

Implementation of a Temperature Control System for the Culture of Aquatic Plants

(Implementación de un Sistema de Control de Temperatura para el Cultivo de Plantas Acuáticas)

Leonardo Fonseca, Juan L. Mata, Jorge Fonseca, Julio Galindo, Juan Buendía and Montserrat Font

Abstract—Temperature control is a variable of interest in healthy growth of aquatic plants, since the absorption of carbon dioxide during photosynthesis depends on this variable. In this work, a temperature control system is exposed and divided into the temperature measurement by a digital temperature sensor and PID temperature controller, tuned with the Ziegler-Nichols method. This system, implemented in an experimental cultivation system of aquatic plants, has produced satisfactory results in plants growth.

Index Terms—Temperature control, aquatic plants, dioxide carbon, photosynthesis, PID, Ziegler-Nichols

I. INTRODUCTION

LAS plantas acuáticas, también llamadas macrofitas constituyen la flora que crece en humedales, especialmente dulceacuícolas. Estas plantas no son algas, sino que pertenecen al grupo vascular, es decir, la mayoría de ellas presentan un cormo con raíz, tallo y hojas, con cuerpo vegetativo [1].

El desarrollo tecnológico actual de procesos acuícolas está enfocado principalmente en el cultivo de peces para consumo humano y en menor medida se dedica al cultivo de plantas acuáticas [2]-[7]. A nivel industrial la tecnología acuícola disponible consiste de maquinaria pesada que está destinada al procesamiento de los peces o plantas para su venta, así como grúas y montacargas para el transporte, sin embargo, los procesos como la alimentación (en el caso de los peces), la ambientación, la crianza y la reproducción están basados en la observación y el criterio del personal, quien se encarga de dar alimento a los peces, de revisar la temperatura y la calidad del agua.

Entre las empresas líderes acuícolas se tienen Stolt Sea Farm® y PARABEL®, en el mercado de peces y plantas

acuáticas respectivamente. Ambas poseen maquinaria destinada al procesamiento de sus productos. No obstante, la mayor parte de los productores son pequeñas empresas que únicamente cuentan con procesos artesanales [8]. En el mercado de plantas ornamentales además de los productores de plantas, hay también servicios de mantenimiento para acuarios plantados, por ejemplo, la empresa danesa Tropica®, que debido a las bajas temperaturas de Dinamarca proporciona el mantenimiento a los sistemas de monitoreo y control para el cuidado de las plantas acuáticas y la empresa líder en mantenimiento Aqua Design Amano®. El equipo de mantenimiento está enfocado en acuarios caseros y deben tener un cuidado constante de parte del usuario. En el ámbito de la investigación, diferentes instituciones desarrollan proyectos, desde genética hasta sistemas de control, e.g., en la Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología a través del Centro de Pesca y Acuicultura se llevan a cabo investigaciones destinadas al modelado, simulación, automatización y control de procesos acuícolas, así como la instrumentación, el sensado y la telemetría bajo el agua [9].

Debido a la falta de inversión tecnológica en el cultivo de plantas acuáticas la mayoría de las plantas que se comercializan son cosechadas directamente de su medio natural, en recipientes a la intemperie o en peceras sin ningún tipo de control automatizado o semiautomatizado. Esto da como resultado que las plantas se encuentren propensas a ser dañadas, ya sea por depredadores naturales, tales como, insectos, caracoles y peces, principalmente, o por la contaminación del agua. Las fechas de cosecha inadecuada también influyen negativamente, puesto que se obtienen plantas inmaduras que no llegan a reproducirse.

Las plantas viven y realizan la fotosíntesis en una gran variedad de hábitats que presentan enormes diferencias en sus regímenes térmicos, a esto hay que añadir las fluctuaciones diarias y anuales del comportamiento de la temperatura en estos hábitats. La temperatura de la planta está estrechamente relacionada con la temperatura ambiental, lo que significa que la fotosíntesis debe enfrentarse con ese amplio rango de temperaturas; por lo que se podrá encontrar actividad fotosintética próxima a 0°C en plantas alpinas, y cercana a los 50°C en algunas especies desérticas. Así, cabe destacar que el rango óptimo abarca de 15 a 30°C para la mayoría de las especies, pero las plantas de sombra y especies que

Este trabajo ha sido financiado por la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional (SIP-IPN) mediante el proyecto SIP20140153.

