

*Relative humidity control in agricultural greenhouse
by Fuzzy self-tuning PI controllers*

Control de humedad relativa en invernadero agrícola
mediante el autoajuste difuso controladores PI

Rafael A. Núñez¹, Carlos L. Corzo², Andrea C. González³

¹rrodriguez@correo.uts.edu.co, ²ccorzo@correo.uts.edu.co, ³agonzalez@correo.uts.edu.co

^{1, 2, 3}Unidades Tecnológicas de Santander. Bucaramanga, Colombia

Artículo de Investigación
Disciplina I^oNGENIO: Ingeniería Electrónica
Capítulo al que se envía: Investigación

Abstract

The climate in agricultural greenhouses presents a dynamic response with a strong set of variables, given that the multivariable systems of minimum phase with dead time are in a wide parametric because of the phenological stages of the crop and the environmental external climatic conditions. To mitigate the effect of disturbances, the design and implementation of Fuzzy Self-Tuning mechanism integral proportional controller (PI) is proposed. This control scheme allows a good response to parametric variation and change of operating point, rejection of disturbance at the output, stability and minimum effort in the control signal. The design of the controller was contrasted with a conventional PI controller based on performance indices, based on the transient response and the error in permanent regime, before changes in the point of operation and load disturbances at the output. The results obtained in the different tests showed that the dynamic response of the Fuzzy Self-Tuning PI controller improved the set-up time for the reference follow-up by 25% and the overshoot by 38% when compared to the controller results conventional PI.

Keywords: Fuzzy self-tuning, greenhouse, relative humidity, PID control, Adaptation mechanism.

Resumen

El clima en los invernaderos agrícolas presenta una respuesta dinámica con fuerte acople de variables, dado que son sistemas multivariable de fase no mínima con tiempo muerto sujeta a variación paramétrica a causa de las etapas fenológicas del cultivo y las condiciones climáticas externas medioambientales. Para mitigar el efecto de las perturbaciones se propone el diseño e implementación de un controlador proporcional integral (PI) con mecanismo de autoajuste difuso. Este esquema de control permite una buena respuesta ante variación paramétrica y cambio del punto de operación, rechazo de perturbación a la salida, estabilidad y mínimo esfuerzo en la señal de control. El diseño del controlador se contrastó con un controlador PI convencional a partir de índices de desempeño, basados en la respuesta transitoria y el error en régimen permanente, ante cambios en el punto de operación y perturbaciones de carga a la salida. Los resultados obtenidos en las diferentes pruebas mostraron que la respuesta dinámica del controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso mejoró en 25 % el tiempo de establecimiento para el seguimiento de referencia y 38% el sobrepaso ante perturbaciones de carga, en comparación con los resultados del controlador PI convencional.

Palabras clave: autoajuste difuso, invernadero, humedad relativa, control PID, mecanismo de adaptación.

1. Introducción

Un invernadero agrícola es una construcción específica que permite monitorear y mantener las condiciones climáticas óptimas para el desarrollo de cultivos [1]. El clima en los invernaderos agrícolas presenta una respuesta dinámica con fuerte acople de variables, dado que son sistemas multivariable de fase no mínima con tiempo muerto [2]. De igual forma, son procesos con una fuerte variación de parámetros dado que las etapas fenológicas del cultivo y las condiciones climáticas externas afectan el punto de operación del invernadero [3].

Para el control del clima en invernaderos se han utilizado técnicas de control con diferentes enfoques orientado a estrategias no lineales dada la naturaleza del proceso [4]. La humedad relativa y la temperatura al interior de un invernadero agrícola son variables con fuerte interacción [5], lo que implica la utilización de técnicas de control multivariable basadas en redes de desacople de variables [6], control adaptativo multivariable basado en lógica *Fuzzy* con realimentación linealizada [4]. Por otra parte, para mitigar los efectos del tiempo muerto en la respuesta dinámica del clima al interior del invernadero, se han utilizado esquemas tipo predictor de Smith acoplado a redes de linealización y desacople de variables [7], control PID con mecanismo de autoajuste basado en lógica *Fuzzy* [8], [9], e incluso, técnicas de control multivariable para la humedad y temperatura con predictor de Smith filtrado [10].

Para implementar el controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso, se identificó el modelo matemático que describe la dinámica de la humedad relativa al interior del invernadero utilizando técnicas de identificación tipo caja negra [11] (sección 2.1), cuya respuesta permitió establecer las especificaciones de desempeño para el diseño del mecanismo de autoajuste difuso que sintoniza los parámetros K_p y K_i del controlador PI [12], a partir de la *Fuzzy Logic Toolbox* de Matlab® (sección 2.2). El controlador fue implementado en una plataforma de 32 bits, lo que permitió realizar diferentes pruebas para validar la respuesta transitoria y análisis de rechazo de perturbación del controlador al igual que la convergencia de los parámetros K_p y K_i del controlador PI (sección 3). Finalmente, se plantearon conclusiones referentes al estudio realizado.

2. Materiales y Métodos

2.1 Identificación del modelo matemático

Se define un modelo matemático que relacione la variación de la humedad relativa del invernadero con el ciclo útil aplicado al convertidor DC-DC del sistema humidificador. En la Figura 1, se muestra el esquema del control PI con mecanismo de autoajuste difuso para sistemas con una entrada y una salida, *SISO* por su sigla en inglés, en el cual se modela la temperatura como una perturbación externa, dado que existe una fuerte interacción entre la humedad relativa y la temperatura al interior del invernadero [9].

