
Real time QFT controller for humidity and temperature in greenhouse

Rafael Augusto Núñez Rodríguez ^a, Álvaro Olachica Torres ^b

^a Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, Unidades Tecnológicas de Santander, Bucaramanga. Colombia, rrodriguez@correo.uts.edu.co

^b Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, Unidades Tecnológicas de Santander, Bucaramanga. Colombia, alvaro123@gmail.com

Abstract

This paper presents the design of the real-time multivariable QFT controller from a decoupling network to control humidity and temperature in a scale greenhouse. It is based on a correlational investigation with a quantitative approach, since it describes and analyzes the dynamic behavior of the system in the face of temperature and humidity changes under external disturbances and parametric variation of the system. The black box type system identification method is used, when establishing a transfer function based on the process input and output variables. The system uses a thermistor as a temperature sensor and a HIH 4030 relative humidity sensor for analogue data collection of process variables, such as actuators using a heater and a humidifier type ultrasonic mist, which will generate the required temperature and humidity for the greenhouse. Digital data acquisition is done through the National Instrument® PCI 6014 data acquisition generated within the system through tests that are run in the greenhouse from a Matlab® Simulink model. The control performance has a dynamic control response with 1% error in steady state, control action <1% and settling time close to 1100 s for temperature and 1000 s for relative humidity.

Keywords: MIMO control, QFT control, invernadero, redes de desacoplo.

Controlador QFT en tiempo real para la humedad y temperatura en el invernadero

Resumen

En este artículo se presenta el diseño un controlador QFT multivariable en tiempo real a partir de una red de desacoplo para controlar la humedad y temperatura en un invernadero a escala. Se basa en una investigación correlacional con enfoque cuantitativo, dado que se describe y analiza el comportamiento dinámico del sistema ante cambios de temperatura y humedad bajo perturbaciones externas y variación paramétrica del sistema. Se emplea el método de identificación de sistema tipo caja negra, al establecer una función de transferencia a partir de las variables de entrada y salida del proceso. El sistema emplea un termistor como sensor de temperatura y un sensor de humedad relativa HIH 4030 para la toma de datos analógicos de las variables del proceso, como actuadores se utiliza un calefactor y un humidificador tipo niebla ultrasónico, que generarán la temperatura y la humedad requerida para el invernadero. La adquisición de datos digital se realiza mediante la tarjeta PCI 6014 de la National Instrument® para la toma datos generados dentro del sistema mediante pruebas que se ejecuten en el invernadero a partir de un modelo de Simulink de Matlab®. El desempeño de control tiene una respuesta dinámica de control con 1% de error en estado estable, acción de control < 1% y tiempo de establecimiento cercano a los 1100 s para temperatura y 1000 s para humedad relativa.

Palabras clave: Control MIMO, Control QFT, invernaderos, Redes de desacoplo.

1 Introducción

Actualmente la demanda de productos orgánicos ha crecido a nivel mundial, por lo que las estrategias de agricultura se han optimizado para suplir las necesidades del mercado (Tumbaco & Daniela, 2017), la evolución de la agricultura se ha basado en el uso de herramientas tecnológicas que permiten generar un clima adecuado según el cultivo que se desarrolla en el campo, es por esto que la producción de alimentos en invernaderos con variables ambientales controladas a través de sistemas electrónicos ha tomado gran fuerza como una solución a la gran problemática que existe en el mundo y es el calentamiento global (Montero & Cecilia, 2008). Las variables controladas dentro de los invernaderos son: humedad relativa, temperatura, Co₂, entre otros. Las

estrategias utilizadas actualmente para la producción de alimentos en alto rendimiento se deben a los diseños de controladores PID, QFT, Fuzzy, entre otros. Esos sistemas de control permiten optimizar el clima adecuado según la necesidad del cultivo que se esté sembrando, los algoritmos también hacen parte de estas estrategias ya que permiten realizar cálculos matemáticos para minimizar el error y mantenerlo lo más cercano a cero (Ramón & Rodríguez, 2015). Para mejorar la eficiencia de los cultivos en invernadero se han realizado diseños experimentales de estrategias de control digital maniobrando la generación de temperatura y humedad relativa que permita suplir la demanda estándar de clima según el cultivo (Yingchun & Yue, 2010). El análisis de la documentación existente en el área de los invernaderos permite dar una visión real de las

falencias que se tienen en los controladores clásicos. Existen varias técnicas de controladores entre los que se analizan controladores multivariable para invernaderos (Giraldo, Castaño, Flesch, & Normey-Rico, 2016), sistemas de control PID-Fuzzy adaptativos (Heidari, 2017), entre otros.

