

PI based on events the control of fruiting chamber for the cultivation of mushroom fungus *Pleurotus ostreatus* ??

First A. Alejandro Rojas Centeno *
Second B. José Fermí Guerrero Castellanos **
Third C. José Octavio Estevez Espinoza ??

* *Universidad Tecnológica Bilingüe Internacional y Sustentable de Puebla, Ciudad Modelo Blvd. Audi Sur S/N, 75010 Pue. (e-mail: @utbispuebla.edu.mx).*

** *Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Av San Claudio s/n, Cd Universitaria, Facultad de Ciencias de la electrónica, 72592 Puebla, Pue. (e-mail: author@lamar.colostate.edu)*

Resumen

The following work presents experimental results and the validation by means of mathematical models for the application of an PI based on events/networks for the control of a fruiting chamber in the cultivation of mushroom (*Pleurotus Ostreatus*). The results show significant changes in the growth of the fungus, when it is in an environment of ideal and controlled conditions.

Keywords: Event-based control, Modeling, Sensor networks

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la humanidad enfrenta diferentes crisis globales, ecológicas, económicas, de salud y alimentarias, las cuales se caracterizan por el decrecimiento económico, un aumento considerable hasta del 65% en los precios de los alimentos y las materias primas, así como los efectos del cambio climático. En México, esto ha repercutido en la seguridad alimentaria de la población, en su derecho a tener acceso a alimentos sanos y nutritivos, así como a una alimentación balanceada y diversa (Mayett and Martínez-Carrera, 2019). Los hongos comestibles son una buena alternativa para contender con estas crisis al ser un sistema de producción-consumo, presenta procesos biotecnológicos aplicados que pueden desarrollarse a pequeña y gran escala para producir: 1.- Alimento humano de buena calidad nutritiva y con propiedades medicinales, 2.- suplementos dietéticos y 3.- Enzimas y productos metabólicos de importancia industrial (Martínez-Carrera et al., 2004) (Mora and Martínez-Carrera, 2007). Con un alto contenido de aminoácidos esenciales, minerales, vitaminas del complejo B y provitamina D, así como fibra cruda y con un contenido relativamente bajo en grasa, demostrando propiedades anticancerígenas, antibióticas, antioxidantes, antitromboticas, antidiabéticas que disminuyen los niveles de colesterol y la hipertensión (Wasser, 2002). Esas propiedades son únicas y diferentes a las que se pueden obtener de otros alimentos que son principalmente consumidos, debido a que los hongos pertenecen al

reino Fungi que presenta características propias, además de que tienen una gran tradición cultural sobre todo en nuestro país como lo sugiere Mayett en 2019. En México, el cultivo y aprovechamiento de hongos comestibles se ha venido promoviendo por más de 70 años en pequeña y gran escala, principalmente en las variedades de Champiñón *Agaricus*, Setas *Pleurotus* y shiitake *Lentinula*. Su valor económico representa 200 millones de dólares anuales (Mora and Martínez-Carrera, 2007). Sin embargo, el cultivo del hongo requiere de condiciones específicas para su desarrollo, de tal forma que sus características nutricionales puedan ser alcanzadas. Para ello es necesario tener espacios controlados, donde las variables en cuestión puedan ser monitorizadas y el ambiente pueda ser controlado. Esto se lleva a cabo generalmente en invernaderos. Un problema interesante y que ha sido abordado es el control de los invernaderos considerándolos un sistemas ciber-físico.

Un sistema ciber-físico conocido como CPS (por sus siglas en inglés *cyber-physical system*), es la integración de elementos y procesos computacionales con procesos físicos. Dichos sistemas se caracterizan por ser conformados por sistemas embebidos, redes de comunicación y algoritmos de control, en los que los lazos de retroalimentación son afectados tanto por procesos físicos como por procesos computacionales. Para los CPS, el uso de plataformas y redes digitales emerge como una tendencia obvia para ahorrar espacio, peso y energía. Sin embargo, las implementaciones digitales pueden dar lugar a problemas

adicionales, como la determinación de la frecuencia con la que necesita ser actualizada la señal de control que garantice la estabilidad del sistema en lazo cerrado.

