seleccionado en este caso el

PIC16F877, que consta de 40 pines y trabajaremos con cristal de 20 Mhz. A su vez hemos usado todas sus características e instalado las siguientes partes:

1. Conector de 10 pines para sensores.
2. Conectores de 6 pines hacia los opto acopladores de AC.
3. Conectores de 14 pines para LCD.
4. Conector de 8 pines para teclado de 16 teclas.
5. Interfaz para RS232, para comunicación asíncrona [15].
6. Memoria serie I2C.

Circuito para la fuente de alimentación.- La fuente de 5 voltios DC y 3 A, es empleada para los circuitos digitales. La fuente de 6,3 voltios DC, es empleada para los circuitos adaptadores de los sensores [10]. La fuente regulada de 12v y baja potencia para el ventilador extractor de la fuente, dos ventiladores para los sensores de humedad.

Circuito para adaptación de sensores.- El circuito integrado LM335, es un sensor de temperatura preciso aunque no cuenta con buena resolución y velocidad [1] es fácil su adaptación y sobre todo, es lineal.

$$V_o = \frac{R_7 V_{cc}}{R_5} [V(Lm335) - V_{zener} (DZ27)] \quad (12)$$

Donde el voltaje de referencia  $V_{zener}$ , está dado por el diodo LM336, en la ecuación (12). El rango de voltaje de  $V_o$  debe ser de 0 a 5 voltios. Y el rango de temperaturas será de 269oK a 333oC, es decir de -4 oC a 60 oC. Podremos aumentar la resolución a 10 bits, de acuerdo como se comporte el sensor LM335.

Un sensor de temperatura, también podemos usarlo como sensor de humedad relativa mediante algunas adaptaciones [1] y transformaciones en tablas en el microcontrolador. La velocidad relativa entre el termómetro de bulbo húmedo y la mezcla aire vapor, debe estar comprendida entre 30 y 60 m/min.

Para los sensores de Iluminación se usó el transductor o resistencia llamada LDR (Resistor Dependiente de Luz), que miden la iluminación y esta hecha de Sulfuro de Cadmio que absorbe la luz con una longitud de onda de hasta 680nm, es decir, que a mayor iluminación menor resistencia presenta, como se muestra en la Ecuación 13.

$$R = A L^{-\alpha} \quad (13)$$

Donde R, es resistencia en ohmios, L es Iluminación en Lux, A y  $\alpha$  son constantes.

Para lograr buena resolución del convertidor A/D del microcontrolador es preferible entregarle una respuesta lo más lineal. La tarjeta con los circuitos para adaptar los sensores prepara los valores para los niveles de voltaje de los 8 A/D del microcontrolador que están entre 0 y 5v provenientes de los transductores de Temperatura (4), Humedad (2) e Iluminación (2) que están ubicados dentro del invernadero.

Circuito de interfase entre el UC y etapa de 220vac.- La idea de usar acopladores [16] es aislar la etapa digital y la de potencia para proteger al microcontrolador y, también al usuario u operador reduciendo al mínimo el contacto. Se encienden las luces, ventiladores (enfriador), bomba de agua, extractores de aire.

Protección del equipo electrónico.- La especificación se realiza con las letras IP (International Protection) y dos dígitos o tres dígitos, en el caso de un invernadero: IP 2 3 5.

El equipo cumple con este requerimiento como se muestra en la Fig. 12.



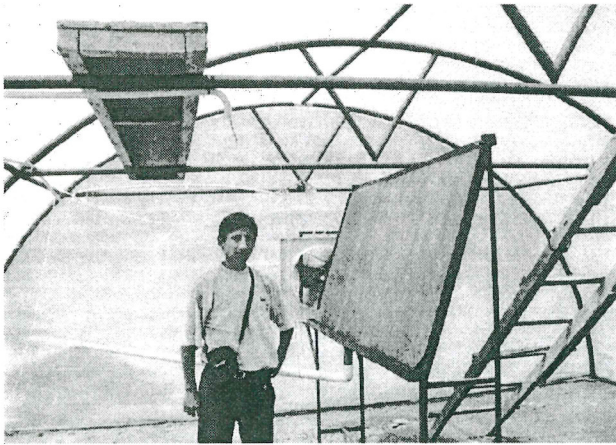
Fig. 12 Fotografía de la caja metálica del equipo de control.

### Actuadores

Enfriador humidificador.- El sistema diseñado es simple ecológico [22] y eficiente pero tiene un comportamiento físico complejo [4], consta de un panel metálico, un ventilador, bomba de agua y



tanque. En la Fig. 13, se muestra el actuador trabajando.



**Fig. 13** Fotografía con el sistema instalado y funcionando.

El panel metálico se encarga de distribuir el agua en forma laminar y permitir la transferencia de calor eficientemente [6], además de generar evaporación.

