

Eficiencia energética de un invernadero: Un estudio práctico de aplicación de un controlador multifrecuencia en un entorno multivariable

Energetic efficiency of a greenhouse: A practical study of the application of a multifrequency controller in a multivariable environment

DOI:10.34117/bjdv7n6-293

Recebimento dos originais: 14/05/2021

Aceitação para publicação: 14/06/2021

Secundino Marrero Ramírez

Doutor em Ciências Técnicas, pela Universidade Estadual de Minas de São Petersburgo

Escola de Engenharia Elétrica-Universidade Técnica de Cotopaxi
Av. Simón Rodríguez, S/N, Bairro, San Felipe - Latacunga, Cotopaxi
E-mail: secundino.marrero@utc.edu.ec

Daniel Guzmán del Río

Doutor em Ciências Técnicas, pela Universidade Tecnológica da Havana

Escola Superior de Tecnologia-Universidade do Estado do Amazonas
Av. Darcy Vargas, 1200, Bairro Chapada - Manaus, Amazonas
E-mail: drío@uea.edu.br

Ileana González Palau

Doutor em Ciências Técnicas, pela Universidade Estadual de Minas de São Petersburgo

Escola de engenharia Elétrica-Universidade Técnica de Cotopaxi
Av. Simon Rodriguez, S/N, Bairro, San Felipe - Latacunga, Cotopaxi
E-mail: iliana.gonzalez@utc.edu.ec

Marco Aníbal León Segovia

Mestre pela Universidade Técnica de Cotopaxi

Escola de Engenharia Elétrica-Universidade Técnica de Cotopaxi
Av. Simon Rodriguez, S/N, Bairro, San Felipe - Latacunga, Cotopaxi
E-mail: marco.leon@utc.edu.ec

Manuel Ángel León Segovia

Mestre pela Universidade Técnica de Cotopaxi

Escola de Engenharia Elétrica-Universidade Técnica de Cotopaxi
Av. Simon Rodriguez, S/N, Bairro, San Felipe - Latacunga, Cotopaxi
E-mail: manuel.leon@utc.edu.ec

RESUMEN

En el presente trabajo se muestra una investigación realizada en un sistema de control multifrecuencia (CMF), donde las variables actualizan sus valores con diferentes dinámicas y se mejora las prestaciones del lazo de control con la utilización del muestreo no convencional. El CMF mejora el desempeño del controlador en comparación con los

sistemas monofrecuencia. Con el uso de diferentes frecuencias de muestreo se mejora la precisión, logrando reducir en la señal de salida el sobreimpulso, el tiempo de establecimiento y las oscilaciones. El controlador bifrecuencia utilizado, aprovecha la mayor velocidad en la generación del control, para poder reducir el efecto negativo que introduce la presencia de una menor velocidad de lectura en los sensores, durante el retorno de la señal al controlador. También el buen desempeño de este controlador permitió reducir el tiempo de estabilización de la variable controlada y esto favorece la eficiencia energética del invernadero.

Palabras-Clave: Sistemas multifrecuencia, controlador bifrecuencia, muestreo no convencional.

ABSTRACT

This work shows research carried out in a multi-frequency control system (CMF), where variables update their values with different dynamics and improve the performance of the control loop with the use of unconventional sampling. The CMF improves controller performance compared to single-frequency systems. The use of different sampling frequencies improves accuracy, reducing over-pulse, set-time and oscillations in the output signal. The bifrequency controller used, takes advantage of the higher speed in control generation, to reduce the negative effect introduced by the presence of a lower reading speed in the sensors, during the return of the signal to the controller. Also, the good performance of this controller allowed to reduce the stabilization time of the controlled variable and this favors the energy efficiency of the greenhouse.

Keywords: Multifrequency systems, bifrequency controller, unconventional sampling.

1 INTRODUCCIÓN

Los invernaderos se han tornado importantes en los sistemas agrícolas de muchos países, de ahí que, para optimizar su trabajo, afectando poco el medio ambiente, resulta importante el control de sus parámetros energéticos. Según el reporte de Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos. IDAE:

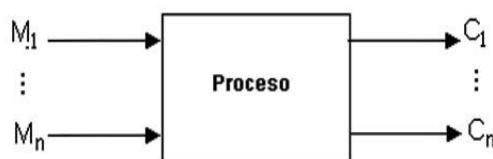
[...]. El consumo energético en los invernaderos es un factor muy importante a considerar dentro de los costes de producción, de ahí que se considere prioritaria la optimización energética de estos sistemas. Por otra parte, optimizando el consumo de energía se facilitará el cumplimiento de las regulaciones ambientales y energéticas, cada vez más restrictivas, que afectan al sector, logrando unos invernaderos más amigables con el medio ambiente a la vez que competitivos en el mercado europeo. (2008, p.8).

