

A comparative study of classic Proportional-Integral and Fuzzy control approaches for temperature regulation in a microbiological incubator

Un estudio comparativo de los enfoques clásicos de control Proporcional-Integral y Difuso para la regulación de temperatura en una incubadora microbiológica

Juan Manuel Tello ^{1,*} , Rafael Antonio Ceballos ¹ , Gustavo Alonso Acosta ² 

¹ Estudiante Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid; juan_tello91142@elpoli.edu.co

¹ Estudiante Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid; rafael_ceballos91142@elpoli.edu.co

² Profesor Asociado Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid; gacosta@elpoli.edu.co

* Correspondencia: juan_tello91142@elpoli.edu.co

Citación: Tello, J.; Ceballos, R.; Acosta, G. Un Estudio comparativo de los enfoques de control clásico Proporcional-Integral y Difuso para la regulación de temperatura en una incubadora microbiológica. I + T + C Investigación, Tecnología y Ciencia. Vol 1. Num. 17. 2023.



Derechos de autor: © 2023 por los autores. Publicación en acceso abierto bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution (CC BY NC SA) (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es_ES)

Nota del editor: El Sello editorial Unicomfauca se mantiene neutral con respecto a los reclamos generados en esta publicación.

Resumen: En este estudio se presenta el diseño e implementación de dos esquemas de control de temperatura para una incubadora microbiológica. Se compara el desempeño de un controlador clásico de tipo Proporcional-Integral (PI) y un Sistema de Inferencia Difuso (FIS). Para la validación experimental se diseña y construye una incubadora microbiológica; se describe la construcción del prototipo, el diseño de los controladores PI y FIS, y su implementación. Los resultados obtenidos muestran que ambos controladores permiten regular de manera satisfactoria la temperatura en la cámara de incubación. Mientras que con el controlador PI se obtiene una respuesta estable y rápida, el FIS ofrece una mayor adaptabilidad al sistema. Se demuestra que ambas estrategias son aptas para el control de temperatura en incubadoras microbiológicas. La elección entre el PI y el FIS dependerá de las necesidades y requerimientos del proceso. Este estudio constituye una base para futuras investigaciones en lo que se refiere a las estrategias de control de temperatura para sistemas de este tipo.

Palabras clave: Control PI, control difuso, incubadora microbiológica, control de temperatura, modelamiento de sistemas.

Abstract: This study presents the design and implementation of two thermal control schematics for a microbiological incubator for which the performance of a classic Proportional-integral (PI) and a Fuzzy Inference System (FIS) is compared. To obtain experimental validation, a microbiological incubator was designed and built. Then, the construction of said incubator's prototype described, along with the design and implementation of both PI and FIS controllers. Results demonstrate that both controllers display a satisfactory response to temperature management. Although the PI controller has effective and stable responses, the FIS displays higher system adaptability. It is evidenced that both strategies are suitable for the temperature control of the incubator and that the choice between PI or FIS lies within the individual necessities and parameters of a chosen process. This study serves as a foundation for further future research as it is concerning thermal control strategies for systems of the same type.

Keywords: PI control, fuzzy control, microbiological incubator, temperature control, systems modeling

1. Introducción

La temperatura es una variable de gran relevancia tanto a nivel industrial como en laboratorios e instalaciones biomédicas. Uno de los principales desafíos ha sido establecer métodos confiables y robustos para su control, lo que se traduce en una mejora de los procesos inherentes a estos dos sectores.