Problemáticas como las antes mencionadas han impulsado el desarrollo de nuevas alternativas como los algoritmos de control basados en red (Networked Control Systems), llegando a convertirse en los últimos tiempos en un tema de gran interés al rededor de la comunidad científica. La principal motivación de los sistemas de control mediante red es que en la práctica los elementos que conforma un sistema (planta física, controlador, sensores y actuadores) difícilmente se encuentran en el mismo lugar. En los sistemas modernos, estos componentes están a menudo conectados a través de redes de comunicación, ver Gao et al. (2008); Chow and Tipsuwan (2001); Park et al. (2002). Mientras que en el enfoque clásico la señal de control se calcula en base al tiempo y es actualizado en periodos fijos de tiempo (independientemente de si realmente se requiere o no), en el paradigma *de control disparado por eventos* también llamado control *asíncrono* la señal de control se calcula y actualiza solamente cuando un evento ocurre, *e.g.* cuando la dinámica del sistema controlado varía considerablemente. Se ha demostrado en algunos trabajos y en particular en Åström and Bernhardsson (2002) que el desempeño del sistema en lazo cerrado no se ve comprometido a pesar de que la señal de control sea actualizada de forma asíncrona. En el control disparado por eventos, los mecanismos típicos de detección de evento, son funciones de la variación del estado del sistema (o al menos la salida), como en Årzén (1999); Durand and Marchand (2009); Sandee et al. (2005); Sánchez et al. (2009); Åström and Bernhardsson (2002); Heemels et al. (2009); Lunze and Lehmann (2010); Eqtami et al. (2010); Durand (2013). Por su parte la estabilización de los sistemas lineales y no lineales se ha analizado en Velasco et al. (2009); Tabuada (2007); Marchand et al. (2013); Durand et al. (2014), donde los eventos están relacionados con la variación de una función Lyapunov o la derivada del tiempo de la función de Lyapunov. Aunque el control basado en eventos está bien motivado, y muchos trabajos reportan resultados teóricos (acerca de la estabilidad, la convergencia y el rendimiento), sólo pocos trabajos han reportado sobre aplicaciones prácticas, Guerrero-Castellanos et al. (2013).

2. PROPUESTA DE CONTROL

En la siguiente figura Fig. 1 se muestra la propuesta de control para el óptimo desempeño de la cámara de fructificación, donde se tienen 2 referencias (temperatura y humedad), un dispositivo de comparación que estará midiendo el error en el sistema, un controlador PI por eventos, y los actuadores principales que estarán regulando el microclima del invernadero a través de nebulización y un sistema de calefacción .

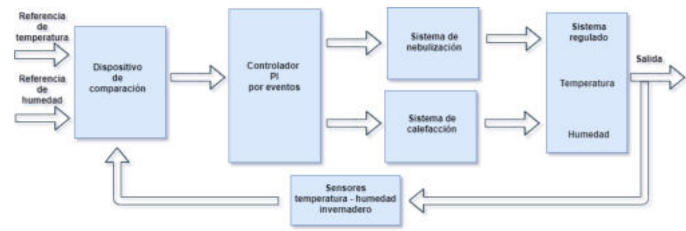


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema de control en cámara

3. ESTRATEGIAS DE CONTROL PID

En esta sección primeramente se habla de la estrategia de control basada en tiempo y su implementación en computadora. Después son presentadas las estrategias de control PID basado en eventos.

3.1 Estrategia de control PID basado en tiempo

Esta estrategia ha sido ampliamente estudiada, por lo que existe una teoría bien definida. Por ejemplo, se propone la siguiente ecuación:

$$u(t) = k_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (1)$$

Donde y es la variable del proceso medido, r ó y_{sp} es la referencia de la variable, u es la señal de control y e es el error de control ($e = r - y$). La variable de referencia es a menudo llamada señal de referencia (set point). La señal de control es así una suma de los tres términos: el término P (es proporcional al error), el término I (es proporcional a la integral del error), y el término D (es proporcional a la derivada del error). Los parámetros del controlador son proporcionales a la ganancia k_p , tiempo integral T_i , y tiempo derivativo T_d . La parte integral pueden ser interpretada como acción de control basada en el pasado. La parte derivativa puede ser interpretada como predicción.

Implementación en computadora: La estrategia de control basada en tiempo es implementada en computadora (?) utilizando la ecuación 2, donde en cada periodo h_{nom} se actualizará la señal de control.

La señal v implementada en computadora, es la suma de los términos proporcional, integral y derivativo, la salida del controlador es $u = sat(v)$, donde sat es la función de saturación que modela el actuador. La implementación del término proporcional $k_p(\beta(r - y))$ es simple, solo se rempazan las variables continuas con su versión muestreada. Por lo tanto:

$$P(t_k) = k_p(\beta(r(t_k) - y(t_k))) \quad (2)$$

Donde t_k denota el instante de muestreo que es el tiempo donde la computadora lee una entrada. El operador da h_{nom} que representa el periodo de muestreo, así

que $t_{k+1} = t_k + h_{nom}$. El término integral es obtenido aproximando la integral con la suma.

$$I(t_{k+1}) = I(t_k) + k_i h_{nom} e(t_k) + \frac{h_{nom}}{T_t} (sat(v) - v) \quad (3)$$

Donde $T_t = h_{nom}/k_t$ representa el término anti-wind-up. El término de derivada filtrada D está dado por la ecuación en diferencias:

$$D(t_k) = \frac{T_f}{T_f + h_{nom}} D(t_k - 1) - \frac{k_d}{T_f + h_{nom}} (y(t_k) - y(t_k - 1)) \quad (4)$$

3.2 Estrategias de control PID basado en eventos

En este apartado se muestran las más emblemáticas estrategias de control PID y PI basado en eventos que han sido propuestas en la literatura.