El control de los procesos se ha tornado en esta época muy importante para lograr eficiencia, según Seborg (1994, p.179): “Existen muchas estrategias de control que hoy se utilizan dentro de las clásicas y las de avanzadas”; en los problemas prácticos de control es típico encontrar más de una variable que puede ser controlada y de la misma

forma, ser manipulada; este problema es denominado control multivariable, que es uno de los más utilizados, cuando se trata de sistemas donde existen fuertes interacciones entre sus variables, lo que garantiza un buen desempeño.

Según un análisis realizado por Seborg (1989), un sistema donde existan múltiples entradas y múltiples salidas es usualmente designado por la sigla, en inglés, MIMO (Multi-Input, Multi-Output), como se muestra en la figura 1.

FIGURA 1- Esquema de un control multivariable con n entradas y n salidas o $(n \times n)$.



FUENTE: D. E. Seborg, 1989.

En los invernaderos, este tipo de control es factible debido al número de variables a controlar; por ejemplo, Lorenzo afirma que:

[...] La tecnología en el invernadero permite mejorar la eficiencia de producción al modificar y controlar el valor de los parámetros climáticos que inciden sobre el cultivo (radiación, temperatura, déficit de presión de vapor, concentración de CO₂, velocidad de viento), el aporte hídrico y mineral, la duración del periodo productivo, el control de plagas y enfermedades. (2012, p.24).

Aquí resulta de prioridad el control de la temperatura, para lograr el crecimiento y desarrollo óptimo de las plantas; a pesar de la importancia de otras variables, como la humedad, PH y la concentración de diferentes nutrientes del suelo. Cada una de estas variables tienen intervalos de variación críticos, que no deben superar determinados valores y de ocurrir, se originan pérdidas considerables en la producción y consecuentemente afectaciones al medio ambiente. Además, el uso de un control adecuado de temperatura es un factor decisivo en la eficiencia energética del invernadero, al incidir en la potencia, que sería necesario instalar en el invernadero de calefacción (valores negativos) o de refrigeración (valores positivos) para los diferentes casos, según las temperaturas exteriores e interiores, ya que en temperaturas exteriores elevadas (temperatura máxima absoluta de 38,0 °C) es necesario poner en marcha el sistema de nebulización que requiere el funcionamiento del sistema de bombeo y esto incrementa el consumo de energía eléctrica.

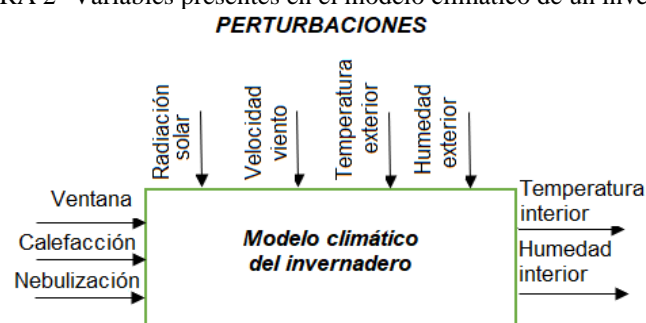
La existencia en este sistema de interrelación entre variables y su comportamiento ante las perturbaciones presentes a diferentes frecuencias, permite sugerir que el control multivariable puede ser el de mejor desempeño, debido a la existencia de interacción entre los distintos lazos de control de las variables como temperatura interna, humedad y nivel de dióxido de carbono, CO₂, entre otras. (BELLON, 2013, v.1, p. 4), (MARTÍNEZ; FARÍAS; RUIZ, 2020, p. 2) y (CASTAÑEDA; HERRERA; GARCÍA, 2003, v.1, p. 16).

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Para obtener el modelo dinámico del invernadero se requiere hacer los balances de energía, masa e incluir los aportes de la biología de las plantas como fue planteado en los trabajos de Kosut (2010, p. 11), Castañeda, Herrera y García (2003, v.1, p. 18) y Guzmán et al (2010, v.16, p. 25). Para este modelo, se pueden establecer dos subsistemas, uno relacionado con el volumen de aire y el otro con el suelo, que actúa como una masa térmica. Entonces las variables que definen el comportamiento climático van a ser la temperatura del aire interior y la humedad relativa.

En la figura 2 se puede observar un esquema del invernadero como objeto de control, donde las variables a controlar son la temperatura y humedad, mientras que las variables a manipular definidas van a ser el volumen de aire que entra por las ventanas, la calefacción y la nebulización.

FIGURA 2- Variables presentes en el modelo climático de un invernadero.



FUENTE: Autores.

El modelo del invernadero presenta una complejidad, debido a su no linealidad y a la necesidad de plantear un conjunto de ecuaciones de balance que se pueden expresar en variables de estado, o realizar la discretización con relación a la temperatura (T) para facilitar su solución, como se observa en la ecuación (1) propuesta por Bellon (2016, v. 14, p.80).

$$\frac{dT}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{T(t+\Delta t) - T(t)}{\Delta t} \cong \frac{T[k+1] - T[k]}{T_s} \quad (1)$$

Esta ecuación considera un factor relacionado con la constante de tiempo del sensor, debido a los estados transitorios de las señales relacionadas con la potencia térmica, la velocidad de flujo y el ruido introducido en los datos del sensor. Esto requiere que se defina un valor adecuado del tiempo de muestreo (T_s), entonces en la discretización del modelo de temperatura (T) de la ecuación (1), el valor de (T_s) expresa el período de muestreo para la adquisición de datos y en la medida que este disminuye, resulta más exacto, pero es necesario considerar también el muestro del resto de variables, que presentan un comportamiento dinámico diferente y esto va a requerir el uso de un sistema computacional.