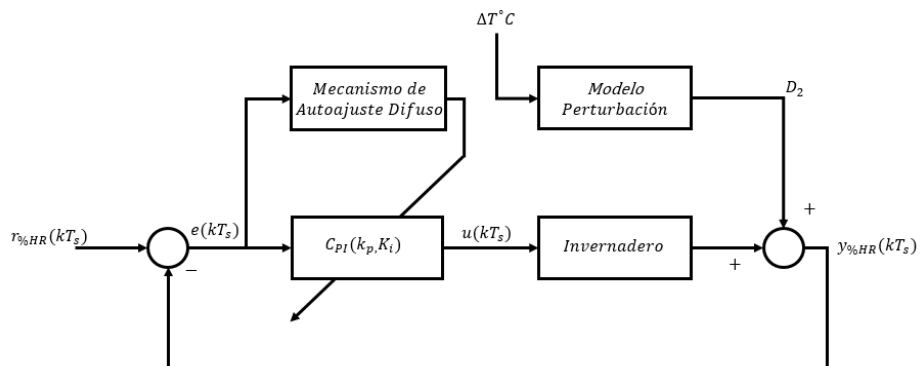


Figura 1 Esquema de control PI con mecanismo de autoajuste difuso para sistemas *SISO*

En la Figura 2, se muestra una señal de excitación binaria aleatoria (RBS) y la respuesta de la humedad relativa del sistema real. La señal RBS se configuró con una amplitud en el intervalo $[0.25, 0.5]$ del ciclo útil $[k]$ de la señal PWM, aplicado al convertidor DC-DC del humidificador, con un ancho de banda $BW = 0.00249 \text{ Hz}$, el cual se seleccionó a partir de la respuesta de la humedad relativa ante una entrada tipo escalón $u(t) = 0.5$ relacionada con el ciclo útil $[k]$ de la señal PWM. La frecuencia de muestreo fue $Fs = 1 \text{ Hz}$ y el número de muestras 6000. A partir de la *ToolBox System Identification* de MATLAB® [13], se identificó el modelo matemático a partir de señales entrada-salida del sistema experimental, de manera que se obtuvo una función de transferencia de primer orden más tiempo muerto con un *best fit* del 82%, tal como se muestra en la Ecuación (1). **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Se observa una ganancia estática $k = 28.05$, una constante de tiempo $\tau = 63.99 \text{ s}$ y un tiempo muerto $T_d = 31.14 \text{ s}$.

$$G(s) = \frac{k}{1 + \tau s} e^{-T_d s} \quad (1)$$

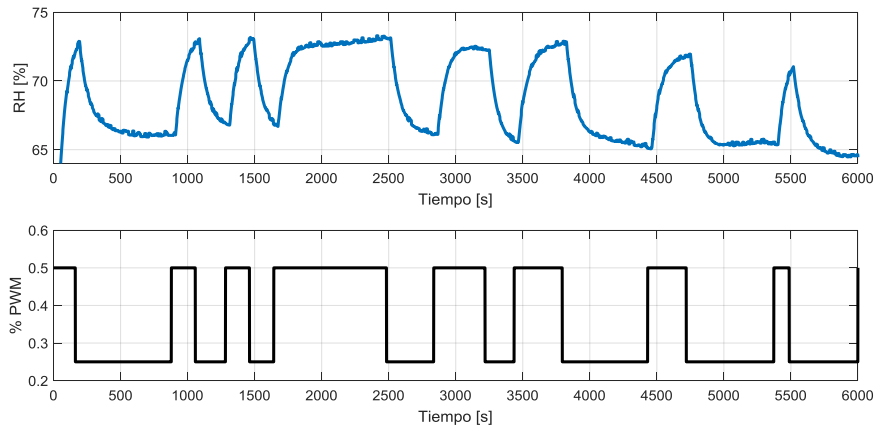


Figura 2 Señal RBS de excitación y respuesta de la humedad relativa del Sistema

En la Figura 3, se observa la validación de la respuesta del sistema identificado respecto al sistema real, con una aproximación cercana al 82%, lo que implica que el sistema identificado describe adecuadamente el comportamiento dinámico del sistema real en el punto de operación, comprendido entre el 60% y el 80% de humedad relativa al interior del invernadero.

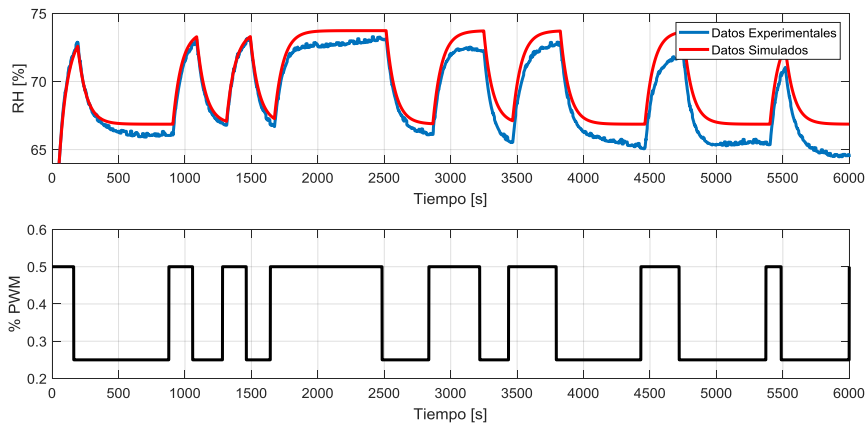


Figura 3 Respuesta de la humedad relativa del Sistema Real y Sistema Identificado

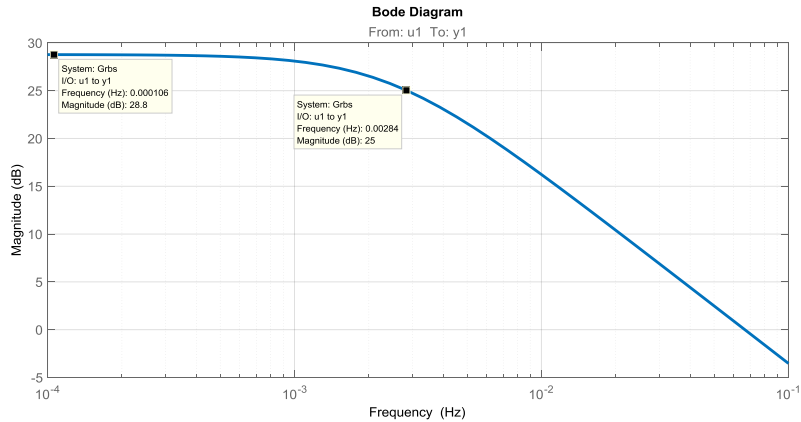


Figura 4 Diagrama de Bode del modelo identificado

Dado que se implementó un controlador digital, fue necesario definir el periodo de muestreo T_s , factor determinante en el desempeño y estabilidad del controlador [14]. En el diagrama de Bode de la Figura 4, se estima el ancho de banda del sistema $W_{BW} = 0.00284 \text{ Hz}$, por tanto, se seleccionó un periodo de muestreo $T_s = 1 \text{ s}$. Con esta frecuencia de muestreo, se convirtió a tiempo discreto la función de transferencia de la Ecuación (1), tal como se muestra en la Ecuación (2). La función de transferencia de la Ecuación (2), se tomó como planta para la construcción del modelo de simulación del controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso en el entorno de Simulink® de Matlab®.