Control PID basado en eventos propuesto por Árzén:

La decisión de calcular una nueva señal de control es tomada cuando se cruza cierto nivel. El controlador propuesto en (?) se basa en dividir el controlador en dos partes: 1) la lógica de detección de eventos y 2) la lógica de control. El detector de eventos se ocupa de indicar a la lógica de control que debe producir una acción de control debido a que se dan las circunstancias adecuadas, es decir cuando se cruza el nivel propuesto. La lógica de detección de eventos es síncrona y está sujeta a un periodo de muestreo nominal de forma que cada h_{nom} se examina si se cumplen las condiciones necesarias para activar la lógica de control. Las dos condiciones de activación del control PID basado en eventos de Árzén son las siguientes:

$$|e(t_a) - e(t_a - 1)| \geq q_{nom} \quad \text{ó} \quad (t_k - t_{k-1}) \geq h_{max} \quad (5)$$

Las condiciones anteriores expresan que el cálculo de una nueva acción de control puede producirse ante dos situaciones: por error o por tiempo. La primera de las condiciones analiza si el valor absoluto de la diferencia entre el valor actual del error $e(t_a)$, y el valor del error en que se disparó el cálculo de la última acción de control $e(t_a - 1)$, supera un umbral q_{nom} , esta condición es llamada *condición relativa*. La segunda condición es una medida de seguridad que obliga a producir una nueva acción de control cuando el tiempo transcurrido desde que se calculó la última, supera un límite h_{max} . En el trabajo de Árzén, si se cambia la señal de referencia después de un periodo de estado estacionario largo, aparecerán importantes sobre tiros. La parte integral de la ecuación 6 del controlador PID basado en eventos, es responsable de estos sobre tiros. Donde t_a es el instante actual donde se detectó un evento, t_{a-1} es el instante anterior donde se detectó un evento.

$$u_i(t_a) = u_i(t_{a-1}) + K_i \cdot h(t_a) \cdot e(t_a) \quad (6)$$

Después de esperar a un evento durante mucho tiempo, el valor de $h(\cdot)$ se va haciendo muy grande (?). Mientras no ocurre un evento $u_i(t_a)$ crece desmedidamente, el valor de $e(\cdot)$ aumenta drásticamente y así termina el estado estacionario. El cálculo de la parte integral necesita del producto $he(\cdot)$, que es llamado *ganancia integral*, este producto explota al final del intervalo del estado estacionario. El estado estacionario se puede dividir en dos partes (ver Fig.2) que son: i) el intervalo de tiempo donde la señal está realmente en estado estacionario y ii) el intervalo de tiempo requerido para detectar un nuevo cruce de nivel. La primera parte inicia después del cálculo de la última señal de control, es en el instante de muestreo t_{a-1} y termina justamente después de que la señal de referencia cambia.

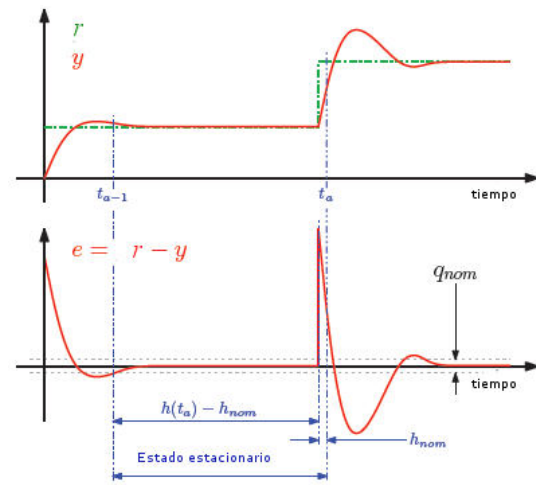


Figura 2. Descomposición de un intervalo de estado estacionario(Durand (2013)).

Nuevas estrategias de control

El trabajo original de Árzén tiene un periodo máximo de seguridad h_{max} que fuerza el cálculo de la señal de control, si la señal medida permanece sin cambios; esta condición parece haber sido agregada por razones de inestabilidad, para que se cumpla la condición del teorema de muestreo de Nyquist-Shanon. Sin embargo con estas nuevas estrategias se propone remover el límite de periodo máximo de seguridad gracias a la detección de nivel, ya que la condición de muestreo de Nyquist-Shannon no tiene sentido en este nuevo paradigma. En (?) se muestran los resultados experimentales de estas estrategias basadas en eventos. En esta sección se estudian cuatro de las estrategias de control PID basado en eventos que evitan volver a calcular la señal de control.

En estas estrategias se sustituye la condición relativa propuesta por Árzén por la absoluta $abs(e(t_a)) > q_{nom}$, donde una nueva señal de control es calculada tan pronto como el error actual cruza el nivel q_{nom} . Con este método el número de muestreos aumenta inevitablemente durante los transitorios, pero el error entre el sistema y la referencia seguramente es menor que q_{nom} durante el periodo de

estado estacionario. Este método es requerido por controladores basados en eventos sin condición límite de seguridad h_{max} , para asegurar que un estado estacionario es realmente activado antes de decidir no actualizar la señal de control mientras la referencia no cambia, o no ocurre una perturbación. Como un resultado, la señal medida y tiene que rastrear la referencia esperada r durante el intervalo de estado estacionario, que significa un pequeño error (y no un pequeño error relativo, dado que el error relativo podría ser pequeño, $abs(e(t_a) - e(t_{a-1})) > q_{nom}$, mientras el sistema esté lejos de la referencia).