El control tradicional utiliza periodos de muestreo constantes, o sea, el mismo periodo de muestreo para las variables medidas y la señal de control. Entonces para lograr el objetivo del controlador de llevar al sistema a un estado estable, cumpliendo un grupo de especificaciones y considerando la dinámica del sistema en el algoritmo de control, es necesario asumir que todas las señales de los datos muestreados son sincronas. Para esto se requiere el uso del control con muestreo no convencional, donde se considera una sucesión irregular de instantes de muestreo en diferentes puntos del lazo de control, lo que ha permitido el desarrollo del CMF. En los lazos de control, la descomposición por frecuencia de la tarea de control es factible para aquellos sistemas multivariables que presentan diferentes dinámicas como se muestra en el trabajo de Marrero et al (2017, p.75), para la creación de un control con tres niveles jerárquicos, donde se clasifican las perturbaciones en frecuencia altas, medias y bajas para la síntesis de un algoritmo de control.

Se ha demostrado, que en los sistemas MF al utilizar el muestreo no convencional, (VELEZ; SALT, 2000, p. 31), (SÁNCHEZ, p. 16) y (ALFONSI; YANES; PÉREZ, 2017, v.38, p.161), se garantiza un mejor desempeño del sistema de control y para esto existen técnicas como los operadores de Kranc y los modelos algebraicos en los controladores digitales. En estos casos las técnicas de CMF, también favorece la gestión de recursos formulada como un problema de control de sistemas de cómputo, definiendo cada tarea para el lazo de control con su propio periodo de activación, que puede ser diferente a los requeridos en la referencia y en la respuesta del sistema (factor de carga total del procesador). Para estos casos, existen autores como

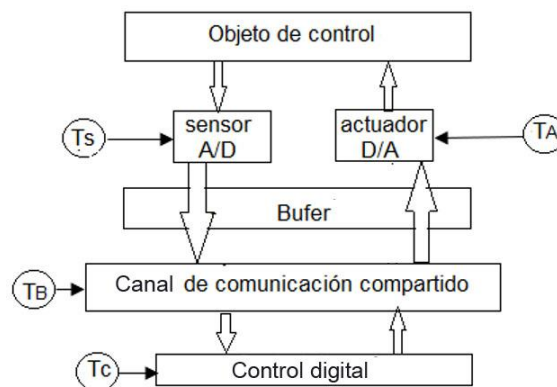
Alfonsí, Yanes y Pérez (2017, v.38, p.164), que plantean resultados importantes con la reducción del tiempo de ocupación del procesador debido a la variabilidad de los tiempos de cómputo.

Otra alternativa son los sistemas de control basados en red (SCBR), como el mostrado en la figura 3, que conjuga las redes teleinformáticas y el control, que se aplica a pesar de los inconvenientes relacionados con la pérdida de datos, los retardos inducidos por el modelo de red, el nivel de carga, la falta de sincronismo en distintos puntos de la red y la capacidad del canal de transmisión. Aquí la red opera a diferentes períodos de muestro (T_s , T_A , T_C) y un periodo T_B relacionado con la frecuencia de las señales transmitidas por el canal de comunicación compartido.

Autores como Ramos y Balmat (2015, p.71), proponen mantener un clima adecuado dentro de un invernadero, con el empleo de un sistema difuso Takagi-Sugeno para identificar un modelo de la temperatura, y proponer una estrategia de control, donde para cada regla difusa se define un controlador en particular del tipo clásico o lineal, también Berni et al (2020, v.6, p. 38233), afirma también que puede ser utilizada la lógica Fuzzy “[...] para realizar el control de temperatura en el interior de una estructura cerrada, para corregir el error entre la temperatura leída por el sensor y la temperatura de referencia, con el propósito de obtener un control eficiente.”

En este sistema cuando la temperatura interna es superior a la referencia, sigue los modelos difusos según sea el tipo de aprendizaje usado para modelar el clima, aquí no fue posible aplicar el sistema de control en lazo cerrado y se debe señalar que el modelado difuso es una alternativa, cuando es difícil obtener un modelo matemático, sin embargo en este caso particular el modelo es factible obtenerlo por la vía experimental, (BELLON 2016, v. 14, p.80) y (KOSUT, 2010, p.11).

FIGURA 3- Sistema de control basado en red (SCBR).



FUENTE: Autores.

