

Comparación de técnicas de control aplicadas a una planta piloto de tratamiento de pH, centrado en el Control Fuzzy.

Comparison of control techniques applied to a pilot pH treatment plant, focusing on Fuzzy Control.

Thais Valdés González¹

¹Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo. São Paulo, São Paulo, Brasil

*Autor de correspondencia: 7thais7@usp.br

Resumen

La industria, como generadora de residuos contaminantes, le otorga gran importancia a la medición del pH en el tratamiento y eliminación de contaminantes de los residuos líquidos, pues existen procesos que traen efectos secundarios que no siempre son amigables con el medio ambiente, comprometiendo la existencia del ser humano. y otras especies con las que se comparte el planeta. El objetivo principal de este artículo fue la implementación de un controlador de lógica difusa en una planta de tratamiento de pH, basándose en conocimientos previos obtenidos de la operación, debido a la complejidad en el control de esta variable y la dificultad para obtener modelos matemáticos precisos de este tipo en el Industria de proceso químico. Se pretende comparar estos resultados con los obtenidos en proyectos anteriores tras aplicar varios controladores adaptativos en una misma planta. Para ello se utilizará la Planta Piloto de Tratamiento de pH instalada en el Laboratorio de Control de Procesos Industriales de la Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo. Y se demostrará que el uso de varias capas de control genera mejores resultados; así como el hecho que el controlador de lógica difusa obtenido tuvo una respuesta similar al esquema de control previamente utilizado en la planta, pero con un tiempo de desarrollo menor y con menos esfuerzo en su producción.

Palabras clave: Control Fuzzy; Control Predictivo; PID Gain Schedule.

Abstract

The industry, as a generator of contaminating waste, attaches great importance to the measurement of pH in the treatment and elimination of contaminants from liquid waste, since there are processes that bring side effects that are not always friendly to the environment, compromising the existence of the human being and other species with which the planet is shared. The main objective of this article was the implementation of a fuzzy logic controller in a pH treatment plant, based on previous knowledge obtained from the operation, due to the complexity in the control of this variable and the difficulty in obtaining precise mathematical models of this type in the chemical process industry. It is intended to compare these results with those obtained in previous projects after applying several adaptive controllers in the same plant. For this, the pH Treatment Pilot Plant installed in the Industrial Processes Control Laboratory of the Polytechnic School of the University of São Paulo will be used. And it will be shown that using multiple layers of control generates better results; as well as the fact that the fuzzy logic controller obtained had a similar response to the control scheme previously used in the plant, but with a shorter development time and with less effort in its production.

Keywords: Fuzzy control; Predictive Control; PID Gain Schedule.

1. Introducción

Según datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF - Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia), aproximadamente 2.200 millones de personas en el mundo no cuentan con agua potable segura [1]. Algunos otros datos revelados son alarmantes, indicando que el 10% del suelo en al menos 50 países en desarrollo del mundo se riega con aguas residuales.

Debido a las consecuencias y efectos secundarios que los residuos líquidos de las industrias pueden provocar en el medio ambiente, este sector, como generador de residuos contaminantes, concede gran importancia a la medición del pH en el tratamiento de estos residuos.

Es necesario que exista una responsabilidad ética de participar en la recuperación, tratamiento y posterior liberación al medio ambiente de las emisiones y vertidos del proceso, sin provocar un impacto negativo en el entorno. Así, se debe lograr un equilibrio entre el progreso necesario y la fabricación de productos que cumplan con las leyes nacionales e internacionales, siendo eficaces y eficientes en mercados cada vez más competitivos.

Los sistemas de pH se reconocen como uno de los problemas más difíciles en el área del control de procesos, ya que la respuesta del pH a la adición de reactivos es altamente no lineal. El objetivo principal de este trabajo fue la implementación de un controlador de lógica difusa en una planta de tratamiento de pH, basándose en conocimientos previos obtenidos de la operación, debido a la complejidad en el control de esta variable y la dificultad para obtener modelos matemáticos precisos de este tipo en el Industria de proceso químico.