Mostramos el resumen de los cálculos en la Tabla 2, para la potencia de extracción de calor manejada debe estar entre 200 y 500 watts, y nosotros necesitamos como mínimo 150 watts para el invernadero de 50 m<sup>2</sup>, en invierno y sin objetos dentro. El Ventilador Axial [10] tipo placa, permite transferir calor del panel al agua por convección forzada y del aire al panel, de lo contrario el sistema del enfriamiento sería muy lento. Variaremos la velocidad mediante supresión de ciclos en AC para controlar la velocidad media del ventilador, y como vemos en la Tabla 2, el número de Reynold no supera los 10<sup>5</sup>, por lo que podemos considerar todavía régimen laminar y el correspondiente [6, 8].

Iluminador calefactor.- Este actuador tiene dos objetivos:

Primero es suministrar la cantidad necesaria de luz a los cultivos, cuando en el día no exista la cantidad suficiente de luz, o en la noche para acelerar los biorritmos con lapsos más cortos de luz y penumbra.

El segundo punto es dotar de energía calorífica cuando el invernadero no pueda almacenar la energía necesaria para mantener a la temperatura

mínima permitida en los cultivos. Dotar de energía calorífica, cuando el invernadero lo necesite, es una tarea menos complicada que enfriar, ya que no solo se reducen los factores perturbadores, sino también, se reducen la cantidad de elementos para el actuador y los cálculos realizados. En oposición, aumenta el costo de la energía usada.

**Tabla 2.** Potencia de extracción de calor con un panel de 2 m largo, 1 m de alto con 0,5 m con superficie efectiva o de contacto.

Tf del aire oC	Tc H2O O*	Pabs.C.F . H2O	Re	Pabs.c.f.a .1 cara	Pabs.c.f.a 2caras
20	15	9,672	856175,299	35,693	71,386
25	17	17,325	830264,005	57,079	114,158
30	21	19,986	805875,000	64,196	128,391
35	23	28,564	782402,913	85,719	171,438
40	24	46,681	760259,434	114,476	228,952
45	25	62,101	738699,513	142,806	285,612
50	25	82,653	718328,691	178,191	356,381
55	26	99,540	698483,207	206,248	412,496
60	26	121,644	679704,797	241,334	482,668

El conjunto iluminador calefactor, aquí expuesto, consta de:

- Lámparas incandescentes (bombillas eléctricas)
- Lámparas fluorescentes. (opcional)
- Ventilador.

- a) Lámparas incandescentes (bombillas eléctricas).- La energía radiante contiene bastantes longitudes de onda visible, las comprendidas entre 400 um y 700 um, de modo que el cuerpo parece casi rojo blanco. A la temperatura de 500° C emite aproximadamente 0,54 w por cada centímetro cuadrado, y a 1000° C irradia alrededor de 4 w/cm<sup>2</sup>. La potencia radiante que luego se transforma en potencia calorífica es aproximadamente el 80% de la potencia eléctrica que se suministra a la lámpara incandescente, el resto es flujo luminoso según la ecuación (14).

$$Pq = 0,86 \times Pe \quad (14)$$

Donde,  $P_e$  es potencia eléctrica (generalmente en watts),  $P_q$  es potencia calorífica (si se desea expresar en cal / s dividir entre 4,186),  $P_e$  es potencia eléctrica (generalmente en watts).

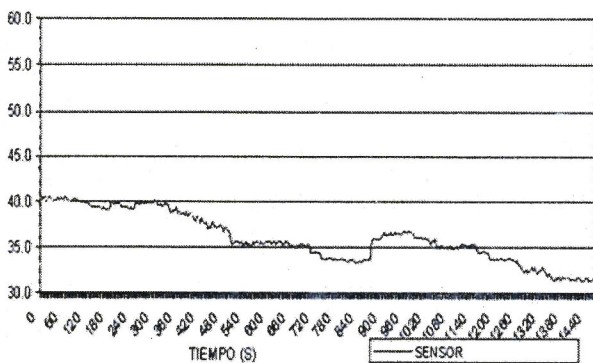
- b) Lámparas fluorescentes.- Una mejora muy importante en la iluminación técnica la proporciona la lámpara fluorescente. La luz ultravioleta es necesaria para el desarrollo de la mayoría de las plantas y cuanto más tiempo o intensidad sean expuestos, mayor será su desarrollo, claro esta si se conserva el ciclo mínimo del biorritmo.

En cuanto a su ubicación, solo necesitamos intercalar estos dos tipos de lámparas (de 100 w de incandescente y 30w fluorescente), si usamos ambos tipos, de acuerdo a los requerimientos de los cultivos y teniendo cuidado en ubicarlos preferentemente en los travesaños principales (evitar las gotas de agua del techo o producto del rocío), lejos de la cubierta (polietileno) y cerca a la superficie de cultivo.

Periféricos del equipo electrónico.- El teclado, es una matriz de 4 x 4, es decir 16 teclas. Para comprobación de operaciones, la pantalla de cristal líquido LCD para observar valores y mensajes, la Bocina, todo esto son una gran ayuda para las etapas de prueba.