2.1 DISEÑO DEL CONTROLADOR

Los reguladores PID se encuentran presente en más del 95 % de los lazos de control, (MORILLA, 2007), y es por esto que resulta importante evaluar el modo en que los sistemas MF pueden ser controlados mediante reguladores PID, adaptados a diversas situaciones MF con el mismo regulador y modificando únicamente el modo en que recibe y genera las órdenes. En los trabajos de Sánchez (2016, p. 11) y (Cuesta et al. (2004, p. 2), se plantea el uso de operadores de Kranc, transformando cada muestreador con la descomposición vectorial de conexiones (DVC) y su posterior agrupación mediante el álgebra de bloques para formar los operadores. Aquí también resulta necesario incorporar a la salida un muestreador ficticio, lo suficientemente rápido, como para imitar la salida continua, requiriendo para ello la selección de una frecuencia de muestreo (N) veces mayor que la frecuencia de muestreo de la señal error y así poder formar el operador de Kranc. En la implementación del PID multifrecuencia (PIDMF) las acciones de control proporcional, integral y derivativa funcionan con períodos diferentes. Este controlador también puede trabajar en monofrecuencia cuando el periodo de la señal error (T_e) es igual al de la acción de control (T_c) y para valores de $T_e \neq T_c$, el sistema opera en MF.

Otra de las técnicas utilizadas consiste en el regulador que se descompone en paralelo y que da como resultado dos modos lentos (u_1 y u_2), que trabajarán con un periodo de muestreo mayor y otro rápido (u_3), con un periodo que puede ser la mitad de los dos anteriores. En el trabajo de Vélez (2000, p. 29) se puede observar las características de los modelos MF aplicados a los sistemas SISO y MIMO con muestreo regular e irregular. También en los trabajos de Sánchez (2016, p.16), Dormido, Sánchez y Kofman (2008, v.5, p. 11) y Heemels et al (2015, p. 387), se presentan técnicas para mejorar el control con el muestreo basado en eventos, donde la ocurrencia de un evento es la que va a determinar el muestreo para el control del sistema y no el periodo de tiempo, siendo este el modo que ha dominado en la ingeniería de control.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 ESTUDIO DE CASO PARA EL CONTROL MUTIFRECUENCIA DE UN INVERNADERO

Primeramente, se evalúa lo que representa el retardo en un sistema SISO continuo, utilizando la función $G_1(s)$ de cuarto orden con el diagrama de Bode y así determinar su incidencia en relación con el esfuerzo del controlador (EC) y la definición

del tiempo de las tareas, que se determinan como la inversa del retardo máximo admisible, calculado con la ecuación (3). Para este análisis se utiliza un regulador proporcional que presenta una ganancia $K= 0.2$ e $\Delta = 6.01s$.

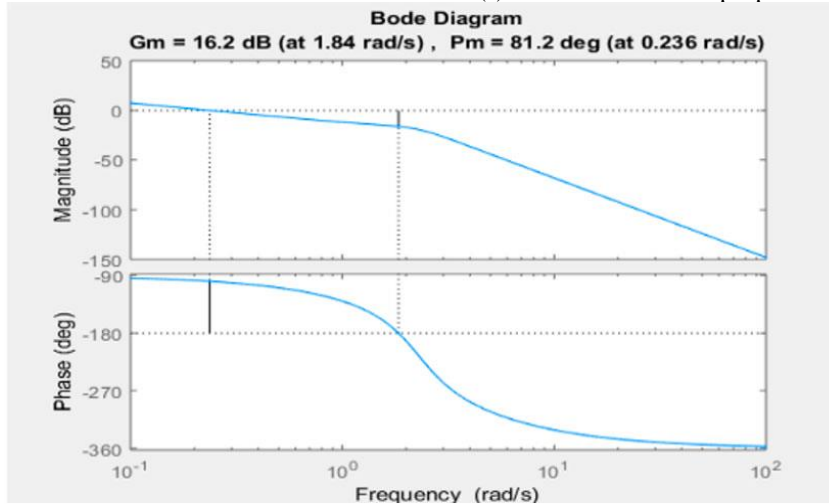
$$G_1(s) = \frac{20}{s^4 + 5s^3 + 4s^2 + 17s} \quad (2)$$

$$EC = \Delta^{-1} = \omega_c / mf = 0.166 \quad (3)$$

Donde: ω_c es la frecuencia de corte máxima, rad/s.
 mf es el margen de fase, grados.

Al observar la gráfica de Bode en la figura 4, se aprecia que el máximo retardo que puede tener el lazo, sin que aparezca la inestabilidad es de 6.01s. También al incrementar la ganancia del controlador a valores cercanos a 0.7, el esfuerzo del control $EC= 1.1$ y el máximo retardo admisible se reduce hasta 0.9 s. Esto demuestra la necesidad de utilizar el sistema MF en aquellos sistemas donde los períodos de las señales presentes en el sistema con múltiples entradas y salidas (MIMO), son diferentes.

FIGURA 4- Gráfica de Bode de la función $G_1(s)$ con un controlador proporcional.



FUENTE: Autores, 2020.

Al aparecer el retardo de fase en el sistema, incluso a bajas frecuencias, lo más simple ante esta dificultad, sería la de ignorar los efectos del retraso e intentar encontrar el mejor control posible con un lazo sencillo de realimentación; sin embargo, esta estrategia puede funcionar bien cuando el retraso es pequeño, pero si son apreciables o dominantes, esta estrategia no funciona y para la solución de esta dificultad se deben emplear estructuras de control avanzado de tipo predictivo, (PIÑON ET AL, 2002, p.