Un gran número de trabajos han abordado esta problemática. Por ejemplo, los hornos de recirculación de aire se usan en el ensamblaje de componentes electrónicos en tarjetas PCB (Printed Circuit Board). En el estudio de desarrollo de un horno de recirculación de bajo costo [1], se describen el diseño, implementación y validación de un controlador de temperatura por el método de sintonía Ziegler-Nichols. En un trabajo relativo a la electrólisis, se resalta la importancia de mantener la temperatura en valores fijos preestablecidos, para lo cual se diseña un controlador PID que permite regular de manera rápida, y con buenos márgenes de estabilidad, dicha variable [2]. En otro trabajo, que plantea la estabilización de reactores de craqueo catalítico de fluidos, se desarrolla un control de temperatura PID para la salida del reactor [3]. Por otra parte, en [4], se propone un controlador difuso basado en reglas para el posicionamiento de las válvulas de un sistema de calefacción hidrónico. Los métodos propuestos por la lógica difusa son convenientes para tratar la no linealidad y complejidad de algunos sistemas, como por ejemplo los invernaderos. En tal caso se busca brindar condiciones ambientales propicias para el crecimiento y desarrollo de las plantas. En [5] por ejemplo, se logra una disminución de los tiempos de respuesta de los procesos fisicoquímicos de las plantas empleando una celda de combustible de membrana para el intercambio de protones. La eficiencia energética de la celda y la prolongación de su vida útil se incrementan regulando su temperatura mediante un controlador difuso.

Los avances en los métodos y modelos propuestos por la IA (Inteligencia Artificial) se han venido incorporando al control de procesos. En [6] se conduce un estudio comparativo de tres estrategias de control basadas en IA para el control térmico en edificaciones y en [7] se propone un sistema heurístico neuro-difuso para el control de temperatura de un calentador de agua a gas.

No menos importante resulta el control de temperatura en el área biomédica. El cultivo de microorganismos requiere de hornos de incubación capaces de mantener temperaturas constantes durante largos periodos de tiempo. En [8] se diseña e implementa un controlador PID para el control de temperatura en un horno microbiológico. De hecho, el control PID clásico es el de uso más generalizado en este tipo de sistemas, cuya implementación exitosa requiere del modelamiento matemático de la planta o proceso [9].

Se considera como principal contribución de este artículo, el estudio comparativo de dos esquemas de control de temperatura para una incubadora microbiológica con base en métricas de desempeño. Un controlador PI (Proporcional-Integral) clásico y un FIS proporcional-derivativo. Como contribuciones adicionales se tienen: 1) el modelamiento y diseño de un controlador PI con sintonización por Ziegler-Nichols (ZGN), y 2) el diseño detallado de un FIS proporcional-derivativo tipo Mamdani.

2. Materiales y métodos

2.1 Materiales:

El soporte experimental de este estudio fue llevado a cabo con base en los siguientes materiales y herramientas.

2.1.1. *Subsistema de percepción, actuación y control.* Constituido por una placa de desarrollo Arduino UNO [10] para la adquisición de datos de temperatura a través del sensor LM35. A partir de la detección del cruce por cero de la señal de suministro AC, el microcontrolador genera la señal de disparo para la interfaz de potencia, la cual incorpora un tiristor BTB16. Esta configuración corresponde a un control por fase, la cual permite regular la

energía que se aplica al elemento final de control, en este caso una resistencia eléctrica de 110V/1150W. El controlador PI se implementó en el μC de este subsistema.

2.1.2. *Lenguaje Python*. Uno de los lenguajes de programación de mayor crecimiento en la comunidad de desarrolladores de software, debido principalmente a la facilidad de aprendizaje y legibilidad de su código. De manera particular se usó el módulo "Python Control Systems" para el análisis y diseño de los controladores. La implementación del controlador difuso se hizo con SciKit-Fuzzy, un módulo que incorpora una amplia variedad de algoritmos de lógica difusa.

2.1.3. *Matlab*. Plataforma de cómputo que junto con su extensión de programación visual Simulink, se empleó en el modelado de la planta, el diseño y simulación de los controladores implementados.

2.1.4. *Incubadora microbiológica*. Se diseñó y construyó un prototipo de incubadora microbiológica en aluminio, con aislamiento térmico en fibra de vidrio, que además incorpora un display de cristal líquido para el despliegue de información. El prototipo incluye como elemento calefactor una resistencia eléctrica de 1150W.