Se pretende comparar resultados tras aplicar varios controladores adaptativos en una misma planta. Para ello se utilizará la Planta Piloto de Tratamiento de pH instalada en el Laboratorio de Control de Procesos Industriales de la Escuela Politécnica de la Universidad de São Paulo

2. Materiales y Métodos

Se utilizó la Planta Piloto de Tratamiento de pH instalada en el Laboratorio de Control de Procesos Industriales de la Escuela Politécnica de la USP, la cual representa un proceso real de control de pH industrial. La foto de la figura 1 muestra el plano de planta y la figura 2 muestra su P&ID.

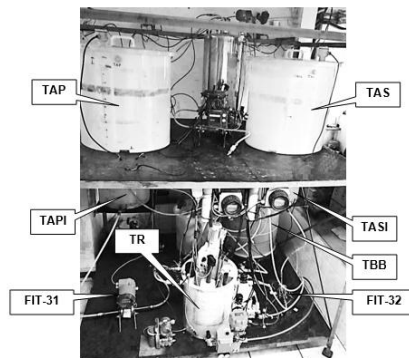


Fig.1 Planta Piloto de Tratamiento de pH

Consta de dos tanques de 180L denominados TAP (tanque de ácido primario) y TAS (tanque de ácido secundario), en los que se preparan soluciones de ácido clorhídrico (HCl), que simulan los efluentes a tratar.

El fluido ácido es tratado en el TR (tanque del reactor), pero primero pasa por los tanques de ácido intermedios (TAPI y TASI) con capacidad de 50L cada uno. El control de nivel en los tanques intermedios se realiza mediante flotadores mecánicos instalados en sus entradas. El objetivo de estos tanques es mantener una columna de agua constante, garantizando un flujo de entrada de

ácido sin muchas variaciones en el TR. Este caudal se mide mediante de flujo electromagnéticos, el FIT-31 y el FIT32, y se regula mediante dos válvulas manuales a la salida de estos depósitos.

Para neutralizar el pH de la solución ácida se utiliza una solución básica, hidróxido de sodio (NaOH), preparada en otro tanque, llamado Tanque Base por Bomba (TBB), el cual cuenta con una bomba dosificadora, la (FZ-41), suministrando base. para el Tanque Reactor (TR). El TBB tiene un volumen útil de 135L.

Los reactivos se mezclan en el TR utilizando un agitador mecánico (MZ-81). El nivel se regula mediante una válvula con posicionador electroneumático (LV-16C) instalada en la salida TR y medido mediante un transmisor de presión diferencial (LIT-10). Otra de las variables que intervienen en el sistema es la temperatura, la cual es medida por un sensor tipo Pt100 (TT-20) y regulada a través de una resistencia eléctrica de 5000 Watts (TZ-21), utilizada para calentar el fluido, y una habitación. válvula de inyección de agua a temperatura ambiente (FV-33), para enfriarla. El principal sensor de proceso es el medidor de pH (AITY-40), que mide el pH de la solución en el tanque del reactor.