Estas estrategias basadas en eventos fueron propuestas en (Durand and Marchand (2009), Durand (2013)):

Estrategia 1: Únicamente sin condición de límite de seguridad

Este algoritmo corresponde al de Årzén donde la condición de límite de seguridad $h(t_a) \geq h_{max}$ es removida. Para este primer algoritmo, la parte integral queda expresada por la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} u_i(t_a) &= u_i(t_{a-1}) + K_i.he(t_a) \\ \text{Donde } he(t_a) &= h(t_a).e(t_a) \end{aligned} \quad (7)$$

Se esperan importantes sobre tiros después de un largo intervalo de estado estacionario.

Estrategia 2: Saturación de la ganancia integral

Este segundo algoritmo consiste en reducir el producto $he(\cdot)$ después de un largo intervalo de estado estacionario, en orden para reducir los sobre-impulsos. De esta manera la ganancia integral es limitada. La parte integral queda definida por la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} u_i(t_a) &= u_i(t_{a-1}) + K_i.he_{sat}(t_a) \\ \text{Donde } he_{sat}(t_a) &= (h(t_a) - h_{nom}).q_{nom} + h_{nom}.e(t_a) \end{aligned} \quad (8)$$

En (8) la ganancia integral $he(\cdot)$ es limitada superiormente durante el tiempo de detección de un transitorio por el producto $h_{nom}.e(t_a)$. El periodo de estado estacionario corre únicamente del instante de tiempo t_{a-1} a $t_a - h_{nom}$ que es igual al intervalo de tiempo $h(t_a) - h_{nom}$. Durante este periodo, el error permanece muy pequeño, el error es menor que el nivel de detección q_{nom} , de lo contrario el estado estacionario no sería logrado, y así es el producto $he(\cdot)$. De esta manera, la ganancia integral también se limita superiormente por el producto $(h(t_a) - h_{nom}).q_{nom}$. A pesar de limitar la ganancia integral todavía aumenta con respecto a $h(\cdot)$ y $e(\cdot)$.

Estrategias 3: Factor de olvido exponencial del intervalo de muestreo

Otro método consiste en reducir el impacto del intervalo de muestreo que principalmente aumenta durante el intervalo de estado estacionario. Por eso se agrega el factor de olvido exponencial del intervalo de muestreo. Se elige una función exponencial para disminuir este impacto cuando el tiempo del estado estacionario aumenta, que está dada por la siguiente ecuación:

$$h_{exp}(t_a) = h(t_a).exp(\alpha.(h_{nom} - h(t_a))) \quad (9)$$

Donde el parámetro α permite un grado de libertad o disminuye el intervalo exponencial de muestreo. Esto produce un intervalo de muestreo exponencial $h_{exp}(\cdot)$ en la parte integral del controlador de acuerdo a:

$$\begin{aligned} u_i(t_a) &= u_i(t_{a-1}) + K_i.h_{exp}(t_a) \\ \text{Donde } h_{exp}(t_a) &= h_{exp}(t_a).e(t_a) \end{aligned} \quad (10)$$

Esta función permite tener *i)* un intervalo de muestreo nominal durante los transitorios, donde $h(t_a) = h_{nom}$, es el intervalo de muestreo exponencial, esto es $h_{exp}(t_a) = h_{nom}$ y *ii)* una disminución exponencial del intervalo de muestreo durante los intervalos de muestreo de estado estacionario. Sin embargo, el producto $he(\cdot)$ es más grande cuando el intervalo de muestreo es pequeño.

Estrategia 4: Híbrida

Finalmente este algoritmo es una mezcla entre la saturación de la ganancia integral y el factor de olvido exponencial del intervalo de muestreo. La idea es tener un menor impacto del intervalo de muestreo todo el tiempo. Por esa razón, el factor de olvido exponencial dado en (10) se usa dentro del algoritmo de saturación (8). Así el producto $he(\cdot)$ es ahora limitado superiormente por $(h_{exp}(t_a) - h_{nom}).q_{nom} + h_{nom}.e(t_a)$ y la parte integral llega a ser:

$$\begin{aligned} u_i(t_a) &= u_i(t_{a-1}) + K_i.he_{hibrida}(t_a) \\ \text{Donde :} \\ he_{hibrida}(t_a) &= (h_{exp}(t_a) - h_{nom}).q_{nom} + h_{nom}.e(t_a) \end{aligned} \quad (11)$$

4. MODELO MATEMÁTICO

4.1 Modelo dinámico

El modelo matemático se basa en la siguiente forma de variables de estado:

$$\dot{x} = f(t, x, u, v) \quad (12)$$

Donde x son las variables de estado, temperatura interior, humedad y concentración de dióxido de carbono. v son las entradas externas (radiación solar, temperatura del aire exterior, humedad relativa exterior, concentración de dióxido de carbono exterior), t denota tiempo, $f(\cdot)$ es una función no lineal u son las variables de control (tasa de ventilación, flujo de calor por el calentador, flujo de dióxido de carbono, intensidad de luz suplementaria). (Hu et al., 2010; Albright et al., 2001).