L. Fonseca, J.L. Mata-Machuca, J. Fonseca, Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas (UPIITA-IPN), México, D.F. (e-mails: jmatam@ipn.mx, lfonseca@ipn.mx, jfonsecac@ipn.mx).

J. Galindo, J. Buendía, M. Font, Alumnos BEIFI, Ingeniería Mecatrónica, UPIITA-IPN, México, D.F. (e-mails: jbuendiar09000@ipn.mx, jgalindoo0900@ipn.mx, mfontm1100@alumno.ipn.mx).

florecen al principio de la primavera tienen un rango óptimo entre 10 y 20°C, mientras que la temperatura en las plantas de sol oscila entre 25 a 35°C. Por su parte, muchas plantas C4, que incluye a las cactáceas, siguen realizando adecuadamente la fotosíntesis a temperaturas superiores a 40°C [10]-[14].

La Fig. 1 muestra las curvas de respuesta de la fotosíntesis a la temperatura, donde se aprecian dos respuestas, para ambientes con suministro natural de CO₂ y la segunda, para ambientes con suministro elevado de CO₂. Ambas respuestas son un modelo basado en el comportamiento de enzimas, sin embargo existe una temperatura óptima para cada tipo de planta.

Esta curva tiene tres puntos característicos:

- T_{opt} : Temperatura óptima en la que la asimilación neta de CO₂ es máxima
- $T_{máx}$: Temperatura máxima en que la fotosíntesis se anula
- $T_{mín}$: Temperatura mínima en que la fotosíntesis se anula

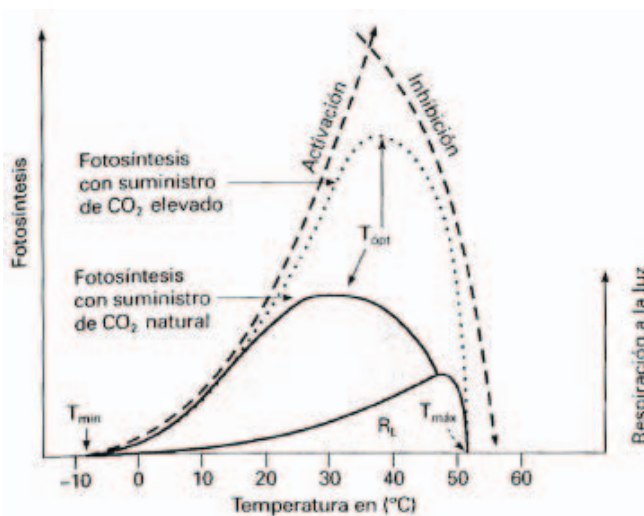


Fig. 1 Respuesta fotosintética a la temperatura a niveles de CO₂ ambiental y elevado.

La contribución principal de este trabajo consiste en el diseño e implementación de un sistema de control que sea capaz de mantener la temperatura en niveles adecuados, dentro de un área específica, para el crecimiento de plantas acuáticas. Las plantas a cultivar son la Vallisneria Spiralis y la Echinodorus Amazonicus, debido a que tienen requerimientos ambientales similares. Las plantas que se encuentren dentro de un espacio controlado, reducen el riesgo de obtener enfermedades o parásitos, que influyen de manera negativa en su crecimiento. Una vez liberadas de éstos factores negativos, las plantas pueden crecer sanas, lo que se aprecia inmediatamente en la apariencia, tallos más gruesos, mayor altura, color más intenso y hojas de mayor tamaño.

II. SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA PARA EL CULTIVO DE PLANTAS ACUÁTICAS

El Sistema de control de temperatura para el cultivo de plantas acuáticas se divide en varias etapas como se muestra en la Fig. 2, la primera etapa es la medición de la temperatura mediante un sensor digital de temperatura, la segunda etapa es la de control de la temperatura mediante un microcontrolador de la marca ATMEL, la tercera es la etapa de potencia del calefactor de 60W y por último una etapa de interfaz para ajustar el valor de referencia y el despliegue de información.