6), (MACHACA, 2018, p. 91) y (PAWLOWSKI ET AL, 2011, p. 1780), lo que requiere la combinación de diferentes tipos de control a partir de la linealización por realimentación y el uso de desigualdades matriciales lineales (LMI) para lograr la optimización del control, sin embargo en estos casos es posible la discrepancia entre el comportamiento predictivo y el comportamiento real del sistema, lo que crea la necesidad de imponer cierta robustez al sistema, incorporando realimentación del mismo y esto tiene la desventaja de que requiere del conocimiento del modelo dinámico del sistema, un algoritmo de optimización y alto costo computacional que hace difícil su uso en sistemas rápidos.

En los resultados obtenido por Sánchez (2016, p. 25), se plantea que la aplicación del CMF entrelazo para un sistema permite homogenizar la carga computacional del controlador para todas las interacciones, y logra reducir su utilización en un 33% respecto al sistema monofrecuencia.

A continuación, se realiza el análisis del comportamiento de la variable controlada en un sistema SISO a lazo cerrado de un invernadero, cuando el control monofrecuencia es sustituido por un SMF. Se utiliza un periodo de intermuestreo, que es el máximo común divisor de los restantes periodos, ello permite muestrear la señal de error a cada componente, usando diferentes frecuencias y sumar las acciones de cada uno para generar la acción de control final. Este método exige que todos los periodos presentes deben poder describirse en función del periodo marco (T_M).

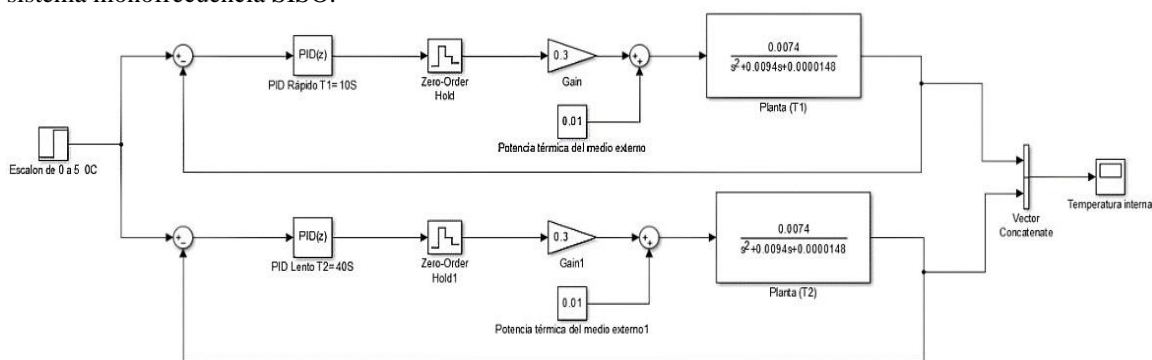
Se utilizará el modelo lineal obtenido por Bellon (2016, v. 14, p.80), para el control de temperatura en heladas de un invernadero experimental a escala, donde se seleccionan las funciones de transferencia del canal que relaciona, la potencia térmica introducida por el flujo de aire caliente, como variable de control del ambiente y la temperatura que registra el sensor en el interior del invernadero en una conexión serie, esto trae como resultado la función mostrada en la ecuación (4).

$$Gp(s) = \frac{0.0074}{s^2 + 0.0094s + 0.0000148} \quad (4)$$

En este análisis no se considera el modelo de perturbación que incluye la relación entre la temperatura exterior del medio y la interior del invernadero.

Para evaluar el comportamiento del sistema ante diferentes períodos de muestreo, se utiliza el esquema descrito en la figura 5.

FIGURA 5- Comparación del efecto que tiene el periodo de muestreo en la calidad de control de un sistema monofrecuencia SISO.



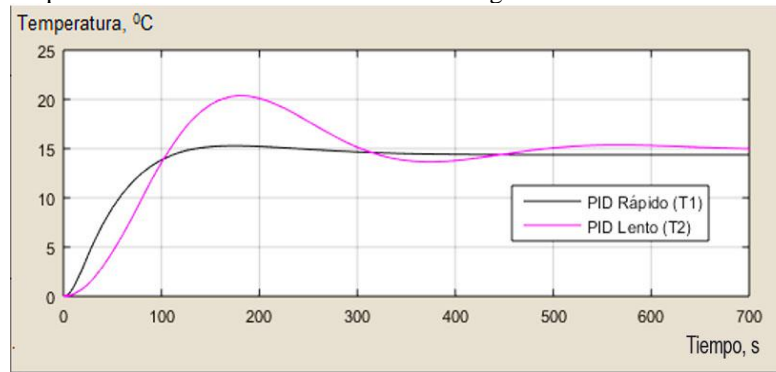
FUENTE: Autores, 2020.