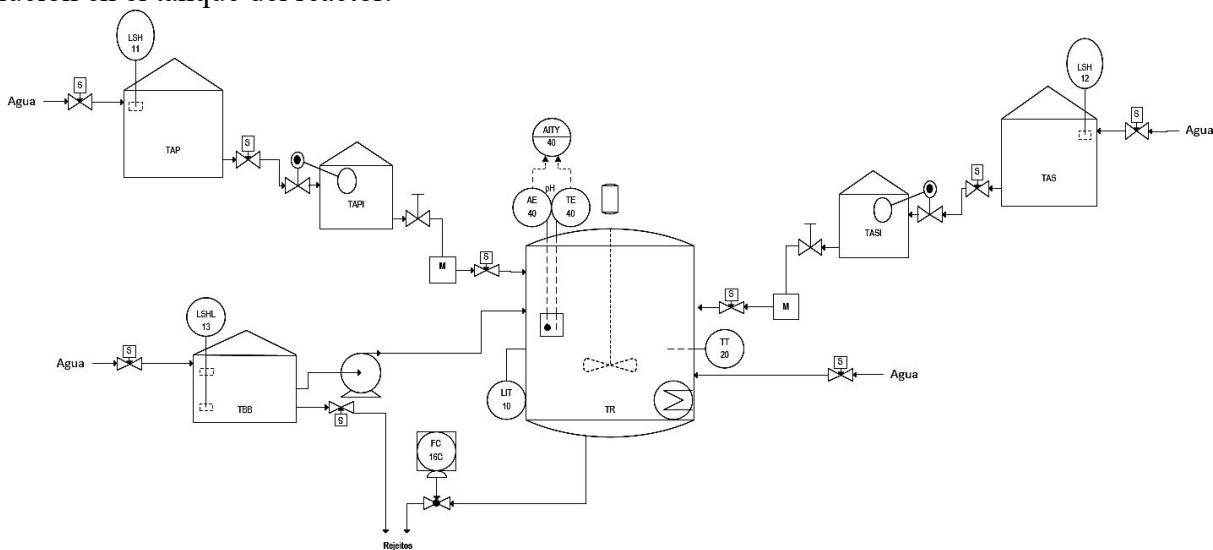


Fig.2 P&ID simplificado de la Planta Piloto de Tratamiento de pH.

Se analiza un controlador Fuzzy comparándolo con las estrategias de control PID Gain Schedule y Predictive MPC Multi-model. Inicialmente, es importante resaltar algunos supuestos y temas como

- Todas las pruebas fueron realizadas en la Planta Piloto de Tratamiento de pH instalada en el Laboratorio de Control de Procesos Industriales de la EPUSP;
- Los reactivos utilizados fueron ácido clorhídrico HCl, almacenado en forma líquida, alcanzando un $\text{pH}_{\text{ácido_inicial}}=2,25$, y base NaOH (hidróxido de sodio), almacenado en forma de escamas, obteniendo un $\text{pH}_{\text{base_inicial}}=12$.
- Debido a los reactivos utilizados, la curva de titulación resultante es una curva de ácido fuerte - base fuerte, con un punto de equilibrio a $\text{pH}=7$;
- El pH está compuesto por cinco rangos de operación, determinados experimentalmente por la curva de titulación, así como por el uso de un único ajuste en el control de pH, demostrando su no linealidad;
- La principal variable del proceso, como indica el nombre de la planta, es el pH. Tanto el nivel como la temperatura se ajustaron para trabajar a un punto de operación fijo de 30°C y 65% del nivel TR, con el fin de eliminar posibles efectos sobre el pH.

Se analizaron dos estrategias de control implementadas en el control de pH de la Planta Piloto de Tratamiento de pH del Laboratorio de Control de Procesos Industriales de la EPUSP.

La primera estrategia utiliza un controlador PID sintonizado para cada rango operativo de acuerdo a una curva de titulación de pH. En este caso las ganancias PID cambian según el valor de pH, siendo

conocida como PID Gain Schedule. También se destaca la necesidad de utilizar esta técnica de control frente a un PID de una sola sintonización, al utilizar una sola capa de control debido a las no linealidades del sistema, que lo hacen inestable y oscilatorio, especialmente en los rangos centrales.

La segunda estrategia de control es el uso de un control predictivo en una segunda capa de control, generando set points optimizados para el PID Gain Schedule de la capa base. Se obtuvo un modelo de lazo cerrado para cada rango de pH, rangos que coinciden con cada una de las sintonías del controlador PID-G.S.

3. Resultados y Discusión

Se pudo analizar si el controlador Fuzzy, desarrollado a partir de la experiencia adquirida en la operación de la planta, mejora el desempeño del PID-GS y del sistema en su conjunto. En la Figura 3, se realiza una comparación entre el PID.GS actuando solo y un MPC Multimodelo generando set points optimizados para el mismo controlador, con el objetivo de mostrar visualmente al lector esta mejora que el MPC Multimodelo trae a la planta. En la parte superior de la Figura 3, en color rojo, se muestra la salida PID-GS y en color amarillo la respuesta del sistema cuando se controla en dos capas de control, MPC-MM – PID-GS. El set point optimizado está representado por el color violeta.