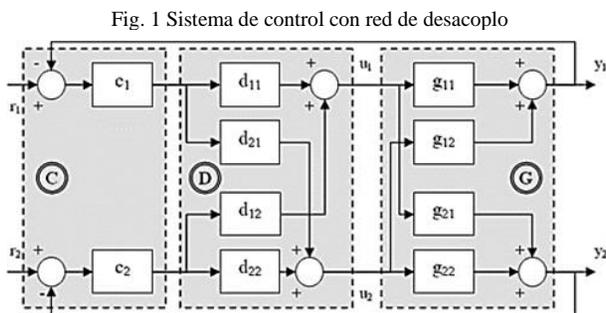
El desarrollo del proyecto permitió implementar un control robusto con la teoría de realimentación cuantitativa QFT con redes de desacoplo para sistemas MIMO 2x2, donde se controlarán las variables humedad relativa y temperatura de forma independiente. El proceso de modelamiento se ejecutó mediante pruebas experimentales en la planta obteniendo información base para diseñar el modelo matemático de la planta con la respectiva variación paramétrica. Con la información obtenida del diseño se propone verificar la estabilidad del sistema y el comportamiento del controlador ante perturbaciones externas, minimizar el esfuerzo de la acción de control, rechazo ante perturbaciones externas, manteniendo bajo sobrepaso y minimizar el tiempo de establecimiento acorde al sistema.

2. Diseño del Controlador QFT MIMO

2.1 Red de desacoplo.

Se utilizó la técnica por desacoplo lineal la cual, de una combinación de variables manipuladas, donde el desacoplamiento es una matriz de funciones de transferencia $D(s)$ diseñada de tal forma que la combinación del proceso más el desacoplo mantenga los lazos de control como si fueran independientes, en busca de eliminar completamente la interacción, se determina que el desacoplo perfecto es dado por el proceso descrito por la matriz de funciones de transferencia $G(s)$ para encontrar la matriz $D(s)$, tal que el conjunto formado por el compensador y el proceso se denota como $Q(s)$, resultante en una matriz diagonal, tal como se muestra en la ecuación(1).

$$G(s)D(s) = Q(s) = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & q_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & q_n \end{bmatrix} \quad (1)$$



Así pues, se debe encontrar e implementar la red de desacoplo $D(s)$, donde cada elemento $d_{ij}(s)$ está asociado a un elemento de la matriz $D(s)$, obteniendo de esta manera un

desacoplo convencional o desacoplo directo como se muestra en la figura 1, donde obviamos el operador s de Laplace por comodidad, permitiéndole al controlador viajar hacia las entradas del sistema $G(s)$ de forma directa a través elementos $d_{ij}(s)$. Donde el desacoplo convencional se obtuvo a partir de esta ecuación (2).

$$D(s) = G(s)^{-1}Q(s) \quad (2)$$

Para el proceso 2x2 se tiene dos grados de libertad que se utilizan para fijar dos elementos de desacoplamiento de $D(s)$, nuevamente obviamos el operador s de Laplace por comodidad, la matriz resultante también es un sistema 2x2 tal como se muestra en la ecuación (3).

$$Q(s) = \begin{pmatrix} g_{11}d_{11} + g_{12}d_{21} & g_{11}d_{12} + g_{12}d_{22} \\ g_{21}d_{11} + g_{22}d_{21} & g_{21}d_{12} + g_{22}d_{22} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Y para que el desacoplo sea perfecto a todas las frecuencias hay que anular los términos de afuera de la diagonal de $Q(s)$, luego se usan los dos grados de libertad para igualarlos a cero, vistos en las ecuaciones (4) y (5).