2.1 Métodos:

2.2.1. *Controlador PI*. El sistema implementado Proporcional- Integral PI se muestra en la figura 1. Se realiza una identificación del sistema, para establecer la dinámica de la planta como se muestra en la Figura 2. Para tener una aproximación del modelo, se realiza un modelamiento por el método de curva de reacción, utilizando la base de datos obtenida.

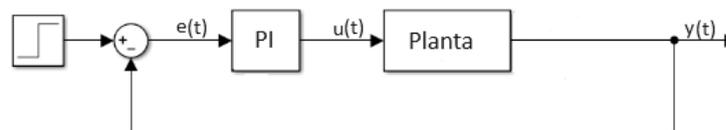


Figura 1. Arquitectura del controlador PI implementado en la planta

Una vez se tiene el tiempo en el que alcanza el error en estado estable, se busca T1 (28.3%) y T2 (63.2%). Reemplazando estos valores y resolviendo el sistema de ecuaciones (1), se establecen valores para θ y τ , y se aproxima a una función de transferencia de primer orden con retardo (2). Reemplazando los valores hallados se obtiene el modelo de la planta por medio de la función de transferencia que se observa en la ecuación (4).

$$\begin{aligned} \theta + \frac{\tau}{3} &= 242 \\ \theta + \tau &= 623.5 \end{aligned} \quad (1)$$

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{\theta s}}{Ts+1} \quad (2) ; \quad G_1(s) = 1.6195 \frac{e^{-51.25}}{575.25s+1} \quad (3)$$

Cerrando el lazo y normalizando, se calcula el tiempo de muestreo por el método de Tau equivalente, el cual se escoge de 160 segundos. Se procede con la sintonía del controlador por el método de Ziegler-Nichols cuyos valores se hallan por tablas, obteniendo de esta forma los valores para el controlador $Kc = 3.1408$ y $Ki = 0.0093$.

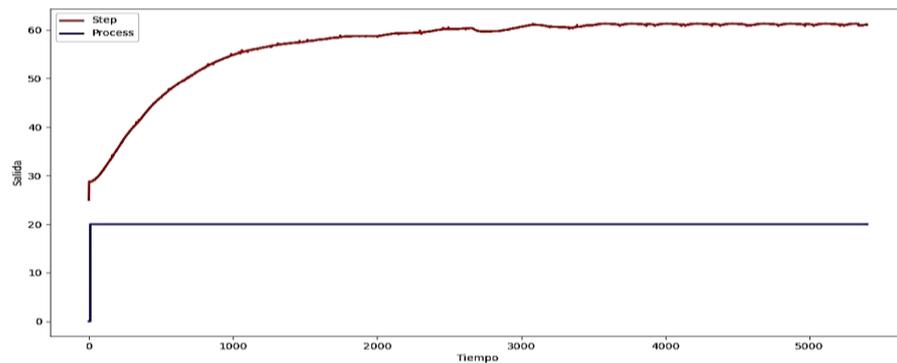


Figura 2. Identificación de la planta en lazo abierto.

2.2.2. *Controlador Difuso*. El sistema implementado, correspondiente a un Controlador Difuso Proporcional-Derivativo (PD) tipo Mamdani, se muestra en la figura 2. El error $e_r(t) = r(t) - m(t)$ y su derivada $e'_r(t)$ se someten al proceso de fuzificación (Fz) para obtener las variables lingüísticas $e(t)$ y $e'(t)$. La etapa de inferencia lleva a cabo la implicación de cada regla y genera, mediante la operación de agregación, la salida difusa $U_f(t)$. Finalmente, la etapa de defuzificación (DFz) procesa la variable lingüística $U_f(t)$ y genera la señal $u(t)$, que se aplica al elemento final de control. De esta manera se consigue regular la temperatura en la cámara de incubación.