$$G_d(z) = z^{-32} * \frac{0.3745z + 0.06048}{z - 0.9845} \quad (2)$$

2.2 Diseño del Controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso

La estructura del control está basado en un controlador PID acoplado a un motor de inferencia difusa que ajusta los parámetros K_p , K_i y K_d , del controlador a partir del error e y derivada del error \dot{e} del seguimiento de referencia [15]. En el diagrama de bloques de la Figura 1, se observa la etapa de autoajuste y la etapa del controlador PI, acoplado a la planta $G_d(z)$ que modela la humedad relativa al interior del invernadero. La salida del sistema $y_{\%HR}(kT_s)$ se compara con la referencia $r_{\%HR}(kT_s)$ a partir del lazo de realimentación para generar la señal de error. Dada la dinámica lenta de la planta de humedad relativa del invernadero, no fue necesario adicionar el componente derivativo, por tanto se estableció la ganancia derivativa $K_d = 0$, es decir, fue suficiente mantener la componente proporcional e integral para conseguir que la humedad del invernadero sea estable con un error en régimen permanente cercano a cero [16].

El motor de inferencia difusa del mecanismo de adaptación de los parámetros del controlador PI cuenta con dos entradas, una para el error e y otra para la derivada del error \dot{e} , con un universo del discurso en el intervalo $[-25, 25]$ para el error y $[-1, 1]$ para la derivada del error, tal como se muestra en la Figura 5. De igual forma se definieron dos salidas tipo *Singleton*, una salida para el ajuste de la constante proporcional ΔK_p y otra para el ajuste de la constante integral ΔK_i . Se utilizó salidas tipo *Singleton* con un sistema de inferencia difusa tipo Takagui-Sugeno, dado que presenta un mejor rendimiento en cuanto a coste computacional y rápida implementación en la plataforma de 32 bits [17]. Para las entradas se asumieron 5 variables lingüísticas representadas a partir de conjuntos triangulares, tal como se muestra en la Figura 5, definidas como Negativo Grande (NB), Negativo (N), cero (ZE), Positivo (P) y Positivo Grande (PB). Para las salidas, 5 niveles tipo singleton son definidos como Pequeño ($S = 0$), Medio-Pequeño ($MS = 0.25$), Medio ($M = 0.5$), Medio-Grande ($MB = 0.75$) y Grande ($B = 1$).

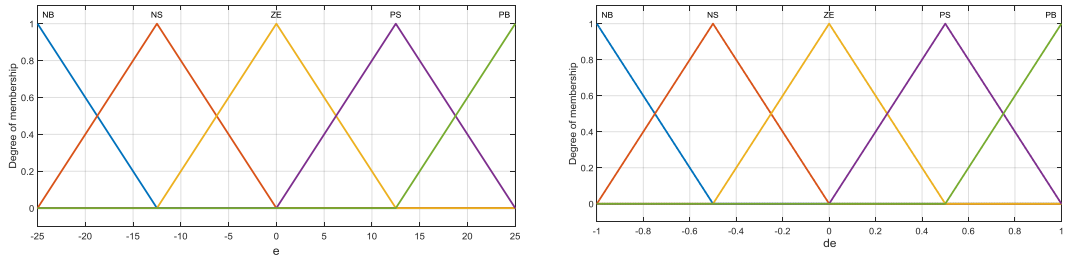


Figura 5 Conjuntos variables lingüística de entrada

La base de reglas del motor de inferencia difusa se muestra en la Tabla 1. Las reglas difusa han sido diseñadas con base en la experiencia orientada a la técnica de sintonización Ziegler-Nichols, lo que permite implementar un mecanismo de sintonización en tiempo real basado en lógica Fuzzy para el controlador PI [18].

Tabla 1 Base de reglas mecanismo ajuste de la constante proporcional ΔK_p y constante integral ΔK_i

		Parámetro ΔK_p					Parámetro ΔK_i						
\dot{e}	e	NB	N	ZE	P	PB	\dot{e}	e	NB	N	ZE	P	PB
NB		B	B	B	B	B	NB		M	M	M	M	M
N		MB	MB	MB	MB	MB	N		MS	MS	MS	MS	MS
ZE		S	S	MS	MS	MS	ZE		MS	MS	S	MS	MS
P		MB	MB	MB	M	M	P		MS	MS	MS	MS	MS
PB		B	B	B	B	B	PB		M	M	M	M	M

Para normalizar y garantizar la convergencia de los parámetros K_p y K_i , se define un intervalo de solución factible $[K_{p_{min}}, K_{p_{max}}]$ y $[K_{i_{min}}, K_{i_{max}}]$, a partir del cual se calculan las ganancias del controlador PI con base en la Ecuación (3) y la Ecuación (4) [15].

$$K_p = \Delta K_p (K_{p_{max}} - K_{p_{min}}) + K_{p_{min}} \quad (3)$$

$$K_i = \Delta K_i (K_{i_{max}} - K_{i_{min}}) + K_{i_{min}} \quad (4)$$

Otro enfoque permite sintonizar los parámetros del controlador a partir de las salidas del motor de inferencia difusa y un valor inicial de convergencia para el ajuste de la ganancia proporcional K_{p_0} y el ajuste de la ganancia integral K_{i_0} de acuerdo a la Ecuación (5) y la Ecuación (6) [19].

$$K_p = K_{p_0} + \Delta K_p \quad (5)$$

$$K_i = K_{i_0} + \Delta K_i \quad (6)$$

En este caso se definió un intervalo de solución factible para la ganancia proporcional $K_p \in [0.03, 0.05]$ y para la ganancia integral $K_i \in [0.00061, 0.00072]$, lo cual define la Ecuación (7) y la Ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Estos valores se seleccionaron con base en la sintonización de un controlador PI convencional que presentó buenos índices de desempeño en cuanto a la respuesta transitoria.