$$g_{21}d_{11} + g_{22}d_{21} = 0 \quad (4)$$

$$g_{11}d_{12} + g_{12}d_{22} = 0 \quad (5)$$

Un procedimiento habitual que ha recibido considerable atención en la teoría de control como en la práctica industrial es el desacoplo simplificado que consiste en fijar los elementos de la diagonal de $D(s)$ en la ecuación (6), a la unidad (jurado, 2012), obteniendo el proceso de la figura 2.

$$D(s) = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{g_{12}}{g_{11}} \\ -\frac{g_{21}}{g_{22}} & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Así, el modelo equivalente desacoplado queda tal como se muestre en la siguiente ecuación (7).

$$Q(s) = G(s)D(s) = \begin{bmatrix} g_{11} - \frac{g_{21}g_{12}}{g_{22}} & 0 \\ 0 & g_{22} - \frac{g_{21}g_{12}}{g_{11}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

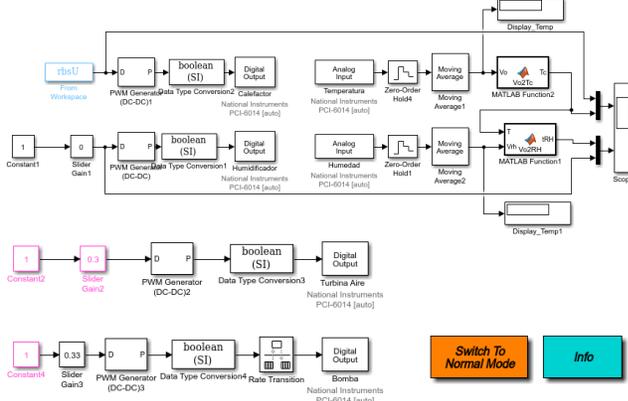
Esta matriz equivale a las plantas desacopladas dando como resultado en su diagonal principal la planta equivalente a calefactor-temperatura y a la planta humidificador-humedad (Ajit K, 2006).

2.2 Identificación del Sistema

Antes del proceso de identificación se tuvo en cuenta que al tratar de controlar la temperatura y la humedad dentro de un prototipo se tienen cuatro relaciones debido a que el

calefactor y el humidificador, que son los actuadores del sistema, tiene un fuerte acople. Partiendo de lo anterior, se diseñó un modelo con la ayuda de la herramienta Simulink en el entorno de Matlab® para la toma de datos con el fin de identificar cada modelo. El modelo que se diseñó para la toma de datos es el que se observa en la figura 2, los resultados obtenidos fueron llevados a la *System Identification Toolbox* de Matlab®, donde finalmente se obtuvieron los diferentes modelos matemáticos para cada una de las cuatro relaciones.

Figura 2. Modelo de identificación para el calefactor



En (8) se muestra el modelo típico de la respuesta dinámica de la humedad y temperatura al interior del invernadero. Los cuatro modelos matemáticos identificados relacionan el ciclo útil aplicado a los actuadores del sistema y la variación de humedad y temperatura para combinación entrada-salida del sistema. El primer modelo relaciona el sistema de calefacción con la variable temperatura $[T^\circ]$, G_{11} , el segundo modelo relaciona el sistema de calefacción con la variable humedad $[\%RH]$, G_{12} , el tercer modelo relaciona el sistema de humidificación con la variable humedad, G_{21} y el cuarto modelo relaciona el sistema de humidificación con la variable temperatura, G_{22} .

$$G(s) = \frac{Kp}{1 + Tp1 * s} * \exp(-Td * s) \quad (8)$$

Tabla I. Parámetros del sistema MIMO

Parámetros	G_{11}	G_{12}	G_{21}	G_{22}
Kp	28.651	-21.794	114.77	-19.642
$Tp1$	89.643	62.49	15.893	75.568
Td	6.695	16.823	4.384	6.261