4.2 Ecuación dinámica de temperatura y humedad

Las siguientes ecuaciones describen la dinámica de la temperatura y la humedad dentro de la cámara de fructificación. (Albright et al., 2001)

$$\begin{aligned} \frac{dT_{in}(t)}{dt} &= \frac{1}{\rho C_p V_T} [Q_{heater}(t) + S_i(t) - \lambda Q_{fog}(t)] - \\ &\quad \left(\frac{V_R(t)}{V_T} - \frac{UA}{\rho C_p V_T} \right) [T_{in}(t) - T_{out}(t)] \end{aligned} \quad (13)$$

$$\frac{dH_{in}(t)}{dt} = \frac{1}{\rho V_H} Q_{fog}(t) + [E(S_i(t), H_{in}(t))] - \frac{V_R(t)}{\rho V_H} [H_{in}(t), H_{out}(t)] \quad (14)$$

Donde:

T_{in}/T_{out} Temperatura interior/exterior del aire de la cámara de fructificación ($^{\circ}C$), H_{in}/H_{out} Humedad interior/exterior del aire de la cámara de fructificación, ($g[H_2O] kg^{-1}$ [aire seco]),
 UA Coeficiente de transferencia de calor (WK^{-1}), V Volumen de la cámara de fructificación (m^3),
 ρ Densidad del aire ($1,2kg[aire]m^{-3}$),
 C_p Calor específico del aire ($1006 jkg^{-1}K^{-1}$),
 Q_{heater} Calor suministrado por el calentador a la cámara de fructificación (W),
 Q_{fog} capacidad de agua del sistema de niebla ($g[H_2O]s^{-1}$)
 S_i Energía solar radiante interceptada (W),
 λ Calor latente de vaporización ($2257 Jg^{-1}$),
 VR Tasa de ventilación ($m^3[air]s^{-1}$),
 $E(S_i(t), H_{in}(t))$ Tasa de transpiración de las plantas ($g[H_2O]s^{-1}$),

V_T y V_H son los volúmenes de mezcla activos de aire de la temperatura y humedad, respectivamente. Generalmente hablando, V_T y V_H son tan pequeños como 60% - 70% de la geometría volumen V de la cámara de fructificación debido a que existen zonas estancadas en espacios ventilados Albright et al. (2001)

4.3 Modelo en variable de estado

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 = & \frac{UA}{\rho C_p V_T} x_1(t) - \frac{1}{V_T} x_1(t) u_1(t) - \frac{\lambda}{\rho C_p V_T} u_2(t) \\ & + \frac{1}{\rho C_p V_T} v_1(t) + \frac{UA}{\rho C_p V_T} v_2(t) \frac{1}{\rho C_p V_T} v_4(t) \\ & + \frac{1}{V_T} u_1(t) v_2(t) \quad (15) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 = & \frac{\beta_t}{\rho V_H} x_2(t) + \frac{1}{\rho V_H} u_2(t) + \frac{\alpha}{\lambda \rho V_H} v_1(t) \\ & - \frac{1}{\rho V_H} x_2(t) u_1(t) + \frac{1}{\rho V_H} u_1(t) v_3(t) \quad (16) \end{aligned}$$

4.4 Simulación y validación de modelo matemático

Se muestran las ecuaciones (15) (16) en el diagrama de bloques para simular en lazo abierto el clima interior de la cámara de fructificación en simulink de Matlab, ver Fig. 5, donde se observan las variables exteriores que influyen; Radiación solar, temperatura, humedad, ventilación, sistema de riego por nebulización, elemento calefactor y como salidas la lectura de las variables interiores humedad absoluta y temperatura. La dinámica del modelo matemático en comparación con la lectura de sensores tiene una variación de entre 0,2 y 0 en la

temperatura y 3,0 en humedad absoluta, esto debido a que en la conversión de humedad relativa a humedad absoluta cambia por la presión atmosférica que varía en el transcurso del día ver Fig. 3 y Fig. 4 para validar el modelo matemático se usaron las siguientes variables y parámetros tomando como referencia el tamaño de la cámara de fructificación que es de $0,33m^3$

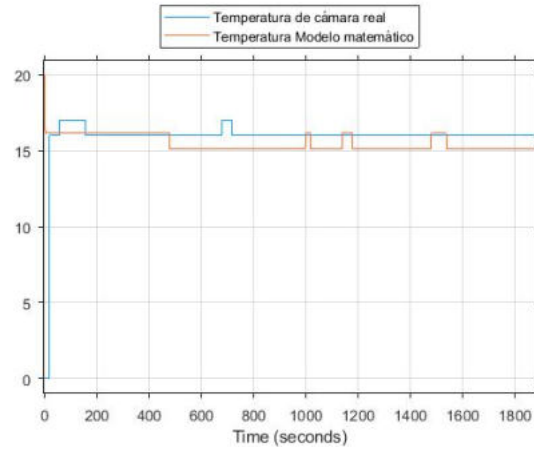


Figura 3. Comparación de temperatura de modelo matemático con cámara de fructificación