Este esquema de simulación para el sistema con dos controladores monofrecuencia PID discretos, que operan a un período $T_{M1} = 10s$ y $T_{M2} = 40s$ permite describir la acción de un controlador lento y otro rápido ante un escalón de temperatura de $5\text{ }^{\circ}\text{C}$; aquí el sistema presenta la restricción de ser controlado desde un bus de comunicación compartido y no es posible en la práctica cumplir esto, por lo tanto, a pesar de los periodos de muestreo requeridos de T_{M1} a T_{M2} , que son los permitidos por el sistema, se obtiene que el regulador discreto con T_{M2} , que origina un regulador PID lento, limita la calidad del control, como se observa en la figura 6, donde se genera un sobre impulso elevado y se incrementa el tiempo de asentamiento en la respuesta del sistema.

Para reducir el efecto negativo del control monofrecuencia, se implementa el CMF, que está compuesto por un regulador lento y otro rápido, a partir de la técnica utilizada por Heemels et al (2015, p. 390), Mascarov (2005, p. 971) así como Salt, Cuenca y Albertos (2011, p. 2).

Entonces a partir de la función de transferencia del proceso continuo, para la cual ya fue diseñada un controlador PID continuo $G(S)_R$, si se discretiza el PID, (SALT; CUENCA; ALBERTOS, 2011, p. 4), y se selecciona un período de muestreo lento, se degradan los rendimientos dinámicos del proceso controlado, por esto se considera como aceptable el comportamiento discreto para un periodo de muestreo de actualización del control T_M y realizar en la salida el muestreo con período NT_M .

FIGURA 6- Respuesta al escalón del sistema SISO con reguladores PID discretos monofrecuencia.



FUENTE: Autores, 2020.

Entonces se define el regulador bifrecuencia con la estructura:

$$G_{RN}^T = G_2^T H_N^T G_1^{NT} \quad (5)$$

G_2^T . - Componente del PID rápido

$$G_2^T = \frac{M^T}{G_p^T} \quad (6)$$

donde:

M^T - modelo de referencia.

G_1^{NT} . - Componente del PID lento.

$$G_1^{NT} = \frac{1}{1 - M^{NT}} \quad (7)$$

H_N^T . - Convertidor de frecuencia.

$$H_N^T = \frac{1 - Z^{-N}}{1 - Z^{-1}} \quad (8)$$

Para la síntesis de controlador será necesario determinar las funciones de transferencia del bucle cerrado M^T y M^{NT} a partir de la función del objeto de control G_p y la función del regulador G_R en los períodos de muestro T y NT . Esto da como resultado, los reguladores discretos G_R^T y G_R^{NT} , utilizados para determinar M en función de los períodos de muestreo:

$$M^T = \frac{G_p^T G_R^T}{1 + G_p^T G_R^T} \quad (9)$$

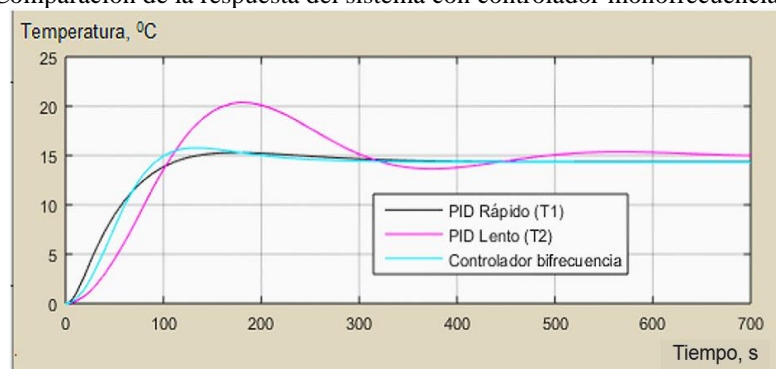
$$M^{NT} = \frac{G_p^{NT} G_R^{NT}}{1 + G_p^{NT} G_R^{NT}} \quad (10)$$

La aplicación del sistema MF debe permitir que ante una actualización de la entrada con frecuencia $1/T$, se pueda aplicar un controlador bifrecuencia de tipo PID para alcanzar similares rendimientos a los obtenidos cuando la salida es medida con un

tiempo de muestreo igual a NT. En la simulación será utilizado el procedimiento propuesto por Martínez (2004, p. 4), considerando los parámetros previos de ajuste del controlador obtenidos ($K_p = 0.2$, $D = 20$ y $I = 0.001$). Con las expresiones (5-8) se procede a determinar el PID bifrecuencia y en la gráfica de la figura 7, se muestra la respuesta del controlador bifrecuencia con un comportamiento cercano al controlador rápido ($T= 10s$ y $N=4$), lo que coincide con los resultados obtenidos por Mascaróv et al (2005, p. 967) y Aranda et al (2018, p. 493).

