

Diseño por simulación de un control Fuzzy y MPC para un proceso de nivel

Edison D. Mañay

edmanay@espe.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-3447-2511>

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

Mauricio D. Chilibuina

mdchilibuina@espe.edu.ec

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

Johanna E. Iza Iza

jeizal@espe.edu.ec

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

Héctor Efraín Yanchatipán Ugsha

hector.yanchatipan8728@utc.edu.ec

Universidad Técnica de Cotopaxi

Latacunga – Ecuador

Paul Salazar Castillo

paulsalazarc91@gmail.com

ISPIB Martha Bucaram de Roldós

Ambato – Ecuador

RESUMEN

El artículo presenta la evaluación de un control Fuzzy y MPC para un proceso de nivel utilizando la herramienta Simulink de Matlab. El problema más frecuente en la industria de procesos es el control de nivel en tanques ya que presenta un modelo matemático no lineal. Comúnmente se utiliza controladores tradicionales como PID para la regulación del nivel en estos sistemas. Para la investigación se considera un tanque cilíndrico caracterizado por una función matemática no lineal. La salida del sistema está definida por h que es el nivel del líquido, que cambia con la apertura de la válvula de entrada a_1 , esta válvula cambia de posición de 0 a 1 (0 a 100 %) y a_2 representa la válvula de perturbación. Se implementa en Simulink un control en lazo abierto con el fin de verificar la dinámica de la planta para obtener el modelo matemático en espacio de estados, luego

se diseña el control Fuzzy y el control basado en modelo MPC. Finalmente se contrastan los resultados de los controladores diseñados Fuzzy y MPC con el control tradicional PID, siendo el control Fuzzy: PD difuso con acción integral, presento un mejor rendimiento para el proceso de nivel implementado, ya que, el tiempo de establecimiento es de 119.407 segundos y ante una perturbación se estabiliza en un tiempo de 82.414 segundos y no presenta un sobre impulso.

Palabras clave: proceso de nivel, control fuzzy, MPC, control PID.

Design by simulation of a Fuzzy control and MPC for a level process

ABSTRACT

The paper presents the evaluation of a Fuzzy and MPC control for a level process using the Matlab tool Simulink. The most frequent problem in the process industry is the level control in tanks since it presents a nonlinear mathematical model. Traditional controllers such as PID are commonly used for level control in these systems. For the investigation, a cylindrical tank characterized by a nonlinear mathematical function is considered. The output of the system is defined by h which is the liquid level, which changes with the opening of the inlet valve a_1 , this valve changes position from 0 to 1 (0 to 100 %) and a_2 represents the disturbance valve. An open loop control is implemented in Simulink in order to verify the dynamics of the plant to obtain the mathematical model in state space, then the Fuzzy control and the control based on MPC model are designed. Finally, the results of the designed Fuzzy and MPC controllers are contrasted with the traditional PID control, being the Fuzzy control: Fuzzy PD with integral action, presented a better performance for the implemented level process, since, the establishment time is 119.407 seconds and before a disturbance it stabilizes in a time of 82.414 seconds and it does not present an over impulse.

Keywords: level process; fuzzy control; MPC control; PID control.