Con los parámetros de la Tabla I, finalmente se aplica la técnica del desacoplo simplificado con el fin de reducir afectaciones entre variables,

$$D = \begin{bmatrix} 1 & G_{12}/G_{11} \\ G_{21}/G_{22} & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

De (9), se obtiene la planta equivalente Q tal como se muestra en (10) y (11).

$$Q = G * D \quad (10)$$

$$Q(s) = \begin{pmatrix} \frac{0.3341}{s + 0.01253} & 0 \\ 0 & \frac{5.401 s + 0.05187}{s^2 + 0.05675 s + 0.0004961} \end{pmatrix} \quad (11)$$

2.3 Diseño del controlador QFT

Dado que el invernadero es sometido a perturbaciones externas y presenta variación en los parámetros a causa de las diferentes condiciones ambientales, se definieron dos especificaciones de desempeño basados en la estabilidad robusta mínima recomendada de $5dB$ en ganancia y 45° de fase (Martínez, 2001) dada en (12), y en el rechazo de perturbaciones de carga en la temperatura al interior del invernadero dada en (13).

$$\left| \frac{y}{r} \right| = \left| \frac{L(j\omega)}{1 + L(j\omega)} \right| < \delta_u(\omega) \quad (12)$$

$$\left| \frac{y}{d} \right| = \left| \frac{1}{1 + L(j\omega)} \right| < \delta_s(\omega) \quad (13)$$

Se cuantificaron los parámetros $\delta_u(\omega)$ y $\delta_s(\omega)$, bien sea como constantes o a partir de funciones de transferencia que representen la dinámica deseada de la planta en lazo cerrado (Houpis, Sheldon, & D'Azzo, 2003). El criterio de estabilidad robusta se definió con $\delta_u(\omega) = 1.3$. El rechazo de perturbaciones del invernadero, se definió a partir del parámetro $\delta_s(\omega)$ dado por (14) (Elso, Martínez, & García-Sanz, 2017). Éste se definió como una función de transferencia que representa la dinámica deseada de la planta ante una perturbación. Por lo tanto, se escogió un tiempo de establecimiento de $1100 s$ para la salida ante una perturbación tipo escalón, como condicionante de la función de sensibilidad del sistema. Para definir la función de transferencia $\delta_s(\omega)$, se aplicó el método de asignación de polos (Houpis, Sheldon, & D'Azzo, 2003).

$$\delta_s(\omega) = \frac{s^2 + 0.002554 s}{s^2 + 0.005108 s + 6.533 \times 10^{-6}} \quad (14)$$

Se debe conseguir una $L(j\omega)$ que cumpla las desigualdades establecidas en las especificaciones de desempeño, donde $L(j\omega) = G(j\omega)P(j\omega)$, a partir de las especificaciones de desempeño del controlador dadas en (12) y (13) y de las funciones de transferencia que representan los parámetros $\delta_u(\omega)$, $\delta_s(\omega)$. Así, el problema de control se centró en determinar un controlador $G(j\omega)$ único, que cumpla con todas las especificaciones de desempeño establecidas a partir de la planta con incertidumbre $P(j\omega)$ en el rango de frecuencias de interés (Gil-Martínez & García-Sanz, 2003). Para resolver el problema de control, se planteó una

inecuación cuadrática por cada especificación de desempeño (Chait & Yaniv, 1993), tal como se muestra en (16) y (16).

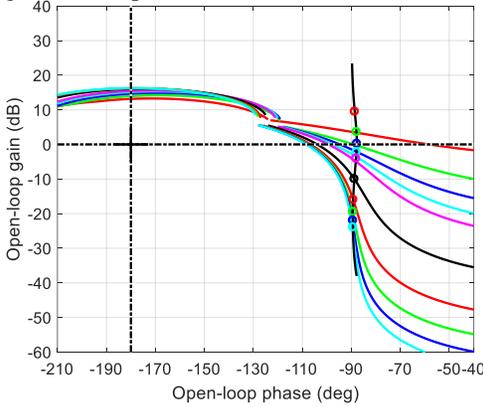
$$p^2 \left(1 - \frac{1}{\delta_u^2}\right) g^2 + 2p \cos(\phi + \theta) g \geq 0 \quad (15)$$

$$p^2 g^2 + 2p \cos(\phi + \theta) g + \left(1 - \frac{1}{\delta_s^2}\right) \geq 0 \quad (16)$$