El uso del modelo de PIDMF con dos frecuencias es válido para el tratamiento de sistemas multifrecuencia que presentan períodos de muestreos diferentes de sus variables. El análisis efectuado, con los tiempos de muestreo 40s y 10s, permitió comprobar como el tipo de muestreo puede repercutir en el deterioro de la variable controlada. La figura 7 permite comparar la señal de salida en presencia de controladores rápido, lento y bifrecuencia, mostrando que el diseño de reguladores multifrecuencia puede alcanzar con un muestreo de salida lento, los mismos rendimientos que el sistema de control con muestreo rápido. Como principal resultado se puede afirmar que es posible una aproximación del diseño del PID, basada en el comportamiento del proceso controlado, de forma rápida y lenta a través del controlador bifrecuencia.

FIGURA 7- Comparación de la respuesta del sistema con controlador monofrecuencia y bifrecuencia.



FUENTE: Autores, 2020.

También se debe señalar que la carga computacional del controlador se homogeniza para todas las iteraciones y se logra reducir su utilización, mejorando el desempeño, al tener un modo lento en las iteraciones que no realiza cálculo, resultados que coinciden con los obtenidos por Sandoval y Salt (2011, p.177). El tener un control eficaz de la temperatura contribuye significativamente a la eficiencia energética, al tener implícitos factores como la condición de variabilidad climática de la zona, la adaptabilidad del control a las condiciones climáticas del interior del invernadero en

función del tipo de cultivo, la época del año y la regulación correcta de la climatización, lo que permite que el productor sea más competitivo y amigable con el medio ambiente a través de la optimización energética del invernadero.

4 CONCLUSIONES

A partir de la revisión bibliográfica, se establece que el diseño de reguladores multifrecuencia permite alcanzar rendimientos similares al sistema con muestreo rápido. Esto se logra con una aproximación del diseño del PID que utiliza el comportamiento del proceso controlado de forma rápida y lenta con diferentes períodos de muestro. Hoy el desarrollo de los sistemas de control con computadores ha puesto de manifiesto la importancia que tiene el utilizar un regulador bifrecuencia para el control de los sistemas multifrecuencia.

El diseño del regulador bifrecuencia con la técnica utilizada para lograr la operación del lazo de control con dos frecuencias de muestreo, una lenta para la medición de la salida del proceso controlado y otra que es un número entero de N veces más rápido para producir la señal que es aplicada al actuador, tiene un desempeño semejante al logrado por el regulador PID monofrecuencia que opera con un período de muestreo rápido. La mejora del controlador con esta técnica va a influir en la competitividad y eficiencia energética del invernadero al permitir un control correcto de la climatización que es más amigable con el medio ambiente.

REFERÊNCIAS

Aranda, E. E., Salt, J., Guinaldo, M., Chacón, J., Vargas, H., Dormido, S. (2018). Optimización en sistemas de control multifrecuencia. *XXXIX Jornadas de Automática. Universidad de Extremadura*. Badajoz. España.

Berni J. M. A., Soares V. A., Gonçalves, G. J., Rodrigo, M. M., Galante L. D., Gustavo Vendrame G. B., Breganon, R. (2020). Implementação de um Controlador Fuzzy para Controle de Temperatura. *Brazilian Journal of Development*. V. 6. No. 6, p.38233.

Lorenzo P. (2012). El cultivo en invernadero y su relación con el clima. Cuadernos de Estudios Agroalimentarios, pp. 23-44.

Bellón, H. O. (2013). Deducción y Validación de un Modelo Dinámico de la Transferencia Térmica en un Invernadero a Escala. *Conference: Engineering, Mechatronics and Automation (CIIMA). II International Congress*, Bogota. Colombia. Vol. 1. DOI:10.1109/CIIMA.2013.6682774

Martínez J. P., Farias. K., Ruiz R. (2020). Importancia del control de variables ambientales en invernaderos para la producción de hortalizas. INIA. Instituto de investigaciones agropecuarias, Informativo N° 36, año 2020. Disponible en: <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/123456789/67176/NR42416.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Accesado: último acceso: 24/05/2021.

Martínez V. J. (2004), Control adaptivo. MTIT. Disponible en: <https://es.slideshare.net/balzasbravas/control-adaptativo>. Accesado: último acceso 24/05/2021.

Kosut, J. (2010). Modelo dinámico de invernadero con acumulación de energía sensible. *Fundamentos de Energía Solar Térmica*. Universidad de Uruguay. Dpto. Termodinámica aplicada. Disponible en: https://www.fing.edu.uy/sites/default/files/2011/4400/J_Kosut_Modelo_Invernadero-v1.pdf. Accesado: último acceso 24/05/2021.

Castañeda, R., Herrera, G., García E. J. (2003). Modelación Física de un invernadero para el Desarrollo de un Sistema de Control Climático. *Naturaleza y Desarrollo*. Vol. 1. N. 2.

Guzmán, C. R., Castañeda, M. R., García, E. J., Lara, H. A., Serroukh, I., Solis, S. L. O. (2010). Algoritmos genéticos para la calibración del modelo climático de un invernadero. *Rev. Chapingo Ser. Hortic*, vol.16 No.1.