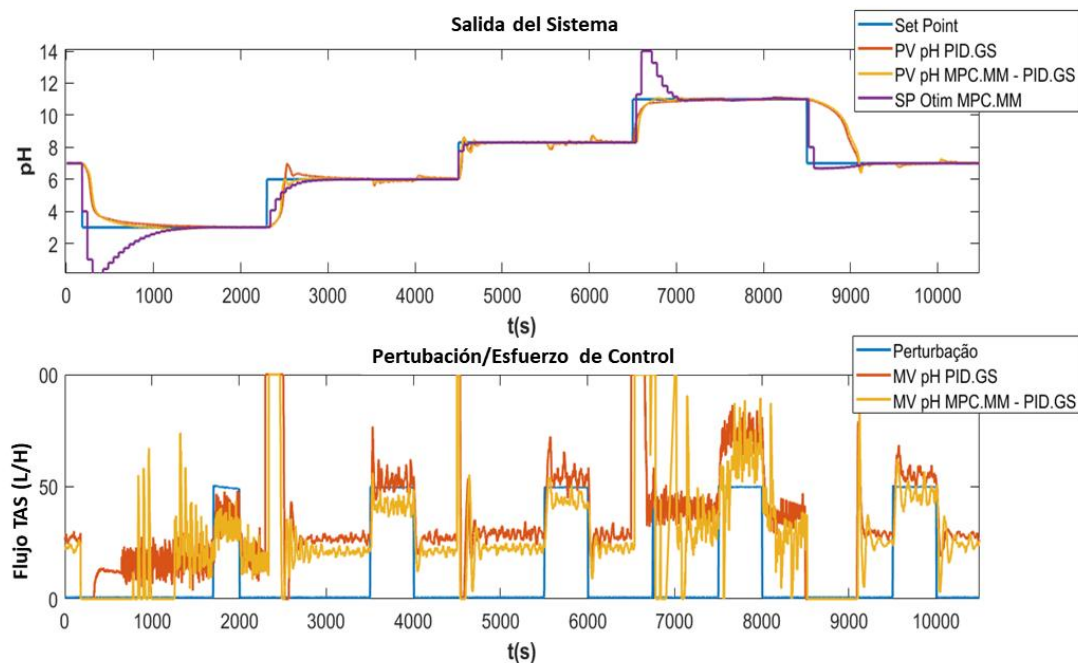


Fig.3 Salida del sistema (pH variable) Controladores PID.GS y MPC.MM – PID.GS.

Se observa como la aplicación conjunta de dos técnicas de control mejora la respuesta transitoria del sistema.

Se evalúa la estrategia de control Fuzzy que genera set points optimizados para el controlador PID GS y se verifica si, efectivamente, existen mejoras relevantes en el sistema respecto al controlador PID GS actuando solo en una sola capa de control. Para ello se utilizan las mismas señales de prueba utilizadas hasta el momento, con el objetivo de realizar comparaciones en igualdad de condiciones. Esta señal está representada por el color azul en la parte superior de la Figura 4. El objetivo es evaluar el desempeño del controlador en modo servos cuando se cambia el set point en cada uno de los rangos de operación definidos para la planta. En el caso de evaluar el controlador

en modo regulatorio, se inserta un segundo flujo de ácido de 50 L/h en el Tanque del Reactor (TR), representado por el color azul en la parte inferior de la misma figura.