Artículo recibido: 30 noviembre. 2021

Aceptado para publicación: 29 diciembre 2021

Correspondencia: edmanay@espe.edu.ec

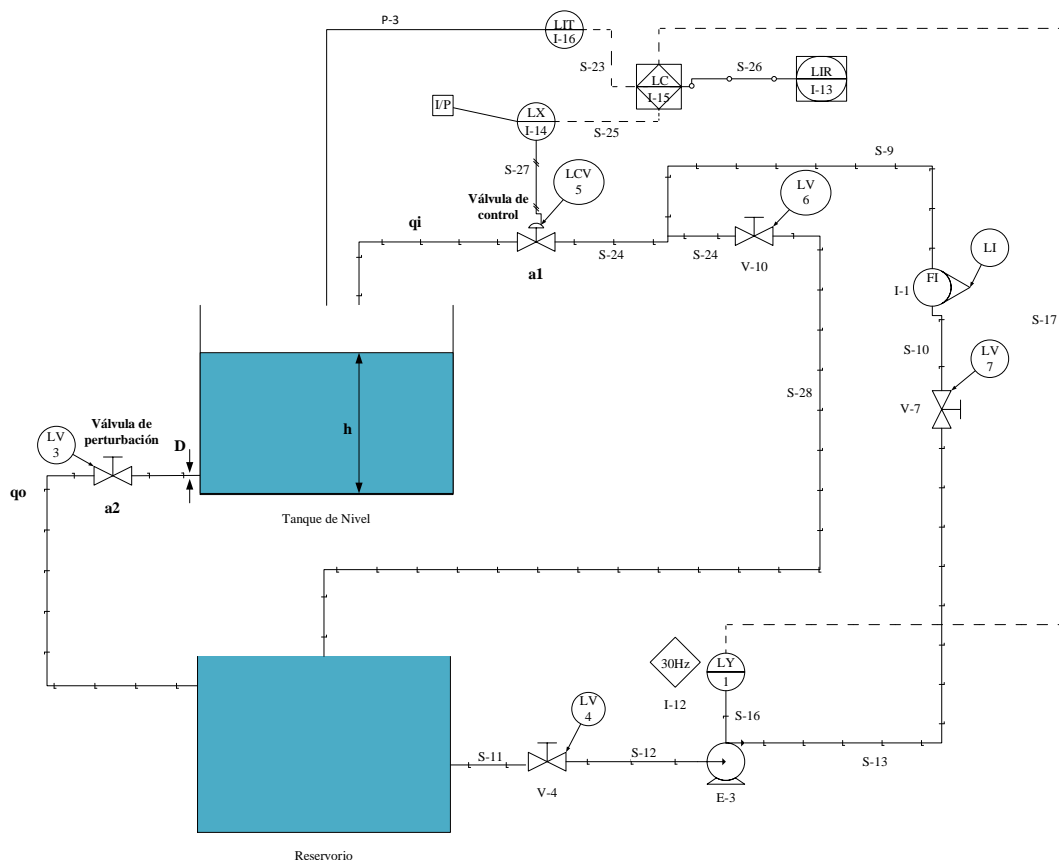
Conflictos de Interés: Ninguna que declarar

1. INTRODUCCIÓN

En la industria de pintura, metalurgia, alimentos, farmacéuticas, tratamiento de aguas y refinerías de petróleo, el proceso de medición y control del nivel de líquido es muy importante. Si nos enfocamos en el aspecto económico de las empresas, el contenido de los productos debe ser exactos y de la misma forma si no hay la correcta medida tanto la empresa y el producto pierde credibilidad. También al hablar del llenado de un tanque, está directamente inmerso la altura (h), que el controlador procura mantener en el punto de ajuste deseado y disminuir el error, busca extender la vida útil de los actuadores. Existen controladores clásicos y modernos, como PID, Fuzzy, MPC, etc., en el presente artículo se diseñan dichos controladores para el proceso de nivel. En la Figura 1, se presenta el plano del proceso de nivel.

Figura 1

Plano P&ID de proceso de nivel en un tanque



El objetivo es diseñar un controlador por simulación para mantener el nivel del líquido en un punto de ajuste por medio del control del actuador. En las secciones siguientes del artículo, se realiza un análisis del comportamiento dinámico del proceso de nivel en lazo

abierto, se diseña por simulación un control Fuzzy y un control predictivo basado en modelos (MPC). Finalmente se realiza un análisis del comportamiento del sistema de control Fuzzy, MPC y PID.