El sistema de ecuaciones se resolvió a partir de métodos iterativos de acuerdo con el algoritmo propuesto por Chait *et al* (Chait & Yaniv, 1993), donde g equivale a la representación polar del controlador y p representa la forma polar de la planta nominal del lazo L_o . Cada raíz del sistema de inequaciones cuadráticas representa un lugar en el diagrama de Nichols, para las n frecuencias de interés y la planta nominal, donde se generan n cantidad de puntos los cuales representan los contornos de cada especificación.

La técnica *loop-shaping* introduce un controlador $G(s)$ que modifica la función de lazo L_o hasta lograr cumplir con las restricciones impuestas por los contornos de las especificaciones de desempeño, de manera que el único controlador $ge^{j\phi}$ que cumple es aquel que consigue llevar la función del lazo L_o sobre los contornos de cada especificación (Gil-Martínez & García-Sanz, 2003). En la figura 3 se muestra la respuesta de L_o en la frecuencia de interés. Esto se logró con la adición de polos y ceros a la función de lazo L_o hasta conseguir la respuesta deseada (Martínez, 2001). La función de transferencia del controlador QFT está dada por (17) y (18)

Figura 3. Respuesta del Controlador QFT con L_o



$$C_T = \frac{0.1186 s + 0.0009909}{s^2 + 0.3197 s} \quad (17)$$

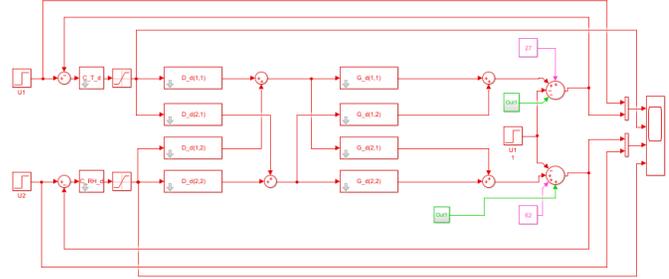
$$C_{HR} = \frac{0.08101 s^2 + 0.001433 s + 4.636e - 06}{s^2 + 0.005066 s} \quad (18)$$

3. Implementación del controlador QFT MIMO

Teniendo el modelo matemático del controlador PID MIMO por desacople, se implementa a través de *Simulink Desktop*

Real-Time Toolbox de Matlab®, utilizando el diagrama de bloques que se muestra en la figura 4. Esta herramienta permite realizar procedimientos de modelado e implementación en tiempo real a través de la tarjeta de adquisición de datos PCI 6014, de igual forma, se realiza la toma de datos y la validación del controlador diseñado.

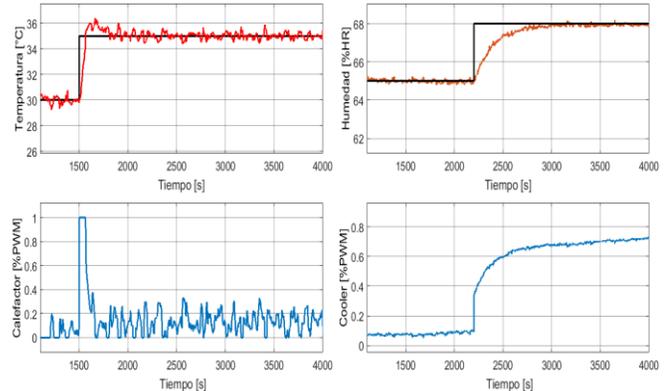
Figura 4. Modelo en Tiempo Real del Controlador PID MIMO



En el diagrama de la figura 4 se observan las entradas analógicas que leen la información de los sensores de humedad y temperatura, las salidas digitales que transmiten la señal de control codificada en una señal PWM tanto para el calefactor como para el motor del humidificador. Por otra parte, se observa el sistema de desacople y los lazos de control PID de humedad y temperatura desacoplados. Adicional, se configuraron dos salidas digitales, una encargada de accionar la turbina que hace recircular el aire al interior del invernadero, con el fin de que no se sature la humedad al interior del mismo. De igual forma, se gestiona el humidificador ultrasónico a partir de una segunda salida digital.