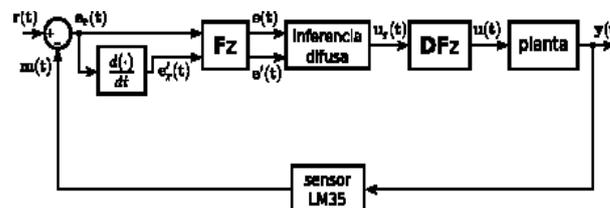


Figura 2: Arquitectura del controlador difuso Proporcional-Derivativo (PD) implementado.

Las variables lingüísticas fueron caracterizadas mediante una tupla de la forma $\{x;U;T(x);G;M\}$. Donde cada variable x se asoció a su correspondiente universo del discurso U y a los términos lingüísticos $T(x)$. Dichos términos se establecieron a partir de la sintaxis G y se les confirió significado a través de la semántica M , que vincula un conjunto difuso a cada término. En la tabla 1 se muestra la caracterización de las variables de entrada y en la tabla 2 la de salida. La semántica se estableció mediante funciones de pertenencia triangulares y trapezoidales, que se caracterizan por su bajo costo computacional.

Tabla 1. Caracterización de las variables lingüísticas de entrada $e(t)$ y $e'(t)$.

	$e(t)$	$e'(t)$
Nombres	<i>error</i>	<i>derivada del error</i>
Universos	$U = \{x \in \mathbf{R} \mid -90 \leq x \leq 90\}$	$V = \{x \in \mathbf{R} \mid -1 \leq x \leq 1\}$
Términos	$T(x) = \{eng, enp, ez, epp, epg\}$	$T(x) = \{deng, denp, dez, depp, depg\}$
G	<i>e</i> : error, <i>n</i> : negativo <i>g</i> : grande, <i>p</i> : pequeño <i>z</i> : cero, <i>p</i> : positivo	<i>de</i> : derivada del error <i>n</i> : negativa, <i>g</i> : grande <i>p</i> : positiva, <i>z</i> : cero
M	<i>eng</i> : trapmf [-90;-90;-60;-40] <i>enp</i> : trimf [-80;-40; 0] <i>ez</i> : trimf [-30; 0; 30] <i>epp</i> : trimf [0; 40; 80] <i>epg</i> : trapmf [40; 60; 90; 90]	<i>deng</i> : trapmf [-1;-1;-0.6;-0.4] <i>denp</i> : trimf [-0.6;-0.3; 0] <i>dez</i> : trimf [-0.1; 0; 0.1] <i>depp</i> : trimf [0; 0.3; 0.6] <i>depg</i> : trapmf [0.4; 0.6; 1; 1]

Tabla 2. Caracterización de la variable lingüística de salida $U_f(t)$.

$U_f(t)$	
Nombre	<i>ángulo de disparo</i>
Universo	$W = \{x \in \mathbf{R} \mid -3 \leq x \leq 3\}$
Términos	$T(x) = \{fang; anp; az; app; apgg\}$
G	a : ángulo de disparo, n : negativo g : grande, p : positivo p : pequeño
M	ang : <i>trapmf</i> [-3;-3;-2;-1] anp : <i>trimf</i> [-2;-1; 0] az : <i>trimf</i> [-1; 0; 1] app : <i>trimf</i> [0; 1; 2] apg : <i>trapmf</i> [1; 2; 3; 3]

La operación de defuzificación se implementó mediante el operador COG (Center of Gravity). El valor numérico obtenido se multiplicó por una ganancia establecida heurísticamente, en este caso diez, y se envía al μC Arduino donde se mapea en un rango conveniente para generar el ángulo de disparo del tiristor. La base de reglas del controlador se presenta en la tabla FAM (Fuzzy Associative Memory) de la figura 2.