$$K_p = 0.02\Delta K_p + 0.03 \quad (7)$$

$$K_i = 0.00011\Delta K_i + 0.00061 \quad (8)$$

2.3 Modelo del controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso

A partir de la base de reglas se diseña el motor de inferencia difusa acoplado a las entradas para el error y las salidas para el ajuste de los parámetros del controlador, en la *Fuzzy Logic Toolbox* de Matlab®. En el entorno de programación gráfica de Simulink® de Matlab® se construye el modelo de simulación del controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso acoplado a la planta identificada en tiempo discreto $G_d(z)$, tal como se muestra en la Figura 6. A partir del modelo de simulación se realizaron múltiples pruebas para analizar el desempeño del controlador con base en la respuesta de un controlador PI convencional discreto. Se realizaron pruebas con una señal de referencia de humedad relativa del 75% con una humedad ambiente de 55%, en la cual se determinó el tiempo de establecimiento, sobrepaso, error en estado estable, esfuerzo en la señal de control y convergencia de los parámetros del controlador.

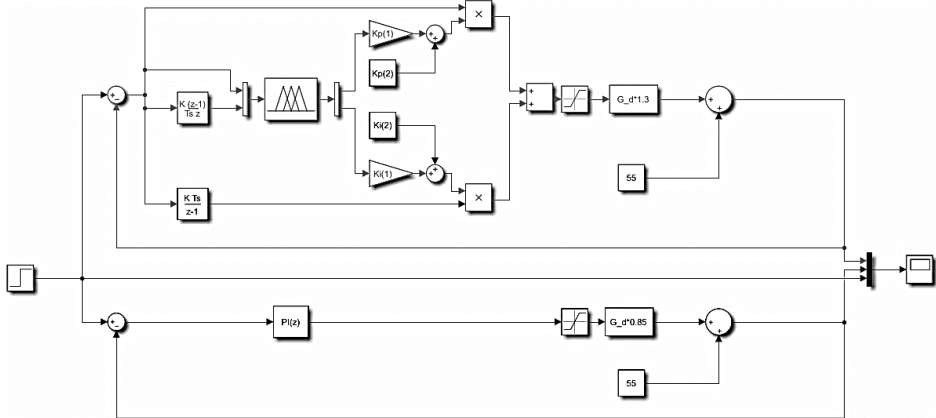


Figura 6 Modelo del controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso y PI convencional

En la Figura 7, se observa la comparativa de la respuesta entre controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso y PI convencional ante una referencia del 75% de humedad relativa. Las dos pruebas muestran un tiempo de establecimiento cercano a 400 s y un sobrepaso para el controlador con mecanismo de autoajuste difuso cercano al 0.01%, mientras que el PI convencional tiene un sobrepaso del 4%.

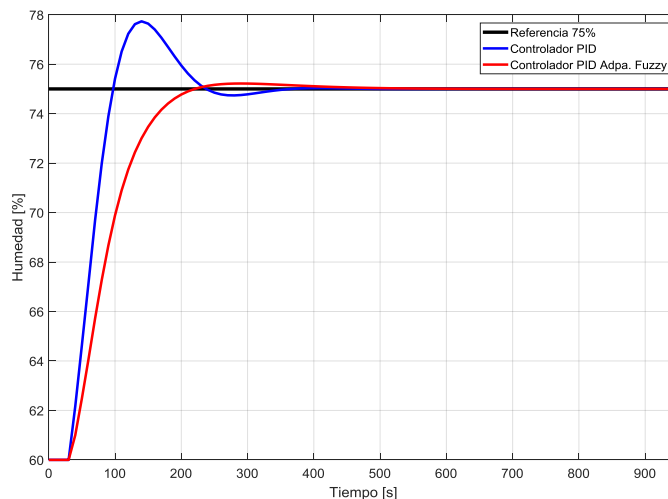


Figura 7 Comparativa Controlador PID adaptativo Fuzzy y PID Convencional

En la Figura 8, se observa la convergencia de los parámetros K_p y K_i con base en las reglas del motor de inferencia difusa. A medida que avanza el tiempo, el motor de inferencia difusa ajusta los valores de los parámetros K_p y K_i hasta que converge en un valor constante cuando el error tiende a cero en estado estable.

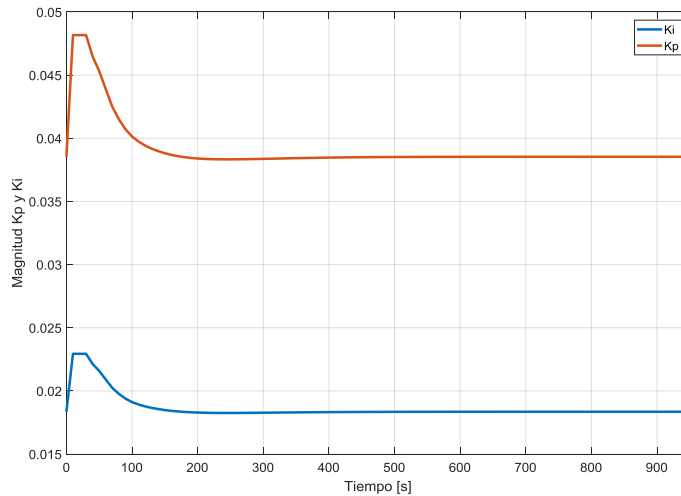


Figura 8 Convergencia de parámetros K_p y K_i

Se realizaron pruebas de perturbación y variación paramétrica del sistema que permitieron analizar la respuesta transitoria. Se aplicó una perturbación de humedad relativa del 10% a la salida del sistema cuya respuesta se muestra en la Figura 9; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, en la cual la salida del sistema se redujo al 50% de humedad relativa, además se observa que el controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso compensó la perturbación con un amortiguamiento más alto respecto al controlador PI convencional.