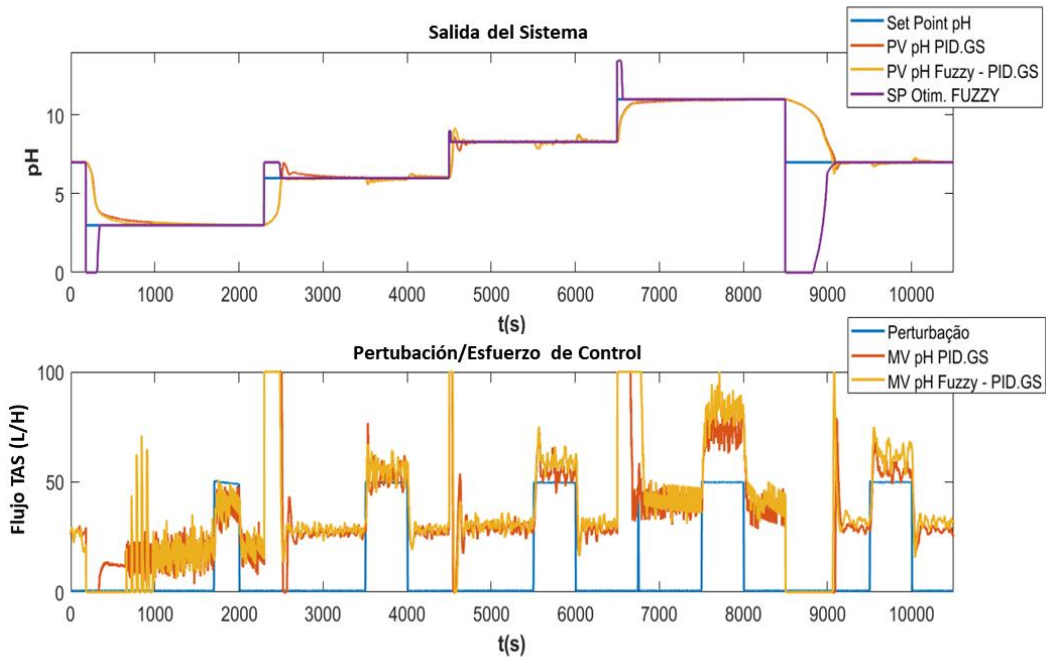


Fig.4 Salida del sistema (variable pH) controladores PID.GS e FUZZY–PID.GS

Hasta ahora, se ha demostrado y confirmado que el uso de dos capas de control hace que el sistema cambie más rápidamente los puntos operativos y responda a las perturbaciones. Desde el punto de vista económico, hay una mejora significativa en el uso de las dos capas de control.

El propósito ahora es comparar las estrategias de control que utilizan dos capas de control. Por un lado, está la sofisticación y dificultad matemática de implementar el controlador predictivo o MPC Multimodelo, y, por otro lado, la simplicidad y necesidad de conocimiento sobre el sistema de controlador difuso o Fuzzy.

La Figura 5 muestra la respuesta del pH para las dos estrategias de control. En azul se representa el SP utilizado, siendo el mismo que se ha utilizado hasta el momento para analizar el cambio entre los rangos de funcionamiento. En color rojo se muestra la variable de proceso PV o pH, cuando se utiliza el controlador MPC.MM – PID.GS y en color amarillo el SP optimizado enviado desde la salida del MPC.MM al PID.GS. A su vez, el PV de pH se ve en morado cuando se utiliza el par Fuzzy – PID.GS y en verde el SP optimizado, enviado desde la salida del controlador difuso al PID.GS.