e \ e	deng	demp	dez	depp	depg
eng	<i>ang</i>	<i>ang</i>	<i>ang</i>	<i>anp</i>	<i>az</i>
enp	<i>ang</i>	<i>ang</i>	<i>anp</i>	<i>az</i>	<i>app</i>
ez	<i>ang</i>	<i>anp</i>	<i>az</i>	<i>app</i>	<i>apg</i>
epp	<i>anp</i>	<i>az</i>	<i>app</i>	<i>apg</i>	<i>apg</i>
epg	<i>az</i>	<i>app</i>	<i>apg</i>	<i>apg</i>	<i>apg</i>

Figura 2. Conjunto de reglas de inferencia para el controlador difuso PD.

3. Resultados

Después de realizadas las simulaciones, se procede con la validación de los controladores PI y FIS en la incubadora microbiológica. Se realizan cinco pruebas con cambios de referencias ascendentes y descendentes para cada controlador como se puede observar en la siguiente figura.

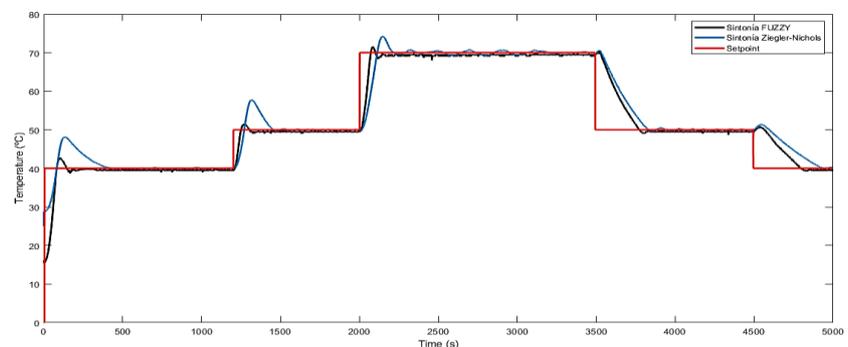


Figura 3. Respuesta de controladores PI y FIS.

3.1 Controlador PI por sintonía Ziegler-Nichols. Se observa una respuesta rápida del sistema en cada cambio generado, un sobre impulso máximo de 8 grados Celsius, principalmente en los ascendentes. En cuanto a estabilidad de la planta, logra el objetivo con un seguimiento fiel de la referencia y elimina el error en estado estable como se

observa en la Figura 3. En los cambios descendentes aumenta el tiempo de estabilización debido a la hermeticidad de la planta.

3.2 Controlador FIS. Para el controlador FIS se realiza la misma prueba experimental que en el PI, teniendo en cuenta condiciones similares en la temperatura inicial. Como se observa en la Figura 3, la respuesta al cambio de referencia es rápida, genera un sobre impulso máximo de 2.3 grados Celsius. Logra una estabilización del sistema de manera veloz y sigue la referencia adecuadamente. Aunque presente oscilaciones muy pequeñas, elimina casi por completo el error en estado estable.

Una vez implementadas y realizadas las pruebas, se elaboran las métricas de desempeño por la Integral Absoluta del Error (IAE) y la Integral del Error Cuadrático (IAET). Las ecuaciones (10) y (11) definen estas métricas y se muestran en la Tabla 3 y 4.

$$IAE = \int_{T_0}^{T_f} |e(t)| dt \approx \sum_{k=k_0}^{k_f} |e(kT)| \quad (10) ; \quad ISE = \int_{T_0}^{T_f} e(t)^2 dt \approx \sum_{k=k_0}^{k_f} e^2 \quad (11)$$

Tabla 3: Desempeño de los Controladores: Tiempo de establecimiento y MP.

S_p °C	t_{SS} (s)		M_p (°C)	
	Control_PID	Control_FIS	Control_PID	Control_FIS
40↑	418.0	182.0	48.12	42.86
50↑	268.5	149.0	57.73	51.56
70↑	214.5	151.5	74.24	71.54
50↓	382	329.5	0.0	0.0

Tabla 4: desempeño de controlador PI y FIS ante diferentes entradas escalón.