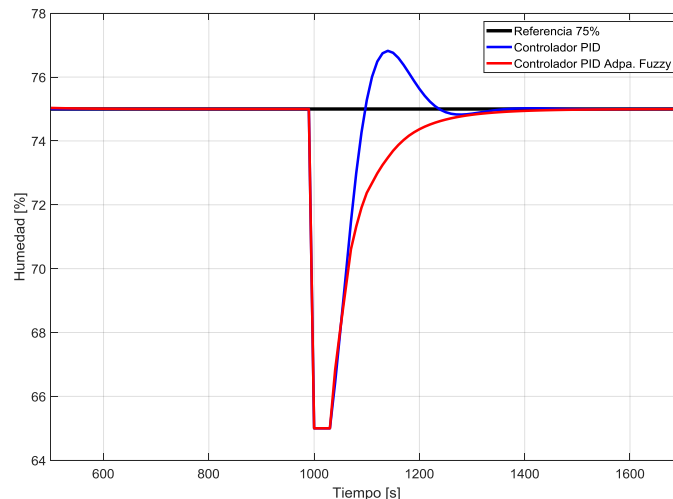


Figura 9 Respuesta del controlador ante una perturbación de carga de -10%

En la Figura 10, se observa el esfuerzo la señal de control para el controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso y el controlador PI convencional. Se pudo demostrar que ante una perturbación de carga del 10% a la salida del sistema, la estrategia de control PI con mecanismo de autoajuste difuso tiene mejor desempeño en cuanto a tiempo de establecimiento y esfuerzo de la señal de control. Éste esfuerzo se relaciona con la suavidad con que cambia la señal

en el tiempo. Una medida para estimar la variación total de la señal de control TV_u equivalente a la suavidad [20], está dada a partir de la Ecuación (9).

$$TV_u = \sum_{k=1}^{\infty} |u_{k-1} - u_k| \tag{9}$$

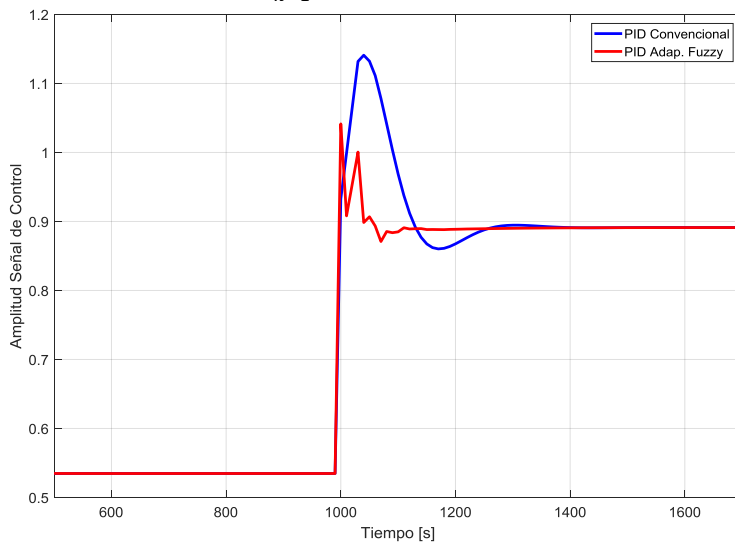


Figura 10 Esfuerzo de señal de control ante perturbación de carga de -10%

En la Figura 11 se observa el resultado de la simulación de la respuesta del controlador PI convencional comparada con el controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso, cuando se aplicó una variación paramétrica al sistema equivalente a una variación del 30% de la constante de tiempo y ganancia estática. El valor final del sistema pasó del 75% a un 88% durante esta variación, lo que permitió observar que el controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso estabilizó el sistema de una forma más rápida con un mayor amortiguamiento.

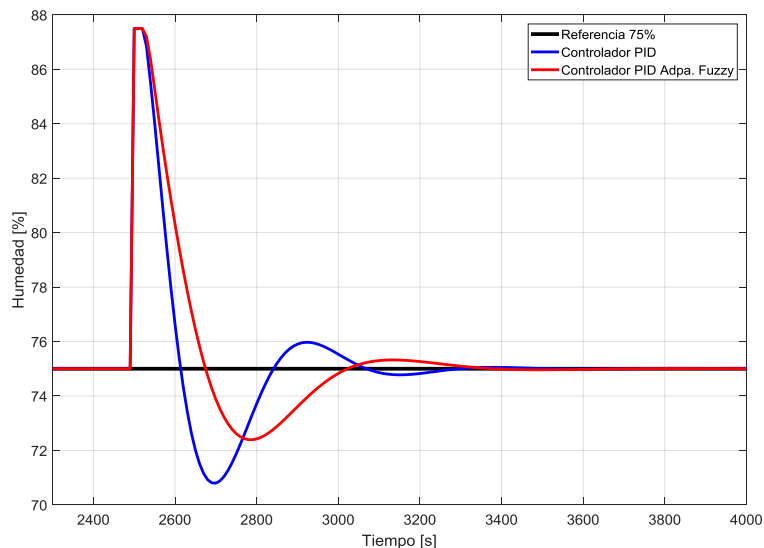


Figura 11 Respuesta del controlador ante una variación paramétrica

En la Figura 12 se muestra la señal de esfuerzo del controlador PI convencional comparada con la señal del controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso, cuando se le aplicó una

variación paramétrica al sistema, donde se observa que el controlador hace un menor esfuerzo de la señal de control, por tanto muestra un mejor desempeño.

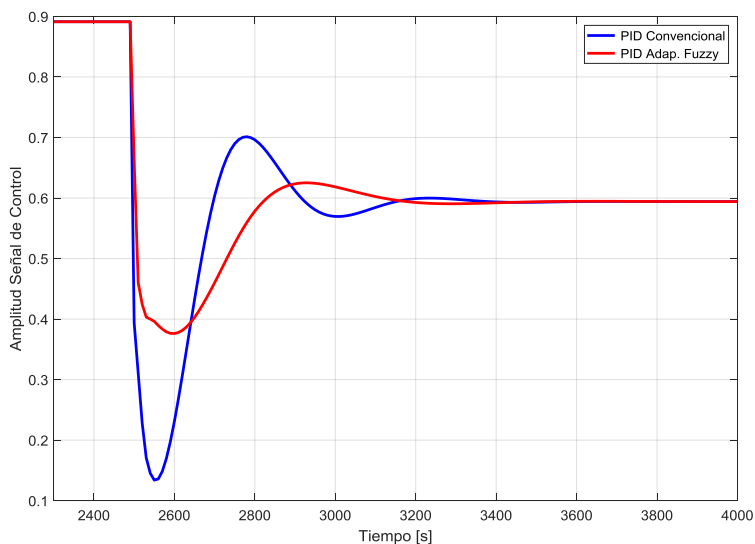


Figura 12 Esfuerzo de señal de control ante una variación paramétrica

3. Resultados

El algoritmo de control diseñado se implementó en una plataforma de 32 bits encargada de generar una señal PWM de 1 KHz aplicado a un convertidor DC-DC del sistema humidificador. La humedad relativa al interior del invernadero es medida a una tasa de 1 Hz a partir de un sensor de humedad relativa tipo capacitivo [21]. Este lazo de realimentación permitió realizar pruebas experimentales en diferentes puntos de consigna del controlador al igual que pruebas de rechazo de perturbación de carga a la salida del sistema de humedad.