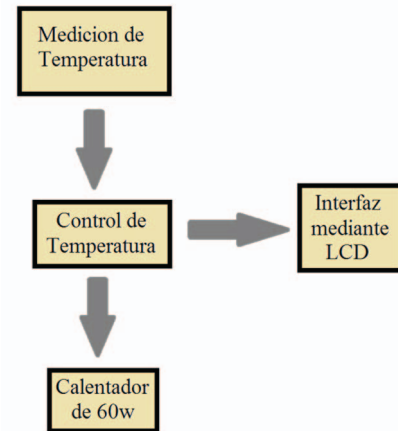


Fig. 2 Etapas del sistema de control de temperatura.

Para medir la temperatura se utilizó el sensor digital DS18B20 de *maxim integrated*. Este sensor utiliza el protocolo *OneWire*, que necesita un único bus de datos para la transferencia de información y puede ser alimentado con la carga parásita del bus de comunicación. La temperatura es enviada en 2 bytes, siendo los primeros cuatro bits los que indican el signo de la medida, los siguientes ocho dan el valor entero, y los últimos cuatro dan el valor decimal. Debido a que es un sensor digital solo necesita una resistencia de pull-up como acondicionamiento, como se observa en la Fig. 3. El sensor está conectado a un microcontrolador ATmega168, y la temperatura es desplegada en una pantalla LCD de 16x2 caracteres.

Conexion Temperatura

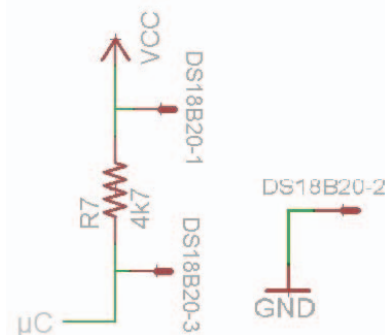


Fig. 3 Diagrama electrónico del sensor de temperatura.

III. IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROL DE TEMPERATURA

Para mantener la temperatura deseada para las plantas acuáticas se implementó un controlador PID digital, las constantes del controlador PID se obtuvieron con el método de sintonización de Ziegler- Nichols. Dicho método obtiene las constantes del controlador a través del modelo de lazo abierto del actuador.

El diagrama mostrado en la Fig. 4 representa el sistema de control de temperatura. El controlador PID se encarga de que la lectura del sensor de temperatura tienda a ser igual a la temperatura deseada. El controlador PID se implementó en el microcontrolador ATmega168, este controlador cambia el ciclo de trabajo de un PWM que activa la etapa de potencia para energizar al calefactor. Además, la temperatura se despliega en una pantalla LCD.

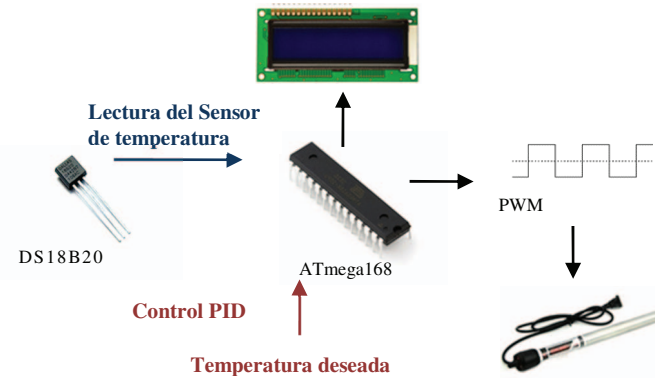


Fig. 4 Diagrama del sistema de control de temperatura.