Métricas de desempeño			Métricas de desempeño		
Ref.	Controlador PI		Step	Controlador FIS	
	IAE	ISE		IAE	ISE
40%	2.01e+03	1.64e+04	40%	1.61e+03	2.01e+04
50%	1.246e+03	7.96e+03	50%	669.89	2.62e+03
70%	2.02e+03	2.30e+04	70%	1.73e+03	1.43e+04
50%	3.45e+03	4.84e+04	50%	3.22e+03	4.14e+04

4. Discusión

El Controlador PI por sintonía ZNG (Ziegler-Nichols) presenta un buen desempeño en cuanto al seguimiento de la referencia y disminución del tiempo de estabilización, el cual se redujo en un 86.1% para una referencia de 40 grados Celsius. Por otra parte, el máximo sobre impulso fue de 20.3% para esta misma referencia.

Para el controlador difuso, se obtuvo también un desempeño satisfactorio en el seguimiento de la referencia y la respuesta a perturbaciones. Mientras que el tiempo de estabilización se redujo en un 97.7%, el máximo sobre impulso solo fue de un 7.15 %, ambos con relación al sistema en lazo abierto. Ambos controladores pueden ser sujetos a cambios para mejorar su respuesta. Con lo anterior, se permite establecer que el rendimiento de este último es significativamente mejor que el del primero en la implementación de esta planta.

5. Conclusiones

En este estudio se presentaron los resultados obtenidos de los procesos de diseño e implementación de dos controladores para la regulación de temperatura en una incubadora microbiológica. Mientras que el control clásico establece métodos de diseño totalmente determinísticos, la lógica difusa propone métodos basados en el conocimiento heurístico. Una de las diferencias entre ambos enfoques, es que en el primero se requiere de un modelo de la planta, sin embargo, en el segundo no necesariamente.

Se comparó el desempeño de un controlador PI con sintonía ZGN, con uno PD difuso del tipo Mamdani. Si bien la respuesta de ambos permitió un seguimiento conveniente de las referencias de temperatura y la corrección de perturbaciones, el controlador difuso presentó un mejor rendimiento en lo que respecta a tiempo de respuesta y máximo sobre impulso, tal como se evidencia en las métricas presentadas en las tablas 3 y 4.

Para plantas que exhiben un comportamiento lineal o para las cuales los costos asociados al modelado no resultan excesivos, el enfoque del control clásico es el más recomendable. Sin embargo, para plantas no lineales o cuyos costos de modelado podrían llegar a ser representativos, el enfoque propuesto por la lógica difusa es más conveniente.

Una desventaja de los métodos heurísticos es la eventual dificultad de poder acceder al conocimiento que posee un experto o que se encuentra inmerso en bases de datos. No obstante, la decisión de cual enfoque adoptar en un momento determinado, dependerá de la naturaleza específica del problema y las circunstancias que lo rodean. Cabe mencionar que ambos enfoques no necesariamente son excluyentes, de hecho, su confluencia ha dado origen a lo que se denomina Control Inteligente.

Contribuciones de autor: "Conceptualización, Gustavo Acosta Amaya ; metodología, Juan Manuel Tello, Rafael Ceballos Ramírez; software: Rafael Ceballos Ramírez, Juan Manuel Tello; validación, Gustavo Acosta Amaya, Rafael Ceballos Ramírez y Juan Manuel Tello; análisis formal, Rafael Ceballos Ramírez, Juan Manuel Tello; investigación, Gustavo Acosta Amaya; recursos, Juan Manuel Tello, Rafael Ceballos Ramírez; curación de datos, Rafael Ceballos Ramírez; redacción – preparación del borrador original, Juan Manuel Tello, Rafael Ceballos Ramírez; redacción: revisión y edición, Juan Manuel Tello, Rafael Ceballos Ramírez; visualización, Gustavo Acosta Amaya; supervisión, Gustavo Acosta Amaya; administración de proyectos, Gustavo Acosta Amaya; adquisición de financiación, Rafael Ceballos Ramírez y Juan Manuel Tello. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito".