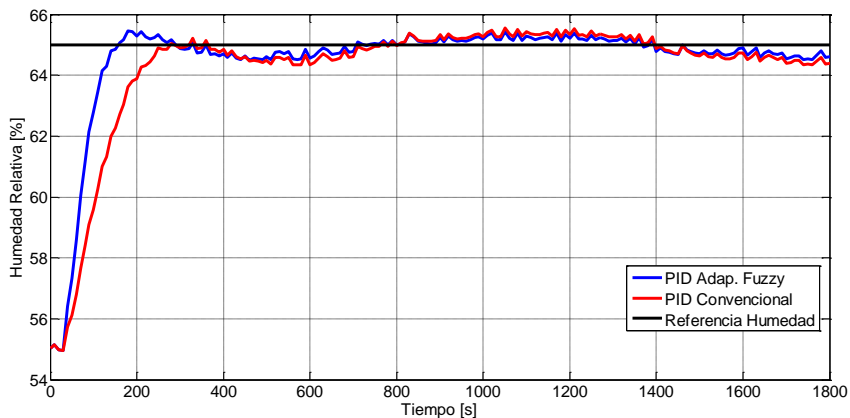


Figura 13 Respuesta del sistema ante una referencia del 65% de Humedad

En la Figura 13, se observa la comparativa de la respuesta del sistema real con el controlador PI convencional y el controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso. La respuesta del controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso muestra una respuesta más rápida respecto a la respuesta del controlador PI convencional, lo que corresponde a un tiempo de establecimiento cercano a los 300 s y 400 s respectivamente. El controlador PI convencional presenta un sobrepaso de aproximadamente el doble del sobrepaso del controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso, para una referencia del 65% cuando el valor de la humedad

ambiente está cercano al 55%. El error en estado estable para el controlador PI convencional presenta un valor cercano al 1.5%, mientras que el controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso es del 1%. No obstante, se observa que las perturbaciones externas afectan el error en estado estable. En la Tabla 2 se observan los resultados de los índices de desempeño.

Tabla 2 Índices de desempeño respecto para una referencia del 65%

Controlador	Sobrepaso	Tiempo de Establecimiento	Error en Estado Estable
PI convencional	0.1%	400 s	1.5 %
PI con mecanismo de autoajuste difuso	0.05%	300 s	1%

En la Figura 14, se observa la respuesta del controlador PI convencional respecto al controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso ante una perturbación de carga cuando se inyecta humedad al sistema a partir de un humidificador externo. Se muestra en la gráfica que ambos controladores intentan compensar la perturbación. En el controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso la humedad interna no supera los 75%, a comparación con el PI convencional donde la humedad interna llega a un valor cercano del 87%. El tiempo de establecimiento para el PI con mecanismo de autoajuste difuso es mucho más corto, con un tiempo de 750 s comparado con el tiempo que presenta el PI convencional, el cual está alrededor de los 1050 s. El error en estado estable para el PI con mecanismo de autoajuste difuso es 10 veces más pequeño que el error en estado estable del controlador PI convencional. Se observa que el controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso tuvo un mejor desempeño en cuanto al sobrepaso y tiempo de establecimiento respecto al controlador PI convencional. En la Tabla 3, se observan los resultados de los índices de desempeño.

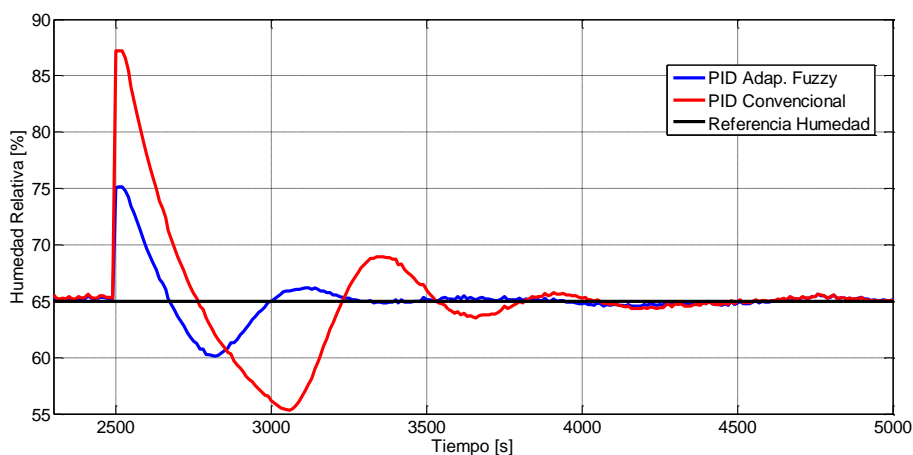


Figura 14 Perturbación de carga

Tabla 3 Índices de desempeño prueba de perturbación de carga

Controlador	Sobrepaso	Tiempo de Establecimiento	Error en Estado Estable
PI convencional	33%	1050 s	1 %
PI con mecanismo de autoajuste difuso	15%	750 s	0.1%

Para realizar pruebas en diferentes puntos de operación, se realizó un cambio de referencia del 65% al 83% a los 6000 s, tal como lo muestra la Figura 15. Se observa que el controlador PI convencional tiene un sobrepaso del 10% mientras que el PI con mecanismo de autoajuste difuso tiene un sobrepaso del 4% para el mismo cambio de referencia. Por otra parte, el controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso se estabiliza más rápido con un tiempo de establecimiento cercano a 1000 s comparado con el controlador PI convencional que se estabiliza alrededor de 1600 s. En contraste, se observa que el PI convencional presenta una oscilación respecto al punto de consigna, mientras que el PI con mecanismo de autoajuste mantiene el seguimiento de la

referencia con un error cercano a cero. En la Tabla 4 se observan los resultados de los índices de desempeño.