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la Fig. 14, se muestra la curva de respuesta de la temperatura promedio dentro del invernadero frente a un controlador difuso.



**Fig. 14** Curva de respuesta de la temperatura promedio dentro del invernadero frente a un controlador difuso.

## CONCLUSIONES

El microcontrolador permite la programación y reprogramar los múltiples algoritmos de control y estos que se activen alternadamente. El límite de complejidad esta en el ingenio del diseñador.

El enfriador humidificador en un ciclo de lazo cerrado tiene la potencia como para bajar 16° C en un volumen de aire de 120 a 130 m<sup>3</sup>, con humedad siempre arriba del 40%, en la ciudad de Lima, por lo tanto, podemos asegurar que en regiones ubicadas en la Sierra de nuestro país se comportará mejor, pues, las condiciones de las que depende el actuador son más favorables.

Para el iluminador calefactor las condiciones no exigen su capacidad máxima. Se logro construir un módulo de 50 m<sup>2</sup>, de costo razonable, buena rigidez, fácil montaje y desmontable. El equipo electrónico resultó de reducido costo y con posibilidades de reproducción y extensión de dispositivos de control, comunicación o almacenamiento. Se diseño y construyo un sistema de enfriamiento ecológico de bajo consumo de energía (1 Hp conmutado cada media hora y que funciona solo en las horas de mayor temperatura). Además el mantenimiento es sencillo. Sería mejor usar otras fuentes de energía como la eólica para mejorar su eficiencia.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Electricidad y Electrónica, de la Universidad Nacional de Ingeniería, por haber financiado este proyecto.

## REFERENCIAS

1. **VARISTORS, THERMISTORS AND SENSORS**, Philips, USA, 1980.
2. **Layout Release 9 User's Guide**, OrCAD Inc, 1998, <http://www.orcad.com>.
3. **Picmicro Mid-Range MCU "Family, 1 Documento DS31029A"**, Microchip Technology Inc., EE.UU, 2001.
4. **Huamán Bustamante, S. G.**, Tesis: "Diseño de Sistema de Control de Temperatura y Humedad Mediante Lógica Difusa para un Invernadero Implementado con el Microcontrolador Motorola Mc68c05" Tesis, FIEE UNI, Lima, Perú, 2003.

5. **Postigo, J., Cruz, J. F.**, "Termodinámica Aplicada", Segunda Edición. W.H. Editores, Lima, Perú.
6. **Krasnoschiokob, E., Sukomiel, A. S.**, "Problemas de Termotransferencia", Editorial MIR 1986, URSS.
7. **Rapin, P. J.**, "Instalaciones Frigoríficas", tomo I, Editorial Marcombo, España, 1976.
8. **Álvarez Ojea, E.**, "Tratado General de Refrigeración", Editorial Bell S. A., 1980.
9. **Coughlin, R., Driscoll, F.**, "Circuitos Integrados Lineales y Amplificadores Operacionales", Editorial Prentice Hall. EE.UU, 1990.
10. **Savant, C. J. Roden, M. S.**, "Diseño Electrónico, Circuitos y Sistemas", Segunda Edición, EE.UU., 1990.
11. **Ogata, K.**, "Sistemas de Control en Tiempo Discreto", Segunda edición Pentice Hall S.A., EE.UU, 1995.
12. **Motorola.** "LONWORKS TECHNOLOGY DEVICE DATA". Rev. 3, Inc., USA, 1997.
13. **Philips.** "ECG Master Replacement GUIDE", 18ª Edición, USA, 1998.
14. **INTERFACING THE SERIAL / RS 232 Port V 5.0**, Manual PDF www.senet.com.au.
15. **Motorola Semiconductor,** 4N35/D, LM324/D, MOC3041/D Technical Data, www.motorola.com
16. **Revista SPUTNIK.**, "Unos Extraños Conocidos a Todo el Mundo", Art., URSS, octubre 1980.
17. **Chang La Rosa, M.**, Artículo "Producción de Forraje y Germinado", Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú, 1995.
18. **Valdivia Benavides, E.**, Art. "Producción de Forraje Verde Hidropónico FVH", Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima, Perú, 1995.
19. **Arq. Sánchez, M.R., Ing. Agr. Colacelli, N. A.**, "En Búsqueda de Invernaderos Eficientes", Art., Universidad Nacional de Tucumán (U.N.T.), 1998.
20. **Brule Tutorial, J.**, "Logic Fuzzy" [http://life.anu.edu.au/complex\\_systems/fuzzy.html](http://life.anu.edu.au/complex_systems/fuzzy.html) 1988.
21. **Festo Didactic** "Introducción a la Electroneumática", Manual de Estudio, USA, 1990.

Correspondencia: [jdelcarpio@uni.edu.pe](mailto:jdelcarpio@uni.edu.pe)

Recepción de originales: diciembre 2005

Aceptación de originales: febrero 2006