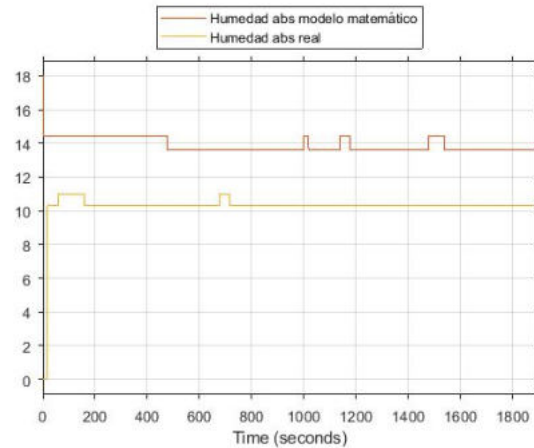


Figura 4. Comparación de humedad de modelo matemático con cámara de fructificación

El siguiente diagrama ver Fig. 6 hace la lectura en tiempo real de de las variables internas y externas de la cámara de fructificación y las compara con el modelo matemático.

5. MATERIAL Y MÉTODOS

El material biológico se obtuvo del laboratorio del Instituto Nacional de Ecología (INECOL), se siguió el protocolo descrito por (Salmones et al 2007), con algunas modificaciones, el sustrato empleado fue paja de maíz picada en trozos de $5cm$ de longitud aproximadamente, la cual

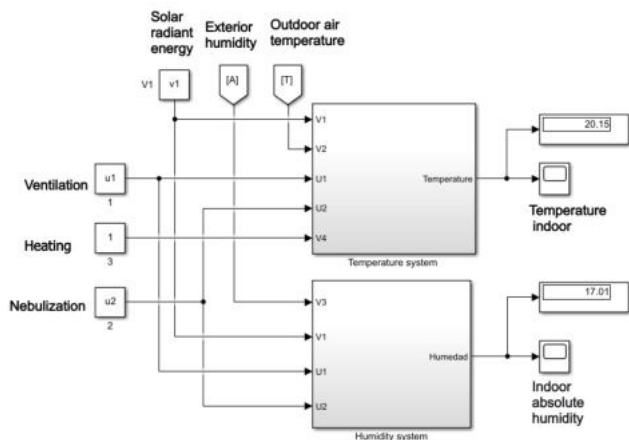


Figura 5. Diagrama de bloques: Sistema en lazo abierto de cámara de fructificación

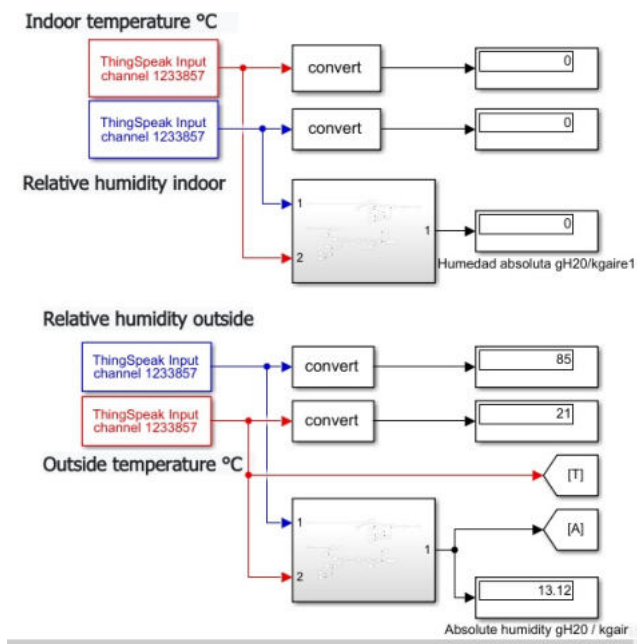


Figura 6. Diagrama de bloques:

se humedeció a saturación y se esterilizó en autoclave a 121°C y 1,8 libras de presión por 15 minutos. Una vez el sustrato fue esterilizado se enfrió a una temperatura de 25°C se procedió a aplicar el inoculo de grano, para ello se colocaron paja e inoculo alternadamente en bolsa de plástico de 1kg , se utilizaron aproximadamente 5g de inóculo por 100g de sustrato húmedo y se realizaron 5 repeticiones. Las bolsas inoculadas se colocaron en un área con una temperatura de 2°C sin iluminación, en donde tuvo lugar la propagación vegetativa del micelio en el sustrato hasta que lo invadió completamente. Después de aproximadamente 15 días apareciendo los primeros brotes o primordios. En ese momento se retiraron las bolsas de plástico trasladándose a la cámara de fructificación en donde por medio de una raspberry pi se mantuvieron

constantes las condiciones que fueron las adecuadas para el desarrollo de los cuerpos fructíferos.