A. Cálculo de las constantes del controlador PID

Primero se calcula la función de transferencia de lazo abierto del calentador, que sigue el modelo de la ecuación (1).

$$G(s) = \frac{k_0 e^{-s\tau_0}}{1 + \gamma_0 s} \quad (1)$$

donde:

- k_0 = Ganancia
- τ_0 = Retardo del proceso
- γ_0 = Constante de tiempo

Para determinar el modelo de lazo abierto del calentador se obtiene la curva de respuesta al impulso; de esta curva se calculan las constantes del modelo. Una vez graficada la respuesta al impulso se debe trazar la recta de máxima pendiente, que es la tangente al punto de inflexión de la curva, como se puede observar en la Fig. 5.

Las ecuaciones (2) indican la relación de las constantes del modelo de lazo abierto del sistema con la respuesta al impulso.

$$\begin{aligned} \tau_0 &= t_1 - t_0 \\ \gamma_0 &= t_2 - t_1 \\ k_0 &= \frac{(y_1 - y_0)}{(u_1 - u_0)} \end{aligned} \quad (2)$$

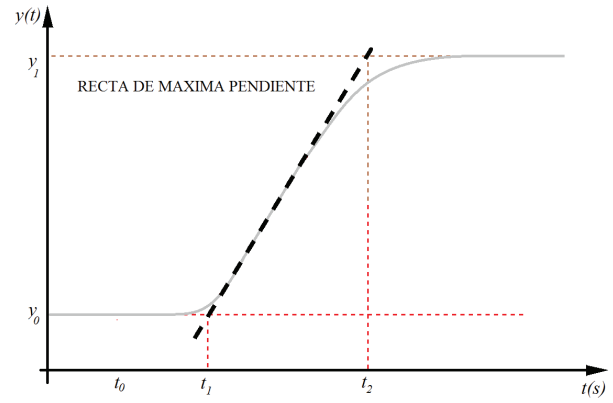


Fig. 5 Respuesta de un sistema de lazo abierto ante un impulso.

De acuerdo a Ziegler-Nichols, las relaciones de estas constantes con los parámetros del controlador son:

$$\begin{aligned} k_p &= 1.2 \frac{\gamma_0}{k_0 \tau_0} \\ T_i &= 2\tau_0 \\ T_d &= 0.5\tau_0 \end{aligned} \quad (3)$$

B. Obtención de la ecuación del controlador.

La ecuación de un controlador PID, para un sistema discreto es definida en la ecuación (4).

$$U(z) = K_p \left[1 + \frac{T}{T_i(1-z^{-1})} + T_d \frac{1-z^{-1}}{T} \right] E(z) \quad (4)$$

donde:

$U(z)$ = Entrada de control.

$E(z)$ = Error de la señal, diferencia entre el valor deseado y el medido.

$\frac{T}{1-z^{-1}}$ = Tiempo de muestreo, debe de ser menor que $\tau_0/4$.

$\frac{1}{1-z^{-1}}$ = Integral en el dominio del tiempo discreto.

$1 - z^{-1}$ = Derivada en el dominio del tiempo discreto.

Para condiciones iniciales son cero, la ecuación (4) se reduce a:

$$U(z) = K_p \left[1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T} \right] E(z) \quad (5)$$

Para fines prácticos al momento de programar, la ecuación (5) se simplifica de la siguiente manera:

$$U(z) = E(z)[a + b + c] \quad (6)$$

con:

$$\begin{aligned} a &= K_p \\ b &= \frac{K_p T}{T_i} \\ c &= \frac{K_p T_d}{T} \end{aligned} \quad (7)$$

C. Obtención de la ecuación de control del sistema

Para este sistema se utilizó como actuador un calefactor sumergible de 60 W, la Fig. 6 muestra la curva experimental de respuesta al escalón.

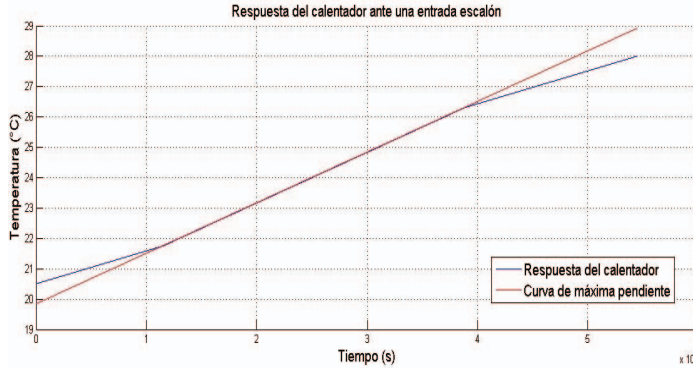


Fig. 6 Respuesta del sistema ante una entrada escalón a lazo abierto.