Fondos: Esta investigación no recibió financiamiento externo

Conflictos de interés: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

1. A. J. K. Pambudi, F. I. Hariadi and M. I. Arsyad, "Development of low-cost reflow oven for SMT assembly," *2017 International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD)*, Yogyakarta, Indonesia, 2017, pp. 51-56, doi: 10.1109/ISESD.2017.8253304.
2. Ruomei Qi, Jiarong Li, Jin Lin, Yonghua Song, Jiepeng Wang, Qiangqiang Cui, Yiwei Qiu, Ming Tang, Jian Wang, Design of the PID temperature controller for an alkaline electrolysis system with time delays, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 48, Issue 50, 2023, Pages 19008-19021, ISSN 0360-3199.
3. R. Aguilar, A. Poznyak, R. Martínez-Guerra, R. Maya-Yescas, Temperature control in catalytic cracking reactors via a robust PID controller, *Journal of Process Control*, Volume 12, Issue 6, 2002, Pages 695-705, ISSN 0959-1524.
4. C. Haissig, "Adaptive fuzzy temperature control for hydronic heating systems," in *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 20, no. 2, pp. 39-48, April 2000, doi: 10.1109/37.833639.
5. Y. -X. Wang, F. -F. Qin, K. Ou and Y. -B. Kim, "Temperature Control for a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell by Using Fuzzy Rule," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 31, no. 2, pp. 667-675, June 2016, doi: 10.1109/TEC.2015.2511155.
6. Jin Woo Moon, Sung Kwon Jung, Youngchul Kim, Seung-Hoon Han, Comparative study of artificial intelligence-based building thermal control methods – Application of fuzzy, adaptive neuro-fuzzy inference system, and artificial neural network, *Applied Thermal Engineering*, Volume 31, Issues 14–15, 2011, Pages 2422-2429, ISSN 1359-4311.

7. J. A. Vieira, F. M. Dias and A. M. Mota, "Hybrid neuro-fuzzy network-priori knowledge model in temperature control of a gas water heater system," *Fifth International Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS'05)*, Rio de Janeiro, Brazil, 2005, pp. 6 pp.-, doi: 10.1109/ICHIS.2005.60.
8. Campos, L., Mines, C., \& Talledo, A. (2015). <http://repositorio.unac.edu.pe>. Obtenido de <http://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952>
9. Hu, Yuh-Chung \& Chen, Ping-Jung \& Chang, Pei-Zen. (2019). Thermal-Feature System Identification for a Machine Tool Spindle. *Sensors*. 19. 1209. 10.3390/s19051209.
10. Warren, JD., Adams, J., Molle, H. (2011). *Arduino for Robotics*. In: *Arduino Robotics*. Apress, Berkeley, CA. <https://doi.org/10.1007/978-1-4302-3184-4-2>
11. S. Fuller, B. Greiner, J. Moore, R. Murray, R. van Paassen and R. Yorke, "The Python Control Systems Library (python-control)," 2021 60th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), Austin, TX, USA, 2021, pp. 4875-4881, doi: 10.1109/CDC45484.2021.9683368.
12. /2505Controlautomaticoeducacion.com. Disponible en línea: <https://controlautomaticoeducacion.com/matlab/grafica-animada-en-2d-con-matlab/> (6, junio,2022)
13. Nagarajan, C. \& Muthusamy, Madheswaran. (2011). Stability Analysis of Series Parallel Resonant Converter with Fuzzy Logic Controller Using State Space Techniques. *Electric Power Components and Systems*. 39. 780-793. 10.1080/15325008.2010.541746.