Ya teniendo el modelo en tiempo real, con las respectivas conexiones a los actuadores y sensores del invernadero, se procede a realizar pruebas para diferentes puntos de consigna de temperatura y humedad, los cuales permiten validar la respuesta del controlador QFT MIMO por desacople a partir de índices de desempeño tales como tiempo de establecimiento, sobrepaso y error en estado estable.

Figura 5. Respuesta del controlador de Temperatura y Humedad para 35°C y 68%



Se realizó una prueba para analizar la respuesta transitoria fue con una referencia para la temperatura de 35°C y para la humedad de 68%. La respuesta del sistema se observa en la figura 5. En ésta el sistema de temperatura tiene un tiempo de establecimiento cercano a los 350 s con un sobrepaso inferior al 8%, mientras la humedad presenta un tiempo de establecimiento del 690 s sin sobrepaso. La señal de control del controlador de temperatura se satura mientras alcanza la referencia, mientras que el controlador de humedad se mantiene cercana al 80% de ciclo útil de la señal PWM aplicada.

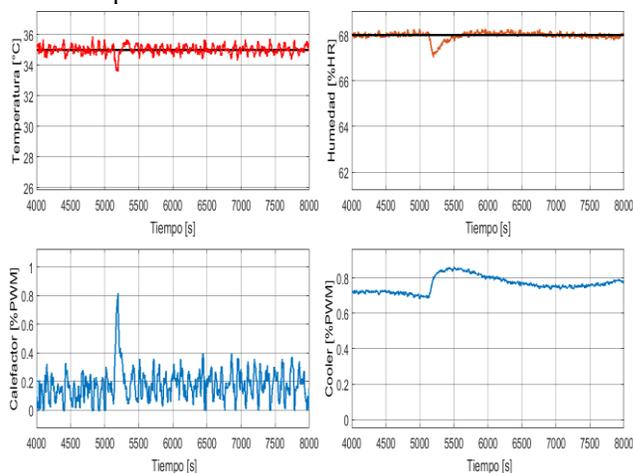
4. Resultados

Se realizaron pruebas de perturbación al sistema con el fin de observar la respuesta dinámica de controlador con mecanismo de desacople. En este caso se realizó un cambio abrupto de la velocidad de la turbina del invernadero, de manera que circulara aire externo. Esto ocasiona un cambio en las condiciones del micro clima del invernadero afectando la temperatura y la humedad del mismo. Se analizó la respuesta transitoria ante una perturbación con una referencia para la temperatura de 35°C y para la humedad del 65%. La respuesta del sistema se observa en la Figura 6. Se observa que el sistema de temperatura tarda 300 s en estabilizarse luego de perturbación aplicada a los 5100 s. El sistema de control de humedad tarda cerca de 300 s en compensar la perturbación de carga. La señal de control del controlador de temperatura pasa del 20% al 28% aproximadamente, mientras que el controlador de humedad se mantiene cercana al 85% de ciclo útil de la señal PWM, tal como se observa en la tabla II.

Tabla II Índices de desempeño controlador QFT MIMO Perturbación

Índice de Desempeño	35 °C	68 %HR
Tiempo Establecimiento	1000 s	300 s
Error Régimen Permanente	0.2°C	0.5%

Figura 6. Respuesta del controlador de Temperatura y Humedad perturbación



Para evaluar el nivel de desempeño del controlador, se evalúan los índices de sobrepaso, tiempo de establecimiento y el error en estado estable, plasmados en la tabla III y la tabla IV.