A partir de la Fig. 6 se obtienen las constantes:

$$\begin{aligned}\tau_0 &= 1570 - 0 = 1570 \\ \gamma_0 &= 45670 - 15670 = 30000 \\ k_0 &= \frac{28-20.5}{5-0} = 1.5\end{aligned}\quad (8)$$

Por lo que el modelo del sistema de calefacción, a lazo abierto, quedó definido con la ecuación (9).

$$G(s) = 1.5 \frac{e^{-15670s}}{1+30000s} \quad (9)$$

Retomando el método de sintonización de Ziegler – Nichols, se calculan las constantes del controlador PID para este sistema.

$$\begin{aligned}k_p &= 1.2 \frac{\gamma_0}{k_0 \tau_0} = 1.2 \frac{30000}{(1.5)(15670)} = 0.4179 \\ T_i &= 2(15670) = 31340 \\ T_d &= 0.5(31340) = 7835\end{aligned}\quad (10)$$

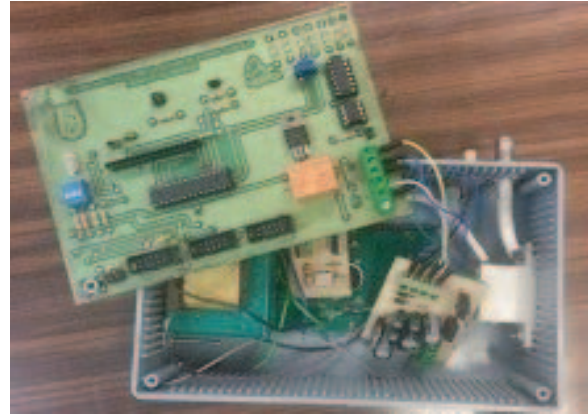
Sustituyendo las constantes calculadas se obtiene la ecuación de control, que se expresa en la ecuación (12). Para el controlador el error E, se define como la diferencia entre la temperatura deseada y la medida.

$$U(t) = E(a + b + c) \quad (12)$$

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

El controlador cambia el ciclo de trabajo de un PWM que posteriormente activará una etapa de potencia. Esta última etapa es la encargada de energizar un calefactor de agua de 60 W. El programa de medición y control de temperatura fue cargado en una tarjeta de desarrollo, que cuenta con un microcontrolador ATmega168 y puertos de entrada/salida, así como resistencias de pull-up. Se le conectaron a la tarjeta el

sensor de temperatura, que fue aislado del agua con silicón y recubierto con tubo termo contráctil, una pantalla LCD de 16x2 caracteres para mostrar la temperatura, y una placa de potencia. La placa de potencia es conectada al pin del PWM, cuyo ciclo de trabajo es controlado por el PID. Esta placa consiste en un opto acoplador, para aislar la corriente alterna del resto del circuito, que activa un TRIAC, con lo que se regula el voltaje RMS que llega al calefactor. En Fig. 7 (a) se observa la placa de desarrollo a la izquierda, y se presenta la etapa de potencia a la derecha. En la Fig. 7 (b) se puede ver el módulo que contiene el sistema, con su LCD, conexión de corriente alterna, conexión de sensor y la conexión para la alimentación del calefactor.



(a)



(b)

Fig. 7: (a) Módulo abierto, con ambas placas a la vista; (b) Módulo cerrado.

El sistema se probó con dos tipos de plantas, la Vallisneria Spiralis y la Echinodorus Amazonicus, ambas colocadas en el mismo ambiente controlado; además de la temperatura se controlaba la iluminación y el nivel de dióxido de carbono. Después de estar 10 días en el ambiente controlado, las plantas presentaron un crecimiento considerable y notorio, tal como se ve en la Fig. 8.