Control PID

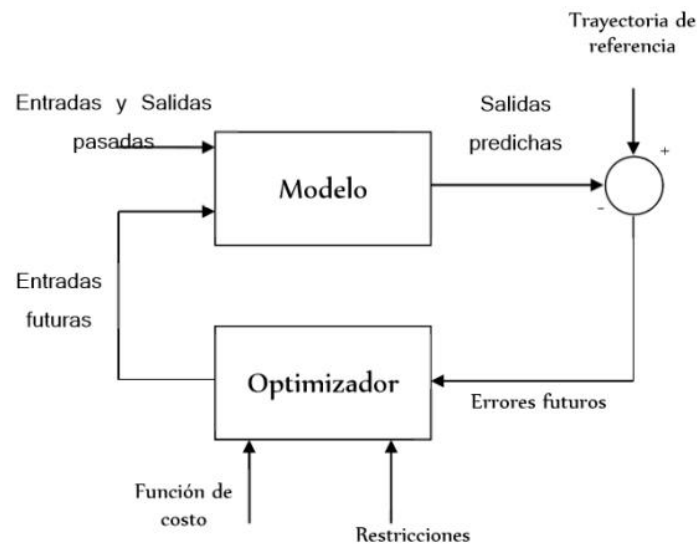
El control del nivel del líquido, es necesario en muchos procesos industriales (Alotaibi et al., 2019). Debido a las no linealidades e incertidumbres del proceso, el sistema de control de nivel es bastante complejo. Normalmente, se utilizan controladores PID (o PI) para el control de nivel (Popescu, 2018). Sin embargo, en algunas situaciones, los controladores PID o PI no funcionan correctamente debido a las no linealidades. Para este sistema no lineal, a veces los enfoques de control convencionales no son adecuados.

Control difuso (Fuzzy)

El controlador de lógica difusa (Fuzzy), es una de las técnicas de control más utilizadas en los procesos industriales. La principal ventaja del controlador difuso es que proporciona un mejor rendimiento que el control convencional en términos de tiempo de establecimiento, tiempo de respuesta, sobreimpulso y robustez (Prusty et al., 2014). El controlador difuso es también muy fácil de implementar, por lo que el controlador puede ser añadido al controlador PID existente (Tzafestas y Papanikolopoulos, 1990). Sin embargo, el controlador difuso no puede eliminar el error en estado estacionario, mientras que los controladores PID tiene la capacidad de eliminar los errores de estado estacionario (Prusty et al., 2014). Por lo tanto, cuando se conjuga los dos controladores son capaz de controlar el proceso de mejor manera (Mursyitah et al., 2018).

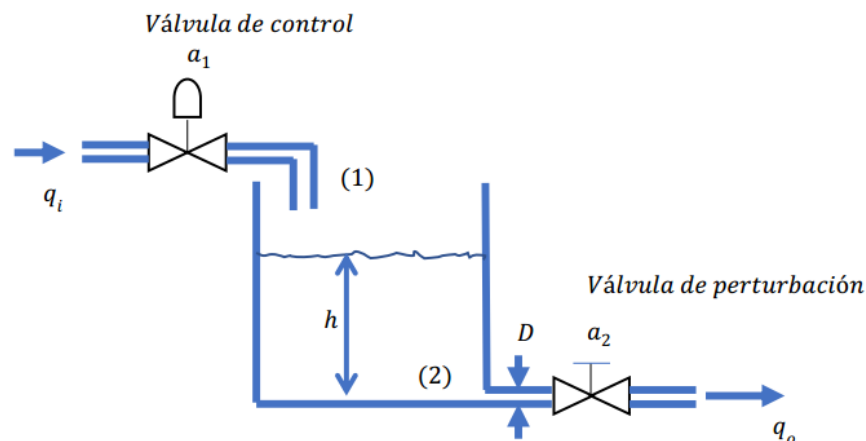
Control predictivo basado en modelo (MPC)

El MPC es una de las técnicas avanzadas de control de procesos (De Prada, 2010). El MPC predice los valores de salida futuros con la ayuda del comportamiento actual y pasado. Utiliza un modelo de sistema para calcular una señal de salida en un horizonte de predicción en el futuro (Gehlaut et al., 2018). El MPC no sólo mejora el rendimiento del control del proceso industrial, sino que también se ocupa de las restricciones y puede utilizarse con un sistema de múltiples entradas y salidas (MIMO) (Troncoso y Suárez, 2017). La señal de control se calcula minimizando una función de coste (Suwannik et al., 2016). La estructura básica del control MPC, se ilustra en la Figura 2.