Tabla III Índices de desempeño controlador QFT MIMO Primera Prueba

Índice de Desempeño	30 °C	68% RH
Sobrepaso	<1%	0%
Tiempo Establecimiento	1000 s	220 s
Error Régimen Permanente	0.2°C	0.1%

Tabla IIIV Índices de desempeño controlador QFT MIMO Segunda Prueba

Índice de Desempeño	35 °C	68 %HR
Sobrepaso	<1%	0%
Tiempo Establecimiento	3000 s	3500 s
Error Régimen Permanente	0.2°C	0.8%

Los índices de desempeño para cada una de las pruebas realizadas demuestran que la técnica de desacoplo adoptada permiten diseñar controladores desacoplados para variables con fuerte interacción, tal como la humedad y temperatura. Así, se logró implementar un controlador QFT con redes de desacoplo con buenos índices de desempeño tanto en la respuesta transitoria como en la respuesta en régimen permanente.

5. Conclusiones

El mecanismo de desacople simplificado permitió desacoplar las variables humedad y temperatura, logrando así diseñar un controlador de temperatura y un controlador de humedad descentralizado con buenos índices de desempeño tanto en la respuesta transitoria como en régimen permanente.

El análisis de perturbación demostró que el controlador de humedad y temperatura desacoplado, es robusto ante cambios abruptos e las condiciones climáticas al interior del invernadero, logrando un buen desempeño y esfuerzo reducido de la señal de control.

La implementación de la herramienta *Real-Time Toolbox*, permite agilizar el proceso de implementación y validación de un controlador, en aras de mejorar los índices de desempeño y los tiempos para su diseño y con el objeto de crear un sistema empotrado con capacidad para migrar y ser implementado en cualquier proceso embebido.

6. Referencias

Ajit K, M. (2006). *Introduction to Control Engineering Modeling, Analysis and Desing*. NEW AGE INTERNATIONAL PUBLISHERS.

- Chait, Y., & Yaniv, O. (1993). Multi-Input/Single-Output Computer-Aided Control Design Using the Quantitative Feedback Theory. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 1(3), 47-54. Obtenido de <https://doi.org/10.1002/rnc.4590030103>
- Elso, J., Martínez, M. G., & Garcia-Sanz, M. (2017). Quantitative Feedback Control for Multivariable Model Matching and Disturbance Rejection. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 1(27), 121-134. Obtenido de <https://doi.org/10.1002/rnc.3563>
- Gil-Martínez, M., & García-Sanz, M. (2003). Simultaneous meeting of robust control specifications in QFT. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 7(13), 643-656. Obtenido de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/rnc.830>
- Giraldo, S. A., Castaño, R. C., Flesch, C., & Normey-Rico, J. E. (2016). Multivariable Greenhouse Control Using the Filtered Smith Predictor. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 27(4), 349-358. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s40313-016-0250-6>
- Heidari, M. (2017). Climate Control of An Agricultural Greenhouse by Using Fuzzy Logic Self-Tuning PID Approach. *Proceedings of the 23rd International Conference on Automation & Computing, University of Huddersfield*.
- Houpis, C. H., Sheldon, S. N., & D'Azzo, J. J. (2003). *Linear Control System Analysis and Design: Fifth Edition*. London: Revised and Expanded.
- jurado, j. g. (2012). *diseño de sistemas de control multivariable por desacoplo con controladores PID*. madrid.
- Martínez, M. G. (2001). Síntesis de controladores robustos mediante el análisis de la compatibilidad de especificaciones e incertidumbre. *Tesis de Grado-Universidad Pública de Navarra*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=17821>
- Montero, J., & Cecilia, S. (2008). *Invernadero para la España: Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentaries de Cabrils*.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de Control Moderna*. Madrid: pearson.
- Ramón, G., & Rodríguez, F. (2015). *ALGORITMO DE NAVEGACIÓN REACTIVA DE ROBOTS*. España: Universidad de Almería.
- Tumbaco, á., & Daniela, B. (2017). *Optimización del proceso productivo para incrementar la Utilidad en Mundo Verde*. Guayaquil, Ecuador: Universidad de Guayaquil Facultad de Ciencias Administrativas.
- Yingchun, K., & Yue, S. (2010). A Greenhouse Temperature and Humidity Controller Based on MIMO Fuzzy System. *International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application*(1), 35-39. Obtenido de <https://doi.org/10.1109/ISDEA.2010.80>