En la Fig. 9 se muestra el módulo de temperatura terminado, el cual cuenta con LCD para visualizar el estado de temperatura, entrada BNC del electrodo, entrada del sensor de temperatura, salida a la electroválvula, alimentación de corriente alterna para la salida al calefactor.



(a)



(b)

Fig. 8: (a) Plantas al inicio de las pruebas, (b) Plantas 10 días después de coexistir sistema.



Fig. 9. Módulo de visualización de la temperatura

V. CONCLUSIONES

Se diseñó e implementó un sistema de control que es capaz de mantener la temperatura deseada para ambientes acuáticos, y como se puede ver en Fig. 8 favoreció el crecimiento de las plantas, especialmente la *Vallisneria spiralis*; cabe destacar que no solo se afectó el crecimiento, sino que las plantas adquirieron una tonalidad verde más intensa. Aunque el sistema se diseñó para plantas acuáticas, se puede reprogramar para actuar en otras áreas. También es factible una reproducción y escalamiento para satisfacer diferentes volúmenes de agua ya que el sistema permite el cultivo y la cosecha de plantas ornamentales fácilmente, con pocos elementos consumibles y con proyecciones a futuro en el contexto de investigación y económico. Se considera como proyección a futuro la inclusión de peces en el sistema, pues aportarían una fuente constante de dióxido de carbono, además de que sus desechos generarían nutrientes. Por último se plantea ampliar el tamaño del tanque para aumentar la producción de plantas y promover la comercialización, tanto de plantas como musgos.

REFERENCIAS

- [1] T. Pillay, M. Kutty. *Aquaculture: principles and practices*. Blackwell publishing, 2005.
- [2] P. O'reilly, J. Wright. "The evolving technology of DNA fingerprinting and its application to fisheries and aquaculture." *Journal of Fish Biology* 47 (1995): 29-55.
- [3] P.G. Lee. "A review of automated control systems for aquaculture and design criteria for their implementation." *Aquacultural Engineering* 14 (1995): 205-227.
- [4] J. Balchen. "Thirty years of research on the application of cybernetic methods in fisheries and aquaculture technology." *Modeling, Identification and Control* 21 (2000): 3-64.
- [5] C. Martins, E. Eding, M. Verdegem, L. Heinsbroek, O. Schneider, J. Blancheton, J. Verreth. "New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability." *Aquacultural Engineering* 43 (2010): 83-93.
- [6] J. Mathiassen, E. Misimi, M. Bondø, E. Veliyulin, S. Østvik. "Trends in application of imaging technologies to inspection of fish and fish products." *Trends in food science & technology* 22(2011), 257-275.
- [7] C. Meske, V. Frederick. *Fish aquaculture: technology and experiments*. Elsevier, 2014.
- [8] J. Balchen. "Automation in fisheries and aquaculture technology," In H. Unbehauen (ed), *Encyclopedia of Life Support Systems*. EOLSS, chapter Control Systems, Robotics and Automation Vol. XIX, Eolss Publishers, Oxford, UK, URL <http://www.eolss.net>.
- [9] J. Lucas, P. Southgate. *Aquaculture: Farming aquatic animals and plants*. John Wiley & Sons, 2012.
- [10] J. A. Bieto, M.T. Cubillo, I.B. Mangas, A.G. Ormaeche. *Fundamentos de fisiología vegetal*. McGraw-Hill Interamericana de España, 2008.
- [11] L. M. Melgarejo (Ed) *Experimentos en fisiología vegetal*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. ISBN 9789587196689, 2010.
- [12] G. Bowes, "Single-cell C4 photosynthesis in aquatic plants." In *C4 photosynthesis and related CO2 concentrating mechanisms*. Springer Netherlands, 63-80, 2011.
- [13] P. G. Falkowski, J. A. Raven. *Aquatic photosynthesis*. Princeton University Press, 2013.
- [14] A. H. Fitter, R. Hay. *Environmental physiology of plants*. Academic press, 2012.