Tabla 4 Índices de desempeño cambio de referencia

Controlador	Sobrepaso	Tiempo de Establecimiento	Error en Estado Estable
PI convencional	10%	1600 s	1 %
PI con mecanismo de autoajuste difuso	4%	1000 s	0.3%

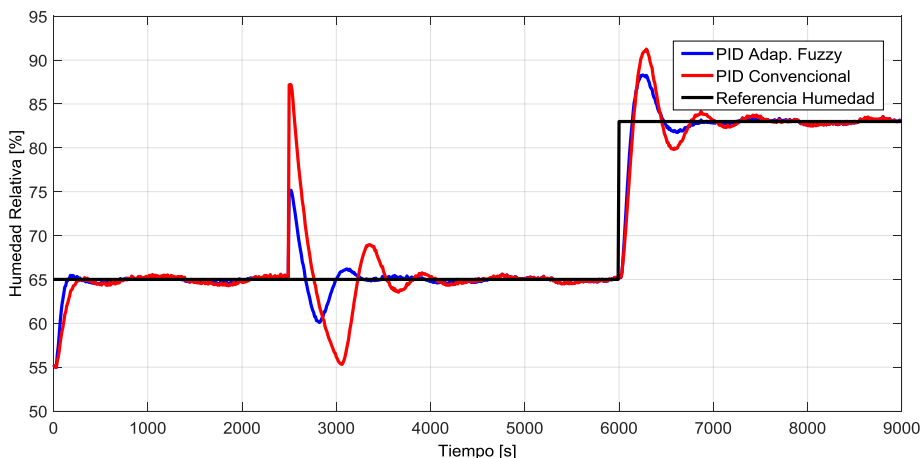


Figura 15 Cambio de Referencia del 65% al 83%

En la Figura 16, se observa la variación de los parámetros K_p y K_i durante las pruebas de perturbación y pruebas de cambio de punto de operación. Se observa la convergencia de los parámetros K_p y K_i del controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso, lo que permite inferir que el motor de inferencia difusa funciona adecuadamente y es capaz de ajustar los parámetros del controlador de forma automática teniendo en cuenta la respuesta transitoria del sistema.

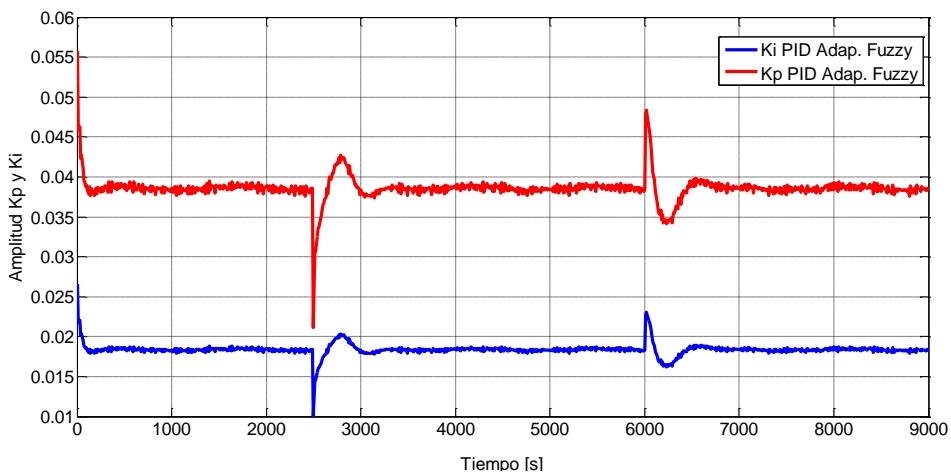


Figura 16 Convergencia Parámetros K_p y K_i

En la Figura 17 se muestra cómo evoluciona la señal de control para las tres pruebas que se llevaron a cabo. La primera parte a partir de la prueba de referencia 65%, el controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso, tiene una acción de control menos agresiva respecto a la acción de control que genera el controlador PI convencional, dado que tiene una mayor amplitud. La

segunda parte a partir de la perturbación externa a los 2500 s, la señal del sistema PI convencional se satura durante 500 s, mientras que la señal del controlador PI con mecanismo de autoajuste presenta una saturación durante un tiempo cercano a los 200 s, lo cual indica un mejor índice de desempeño, dado que presenta un mejor tiempo de establecimiento y error en estado estable cercano a cero respecto al controlador PI convencional. El controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso, presenta una señal algo mayor que 1, lo cual satura el actuador, no obstante la señal de control se estabiliza rápidamente y presenta una baja oscilación respecto a la presentada por la señal de control del controlador PI convencional. En este contexto, la señal de control el PI con mecanismo de autoajuste difuso presenta un menor esfuerzo en cuanto a la acción del humidificador, lo que reduce considerablemente el esfuerzo del mismo.