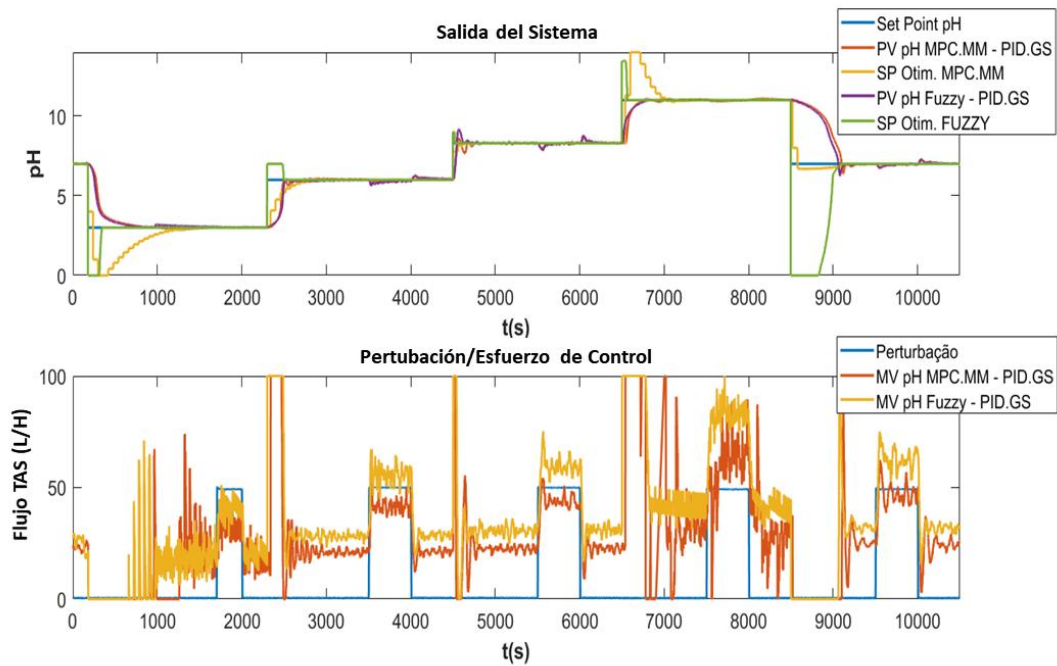


Fig.5 Salida do sistema (variable pH) controladores MPC.MM - PID.GS e FUZZY–PID.GS.

Visualmente las dos respuestas son similares, lo que significa que, en cuanto al pH, el proceso se mantiene bajo control. Para un análisis más profundo, los índices de respuesta transitoria para cada controlador se comparan en la Tabla 1.

Tabla 1. Análisis de respuesta transitoria y rechazo de perturbaciones para controladores de pH cuando se utiliza MPC.MM - PID.GS o FUZZY generando set points para PID.GS.

Controlador [Referencias (PI GS/ MPC MM)]	MPC.MM - PID.GS					FUZZY / PID GS				
Rango	(pH= 2.8)	(pH= 6)	(pH= 7)	(pH= 8.3)	(pH= 11.4)	(pH= 2.8)	(pH= 6)	(pH= 7)	(pH= 8.3)	(pH= 11.4)
Ts (Tiempo de acomodación) s	470	100	641	245	207	462	117	614	249	211
Mp (Overshoot) %	3,3	2,7	15,35	13,56	2,96	0	9	18,47	37,56	0
Ts (Tiempo de Retorno) segundos	0	126	68	91	0	0	162	78	199	0
Sobreseñal	0	0,303	0,23	0,351	0	0	0,361	0,271	0,456	0
Subseñal	0	0,224	0,276	0,391	0	0	0,255	0,286	0,496	0
Error	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Al analizar los tiempos de acomodación se observa que son similares. La diferencia en este caso es de segundos, lo cual es irrelevante para un proceso que tarda minutos en estabilizarse. Respecto a las perturbaciones, el par Fuzzy – PID.GS tardó aproximadamente 100 segundos más en promedio en volver al estado estacionario en el rango referido a pH=8,3, pero en los rangos restantes los controladores se comportaron de manera similar eliminando el efecto de las perturbaciones. mismo. También se analizan los índices de desempeño de ambos sistemas para comparar las respuestas al priorizar el error en estado estacionario y el esfuerzo de control. Los resultados se ven en la Tabla 2.

Tabla 2. Índices de desempeño de controladores de pH utilizando diferentes estrategias de control.