Marrero, R. S., González, P. I., Vázquez, T. F., Suarez, V. R. (2017). Aplicación de la descomposición en frecuencia de la tarea de control y el PID multifrecuencia. *II Congreso Internacional de Electromecánica y Eléctrica*. CIDE. Ecuador, Latacunga.

Bellon, H. O., Soto, H. A., Rodríguez, L. E. (2016). Diseño y simulación de un controlador en tiempo discreto para regulación de temperatura en un invernadero a escala. *Prospectiva*. Vol. 14, No. 1, pp. 80 – 88. <https://doi.org/10.15665/rp.v14i1.646>.

Ramos, F. J., Márquez, V. M., Cerecero, N. L., Lafont, F., Balmat J. F. (2015). Modelado difuso Takagi-Sugeno para sintonizar un controlador por calefacción en un invernadero. *Research in Computing Science*, 92.

Piñon, S., Pena, M. Camacho, E. (2002). Control predictivo robusto. Aplicación al control de temperatura de un invernadero. *XXIII Jornada de Automática*. CEA. España.

Machaca, C. J. C. (2018). Control predicativo multivariable y su eficiencia en la optimización del clima de un invernadero. Universidad nacional de San Agustín de Arequipa. *Tesis de maestría*. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/6200>.

Pawlowski, A., Guzmán, J. L., Rodríguez, F., Berenguel, M., Normey, J. E. (2011). Predictive Control with Disturbance Forecasting for Greenhouse Diurnal Temperature Control. *Proceedings of the 18th World Congress The International Federation of Automatic Control*, Milano, Italia.

Sánchez, C. S. (2016). Diseño de controlador multifrecuencia basado en eventos para ahorro computacional y energético. *Tesis de maestría en ingeniería Industrial*. Universidad Politécnica de Valencia. Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/73013?show=full>. Accesado 2020.

Velez, C. M., Salt, J. (2000). Simulation of irregular multirate systems. *Proceedings of 8th Symposium of computer aided control system design*, Salford (Gran Bretaña).

Sanchez, J., Guarnes, M. A., Dormido, S. (2009). On the application of different Event-Based sampling strategies to the control of a simple Industrial Process. *Rev. Sensors*. N 9.

Alfonsi, S. A., Yáñez, M. C., Pérez, R. J. (2017). Distribución del tiempo ocioso orientado al ahorro de energía en tareas de control de tiempo real. *Revista Ciencia e Ingeniería*. Vol. 38, No. 2 pp. 159-166, 2.

Cuesta, A., Grau, L., López, I. (2007). Control de sistemas multi-rate con reguladores PID. *Conferencia Iberoamericana en Sistemas, Cibernética e Informática - CИСCI'07*. Orlando, Florida, USA.

Cuesta, I. A., Grau, F. L. (2004). Modelado de reguladores PID multifrecuencia. *XXV Jornadas de Automática*. Ciudad Real. Septiembre. España.

Dormido, S., Sánchez, J., Kofman, E. (2008). Muestreo, control y comunicación basados en eventos. *Rev. Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*. Vol. 5. Num 1.

Heemels, M., Johansson, K. H., Tabuada, P. (2015). Event-triggered and Self-triggered Control. "Encyclopedia of Systems and Control (J. Baillieul and Samad, T. - Eds.) doi: 10.1007/978-1-4471-5058-9_97", Springer, p. 384-391

Mascarós, V., Casanova, V., Salt, J. (2005). Implementación de controladores monofrecuencia y bifrecuencia en un sistema de control basado en red Profibus-DP, *XXVI Jornadas de Automática*, pp. 965-974. Alicante. Elche, España.

Salt L. J., Cuenca A., Albertos P. (2011). Diseño de reguladores PID bifrecuencia con muestreo no convencional: Estudio comparativo. XXIII Jornadas Ceautomatica. Universidad Politécnica de Valencia. España. Disponible en: https://intranet.ceautomatica.es/old/actividades/jornadas/XXIII/documentos/ja02_029.pdf. Acceso en: último acceso el 24 de mayo de 2021.

Sandoval, G. J., Salt, L. J. (2011). Diseño de regulador bifrecuencia mediante compensación de tipo adelanto-atraso de fase. Ingeniería, *Revista Académica de la FI-UADY*, 15-3, pp 177-187.

Ahorro y Eficiencia Energética en Invernaderos. IDAE. (2008). Disponible en: https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10995_Agr07_AyEE_en_invernaderos_A2008_9e4c63f5.pdf. Accesado en: 17 de mayo 2021.

Seborg, D. E. (1994). A Perspective on Advanced Strategies for Process Control. *Modeling, Identification and Control*, v.15, n.3, p 179-189.

Seborg, D. E., Edgar, T.F., Mellichamp, D.A. (1989). Process Dynamics and Control. *John Wiley & Sons*. New York.

Morilla, F. G. (2007). El controlador PID. Dpto. de Informática y Automática ETSI de Informática, UNE. Disponible en: http://www.dia.uned.es/~fmorilla/Web_FMorilla_Julio_2013/MaterialDidactico/El%20controlador%20PID.pdf. Accesado en: 25 de mayo de 2021.