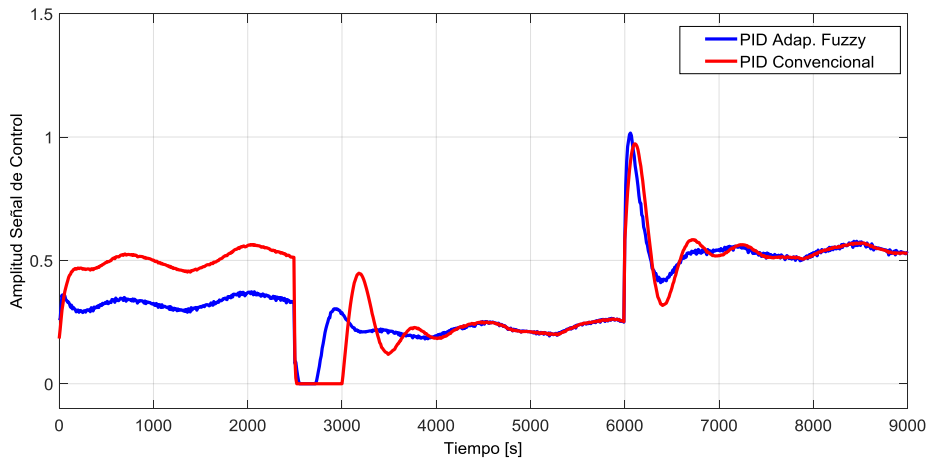


Figura 17 Esfuerzo de la señal de control

4. Conclusiones

El mecanismo de adaptación basado en lógica *Fuzzy* permitió construir un controlador PI adaptativo con un mecanismo de autoajuste, el cual modifica las constantes K_p y K_i en función del error y derivada del error de seguimiento de referencia. Se pudo demostrar que este mecanismo de adaptación permite reajustar el controlador ante cambio de puntos de operación, perturbaciones externas y variación paramétrica del sistema, mostrando un mejor desempeño en cuanto a la respuesta transitoria y esfuerzo de la señal de control en relación con un controlador PI convencional.

Ante diferentes puntos de operación, y pruebas de perturbación externa, se pudo demostrar que el controlador PI con mecanismo de autoajuste difuso muestra un mejor desempeño y menor esfuerzo de la señal de control respecto a un PI convencional, dado que presenta menor tiempo de establecimiento, un sobrepaso mínimo, con un error en estado estable cercano a cero y una rápida convergencia de los parámetros del controlador. De igual forma se pudo demostrar que el mecanismo de adaptación basado en lógica *Fuzzy* con un sistema difuso del tipo Takagi-Sugeno con salidas tipo *Singleton* permite una rápida programación del algoritmo en una plataforma de 32 bits con un coste computacional mínimo.

Referencias

- [1] Rodríguez, F., Berenguel, M., Guzmán, J. & Ramírez-Arias, A. (2015). [Modeling and Control of Greenhouse Crop Growth](#). Cham. Springer International Publishing.
- [2] Su, Y., Xu, L. & Goodman, E. (2017). [Greenhouse climate fuzzy adaptive control considering energy saving](#). Int. J. Control Autom. Syst., vol. 15, n.º 4, pp. 1936-1948.
- [3] Revathi, S., Radhakrishnan, T. & Sivakumaran, N. (2017). [Climate control in greenhouse using intelligent control algorithms](#). pp. 887-892.

- [4] Su, Y., Xu, L. & Li, D., (2016). [Adaptive Fuzzy Control of a Class of MIMO Nonlinear System With Actuator Saturation for Greenhouse Climate Control Problem](#). IEEE Trans. Autom. Sci. Eng., vol. 13, n.º 2, pp. 772-788.
- [5] Outanoute, M., Lachhab, A., Ed-dahhak, A., Selmani, A., Guerbaoui, M. & Bouchikhi, B. (2015). [A neural network dynamic model for temperature and relative humidity control under greenhouse](#). pp. 6-11.
- [6] Azaza, M., Echaieb, K., Tadeo, F., Fabrizio, E., Iqbal, A. & Mami, A. (2015). [Fuzzy Decoupling Control of Greenhouse Climate](#). Arab. J. Sci. Eng., vol. 40, n.º 9, pp. 2805-2812.
- [7] Gurban, E. & Andreescu, G. (2014). [Comparison of modified Smith predictor and PID controller tuned by genetic algorithms for greenhouse climate control](#). pp. 79-83.
- [8] Khodadadi, H. & Dehghani, A. (2016). [Fuzzy logic self-tuning PID controller design based on smith predictor for heating system](#). 16th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), pp. 161-166.
- [9] Gouadria, F., Sbita, L. & Sigrimis, N. (2017). [Comparison between self-tuning fuzzy PID and classic PID controllers for greenhouse system](#). International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS), pp. 1-6.
- [10] Giraldo, S., Flesch, R. & Normey-Rico, J. (2016). [Multivariable Greenhouse Control Using the Filtered Smith Predictor](#). J. Control Autom. Electr. Syst., vol. 27, n.º 4, pp. 349-358.
- [11] Tangirala, A. (2015). [Principles of system identification: theory and practice](#). Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [12] De (Maity), R. & Mudi, R. (2014). [Fuzzy Self-tuning of Conventional PID Controller for High-Order Processes](#). Proceedings of the International Conference on Frontiers of Intelligent Computing: Theory and Applications (FICTA) 2013, vol. 247, S. C. Satapathy, S. K. Udgata, y B. N. Biswal, Eds. Cham: Springer International Publishing, pp. 41-48.
- [13] Garnier, H. (2015). [Direct continuous-time approaches to system identification. Overview and benefits for practical applications](#). Eur. J. Control, vol. 24, pp. 50-62.
- [14] Kocur, M., Kozak, S. & Dvorscak, B. (2014). [Design and Implementation of FPGA - digital based PID controller](#). pp. 233-236.
- [15] Jiang, W. & Jiang, X. (2012). [Design of an Intelligent Temperature Control System Based on the Fuzzy Self-Tuning PID](#). Procedia Eng., vol. 43, pp. 307-311.
- [16] Yamaguchi, T., Hirata, M. & Pang, C. (2017). [High-speed precision motion control](#). Boca Raton, FL: CRC Press.
- [17] Zaki, A., El-Bardini, M., Soliman, F. & Sharaf, M. (2018). [Embedded two level direct adaptive fuzzy controller for DC motor speed control](#). Ain Shams Eng. J., vol. 9, n.º 1, pp. 65-75.
- [18] He, S., Tan, S., Xu, F. & Wang, P. (1993). [Fuzzy self-tuning of PID controllers](#). Fuzzy Sets Syst., vol. 56, n.º 1, pp. 37-46.
- [19] Nuchkrua, T. & Leephakpreeda, T. (2013). [Fuzzy Self-Tuning PID Control of Hydrogen-Driven Pneumatic Artificial Muscle Actuator](#). J. Bionic Eng., vol. 10, n.º 3, pp. 329-340.
- [20] Alfaro, V. & Vilanova, R. (2016). [Model-Reference Robust Tuning of PID Controllers](#). Cham: Springer International Publishing.
- [21] Hassanzadeh, A., Borghei, A. & Lindquist, R. (2008). [Relative humidity measurement using capacitive sensors](#). pp. 396-398.