	PID GS -MPC MM	PID GS - FUZZY
IAE	0.3509	0.3528
ISE	0.9109	0.9188
ITAE	2054.5	1992.7
ITSE	5727.3	5627.2
RBEMCE	0.1488	0,1495
RBMSEMCE	0.9109	0.8990
Variación	0.2673	0,2538

Una vez más se demuestra que la respuesta del sistema ante el uso de cualquiera de las dos estrategias de control es similar. Esto ocurre debido a la proximidad entre los índices de desempeño de la respuesta de cada controlador. En el caso de los índices que priorizan el error de estado estacionario, MPC.MM-PID.GS tuvo un mejor desempeño que FUZZY-PID.GS en los dos primeros de un total de cuatro, lo que resulta ser una ventaja mínima respecto a los de proximidad. entre estos índices. En cuanto a los índices que priorizan el esfuerzo de control, la RBEMCE y la RBMSEMCE, también hay una diferencia. Visualmente es más fácil entender esta diferencia en el caso del esfuerzo de control, pues, como se muestra en la parte inferior de la Figura 5, el controlador difuso, representado en amarillo, requirió mayor rotación de la bomba que el controlador predictivo.

4. Conclusiones

Los experimentos desarrollados en este trabajo tuvieron como objetivo crear un controlador basado en la experiencia del operador, que no requiera mucho tiempo, creando modelos matemáticos complejos que describieran la dinámica de la planta, tratando de reducir al máximo las incertidumbres presentes en estos modelos. Se pudo observar que en el caso de esta planta los resultados obtenidos con el controlador difuso fueron similares a los obtenidos con el controlador predictivo basado en modelos implementado por Serrano [2], requiriendo este último mayor esfuerzo en su creación.

En vista de los resultados anteriores, es posible afirmar que el uso de dos capas de control genera mejores resultados, debido a menores tiempos de acomodación y retorno al punto de operación luego de la ocurrencia de las perturbaciones. Al analizar los índices de desempeño y la respuesta transitoria, el esquema de control MPC MultiModelo obtuvo mejores resultados, pero muy similares a los obtenidos con el controlador difuso, el cual fue desarrollado en un intervalo de tiempo más corto y demandando menos esfuerzo [2]

Referencias

1. Nações Unidas Brasil. (2019). ONU: *1 em cada 3 pessoas no mundo não tem acesso a água potável*. <https://nacoesunidas.org/onu-1-em-cada-3-pessoas-no-mundo-nao-tem-acesso-a-agua-potavel/>
2. Serrano, M. A. (2020). *Estratégias de controle avançado para uma planta de tratamento de pH* (1 ed.). Tesis de Maestría, 2020 Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil: Universidade de São Paulo.
3. A. -T. Nguyen, T. Taniguchi, L. Eciolaza, V. Campos, R. Palhares and M. Sugeno, *Fuzzy Control Systems: Past, Present and Future*, IEEE Computational Intelligence Magazine, vol. 14, no. 1, pp. 56-68, Feb. 2019, doi: 10.1109/MCI.2018.2881644.

4. P. K. Juneja *et al.*, *Potential Applications of Fuzzy Logic Controller in the Pulp and Paper Industry – A Review*. 2022 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT), Nepal, 2022, pp. 399-401, doi: 10.1109/ICICT54344.2022.9850626.
5. Hernández-López, Ybrain, Rivas-Pérez, Raúl, & Feliu-Batlle, Vicente. (2020). *Control automático de la distribución de agua en sistemas de riego: revisión y retos*. Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones, 41(2), 80-97. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59282020000200080&lng=es&tlng=es.
6. Velázquez-González, R., Gómez-Lemus, T., & Rodríguez-Reséndiz, J. (2017). *A pH Process Control Embedded on a PLC Using Fuzzy Logic*. Congreso Nacional de Ingeniería, (pp. 1-6). Querétaro. México.
7. Hosseinpour, S., & Martynenko, A. (2022). *Application of fuzzy logic in drying: A review*. Drying Technology, 40(5), 797-826. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1846192>
8. Mittal, K., Jain, A., Vaisla, K. S., Castillo, O., & Kacprzyk, J. (2020). *A comprehensive review on type 2 fuzzy logic applications: Past, present and future*. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 95, 103916. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2020.103916>

Conflicto de Intereses

Este es un artículo original con contenido inédito y los autores no declaran ningún conflicto de intereses.

Contribución de los autores

Thais Valdés González. <https://orcid.org/0000-0002-6509-084X> Participó en el diseño y supervisión de la investigación, y redacción y edición del manuscrito .