5.1 Diagrama de metodología basada en eventos/red

Para lograr el control se implementó la siguiente estrategia de eventos/red para control, en el cual se integra una ESP8266 WiFi para el envío de información a la nube (ThingSpeak de Matlab) con un muestreo de 14s , una vez recibido el dato a thingSpeak se da lectura en Simulink para que la raspberry Pi pueda hacer lectura y hacer las acciones control en la cámara de fructificación ver Fig. 7

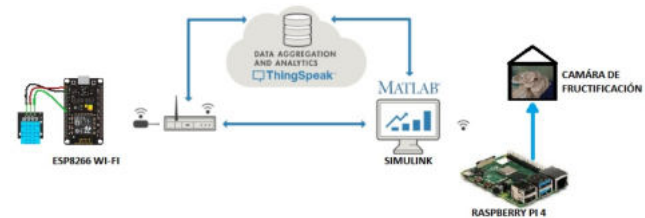


Figura 7. Metodología basada en eventos/red

5.2 Sintonización de PI basado en eventos/red

Para la sintonización del controlador se tuvo como objetivo tener una temperatura de 25°C de y 72% de humedad relativa, se inició la ganancia proporcional a un $0,7$ para mantener oscilaciones sostenidas con tiempo de muestreo de 14s ver Fig. 8, donde se realiza la experimentación de la cámara de fructificación la ganancia proporcional en la humedad $0,7$ y temperatura de $1,3$ en lazo abierto.



Figura 8. Gráficas de temperatura y humedad con oscilaciones sostenidas

6. RESULTADOS

6.1 Resultados de controlador PI basado en eventos

Al aplicar la metodología de controlador basado en eventos/red propuesta por Arzen y usando el segundo método de Ziegler-Nichols se proponen los controladores PI para el controlador de la humedad unas ganancias de $P = 4$, $I = 0$ y para las ganancias del controlador de temperatura $P = 1$, $I = 0,2$ dando como resultado las siguientes ver Fig. 9.

La temperatura se mantuvo constante a 25°C , con una humedad relativa de 70% por medio de nebulización y con una iluminación de 100 luxes así como una ventilación



Figura 9. Gráficas de temperatura y humedad con oscilaciones sostenidas

continúa para mantener la concentración de CO_2 por debajo de los niveles inhibitorios de la fructificación.

La cosecha se realizó antes de que los esporóforos alcanzaran su máximo desarrollo (cuidando que se conservara su apariencia fresca). Se pesaron en la báscula granataria para evaluar la eficiencia Biológica. Los tiempos de cosecha varían entre los 28 y 70 días. Para *Pleurotus* se reportan eficiencias entre un rango de 36% al 170%. Mediante la observación periódica se determinó la presencia de contaminación

Se obtuvieron producciones con una eficiencia biológica de 75%, en condiciones controladas dentro de la cámara de fructificación, se observó la formación de primordios a los 7 días, la aparición de fructificaciones se observaron a los 12 días con un pie pequeño, bien desarrollado el sombrero con un tamaño de la colonia entre 5 y 10 individuos, con sombreros entre 5 y 10 centímetros ver Fig. 10, se cosecharon las fructificaciones a los 15 días de haber sido inoculado el sustrato.



Figura 10. Hongos con condiciones ideales

La segunda oleada de fructificaciones se registró a los 22 días, con un periodo de latencia de solo 5 días se observaron los primordios a los 20 días. Se obtuvieron un número menor de hongos, pero de buena calidad. El color y aroma de las fructificaciones es el característico. No se observaron presencia de plagas o enfermedades. Los bordes de las fructificaciones no presentaron cortes o resequeidad. El sabor y la calidad no se vieron afectados.

Durante el periodo de 43 días se mantuvieron las condiciones de luz, temperatura y humedad constantes.

7. CONCLUSIÓN

Con la aplicación de los PI basado en eventos se tiene un mayor ahorro de energía y de agua ya que solo el sistema enciende únicamente cuando existe un evento fuera del umbral en el que fue programado. Controlar la humedad por nebulización también nos permitió hacer un manejo más eficiente del agua y hacer que los hongos y el sustrato retengan la humedad. Se facilitó la salida del aire bajando las concentraciones de CO_2 , que afecta el crecimiento del hongo, el control de estos parámetros también ayudo a impedir el desarrollo de contaminantes o se humedeciera en exceso impidiendo la fructificación. De acuerdo con Gaitan 2006, las bolsas deben ser incubadas aproximadamente por 2 a 3 semanas a una temperatura de 25 a 28°C y posteriormente se observarán la aparición de primordios, aproximadamente se requiere de una semana para que se desarrollen los primordios en hongos maduros. Nuestros resultados muestran una reducción en el tiempo de desarrollo de primordios y fructificaciones, desarrollándose los primordios a los 12 días, lo que representaría una disminución de 14.28 y 42.85%. (Gaitán-Hernandez, et al., 2006) Otro autor sugiere que la producción en temperaturas de 12 a 18°C y una humedad del ambiente de 85 a 95% e iluminación diurna de 60 a 200 lux, con ventilación de 150m³ reciclando el aire de 5 a 10 veces por hora en su totalidad, en el cultivo industrial o 15°C y humedad grande (rociar) en cultivo domestico, con iluminación diurna y mucha ventilación. Pero con estos parámetros la producción se alarga a 60 días con tandas 3 a 8 días con latencia de 10 a 20 días (García, 1985). Con los parámetros constantes de temperatura, luz y humedad nos permitió acelerar el proceso y obtener hongos de buena calidad con un buen índice biológico.

REFERENCIAS

- Albright, L.D., Arvanitis, K., and Drysdale, A. (2001). Environmental control for plants on earth and in space. *IEEE Control Systems Magazine*, 21(5), 28–47.
- Árzen, K.E. (1999). A simple event-based PID controller. In *Preprints of the 14th World Congress of IFAC*. Beijing, P.R. China.
- Åström, K. and Bernhardsson, B. (2002). Comparison of Riemann and Lebesgue sampling for first order stochastic systems. In *Proc. of the IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*.
- Chow, M.Y. and Tipsuwan, Y. (2001). Network-based control systems: a tutorial. In *Industrial Electronics Society, 2001. IECON '01. The 27th Annual Conference of the IEEE*.
- Durand, S. (2013). Event-based stabilization of linear system with communication delays in the measurements. *Proceedings of the American Control Conference*.
- Durand, S. and Marchand, N. (2009). Further results on event-based PID controller. In *Proc. of the European Control Conference (ECC)*.
- Durand, S., Marchand, N., and Guerrero Castellanos, J.F. (2014). Event-based stabilization of nonlinear

- time-delay systems. In *Proceedings of the 19th World Congress of IFAC*.
- Eqtami, A., Dimarogonas, D.V., and Kyriakopoulos, K.J. (2010). Event-triggered control for discrete-time systems. In *Proceedings of the IEEE American Control Conference*.
- Gao, H., Chen, T., and Lam, J. (2008). A new delay system approach to network-based control. *Automatica*, 44(1), 39 – 52. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.automatica.2007.04.020>.
URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109807002488>.
- Guerrero-Castellanos, J.F., Téllez-Guzmán, J.J., Durand, S., Marchand, N., Álvarez Muñoz, J., and González-Díaz, V. (2013). Attitude stabilization of a quadrotor by means of event-triggered nonlinear control. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Springer.
- Heemels, W., Sandee, J., and van den Bosch, P. (2009). Analysis of event-driven controllers for linear systems. *International journal of control*, 81, 571–590.
- Hu, H., Xu, L., and Wei, R. (2010). Nonlinear adaptive neuro-pid controller design for greenhouse environment based on rbf network. In *The 2010 international joint conference on neural networks (IJCNN)*, 1–7. IEEE.
- Lunze, J. and Lehmann, D. (2010). A state-feedback approach to event-based control. *Automatica*, 46, 211–215.
- Marchand, N., Durand, S., and Guerrero-Castellanos, J.F. (2013). A general formula for event-based stabilization of nonlinear systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 58(5), 1332–1337.
- Martínez-Carrera, D., Aguilar, A., Martínez, W., Morales, P., Sobal, M., Bonilla, M., and Larqué-Saavedra, A. (2004). A sustainable model for rural production of edible mushrooms in Mexico. *Micología Neotropical Aplicada*, 11, 77–96.
- Mayett, Y. and Martínez-Carrera, D. (2019). El consumo de hongos comestibles y su relevancia en la seguridad alimentaria de México. *Los hongos comestibles, funcionales y medicinales: aportación a la dieta, la salud, la cultura y al sistema agroalimentario de México*, 293–329.
- Mora, V. and Martínez-Carrera, D. (2007). Investigaciones básicas, aplicadas y socioeconómicas sobre el cultivo de setas (*Pleurotus*) en México. *El cultivo de setas *Pleurotus* spp. en México*, 69–110.
- Park, H.S., Kim, Y.H., Kim, D.S., and Kwon, W.H. (2002). A scheduling method for network-based control systems. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 10(3), 318–330.
- Sánchez, J., Guarnes, M., Dormido, S., and Visioli, A. (2009). Comparative study of event-based control strategies: An experimental approach on a simple tank. In *Proc. of the European Control Conference (ECC)*.
- Sandee, J., Heemels, W., and van den Bosch, P. (2005). Event-driven control as an opportunity in the multidisciplinary development of embedded controllers. In *Proc. of the IEEE American Control Conference (ACC)*, 1776–1781.
- Tabuada, P. (2007). Event-triggered real-time scheduling of stabilizing control tasks. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 52(9), 1680–1685.
- Velasco, M., Martí, P., and Bini, E. (2009). On Lyapunov sampling for event-driven controllers. In *Proc. of the IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*.
- Wasser, S. (2002). Medicinal mushrooms as a source of antitumor and immunomodulating polysaccharides. *Applied microbiology and biotechnology*, 60(3), 258–274.