Figura 2*Estructura del control MPC*

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El proceso de control del nivel de líquido se muestra en la Figura 3, donde el objetivo es mantener el nivel de líquido del tanque en una altura deseada.

Figura 3*Planta de nivel de un tanque*

La representación matemática del proceso de nivel de la Figura 3, representada por un modelo no lineal (Åström y Murray, 2008), se representa en la ecuación 1:

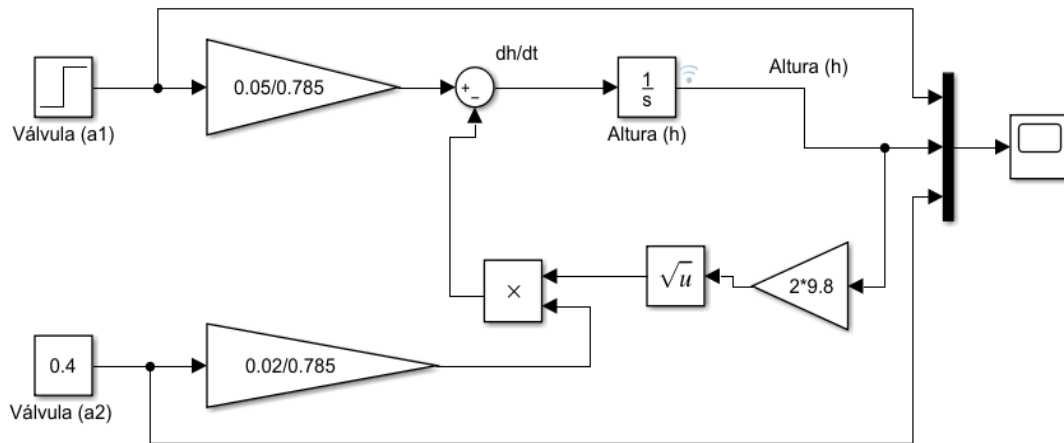
$$A \frac{dh(t)}{dt} = k_1 a_1 - k_2 a_2 \sqrt{2gh(t)} \quad (1)$$

Se analiza la planta con el modelo matemático no lineal, Ecuación 1. La Figura 3, representa una planta de nivel de un tanque cilíndrico el cual cuenta con los siguientes

datos: diámetro de $D_c = 1m$, radio del cilindro $r = 0.5m$. Entonces el área del tanque es calculada $A = \pi(0.5)^2; A = 0.785m^2$. Se conoce que la gravedad $g = 9,8 s/m^2$. Las constantes $k_1 = 0,05$ y $k_2 = 0,02$, a_1 varia de (0 a 1) y $a_2 = 0,4$ inicialmente. Con los parámetros de la planta de nivel establecidos, se implementa la simulación a lazo abierto en Simulink, como se muestra en la Figura 4.

Figura 4

Sistema de control a lazo abierto



La Figura 4, se manipula a la válvula a_1 en pasos de 0.1 (10%) por medio de la entrada tipo escalón y la válvula a_2 se mantiene con una apertura de 0.4 (40%) para verificar la salida representada por la altura h en Simulink (Pérez et al., 2008). En la Figura 5, se puede visualizar los resultados y en la Tabla 1, los valores obtenidos.

Figura 5

Comportamiento del sistema a lazo abierto con diferentes valores de entradas

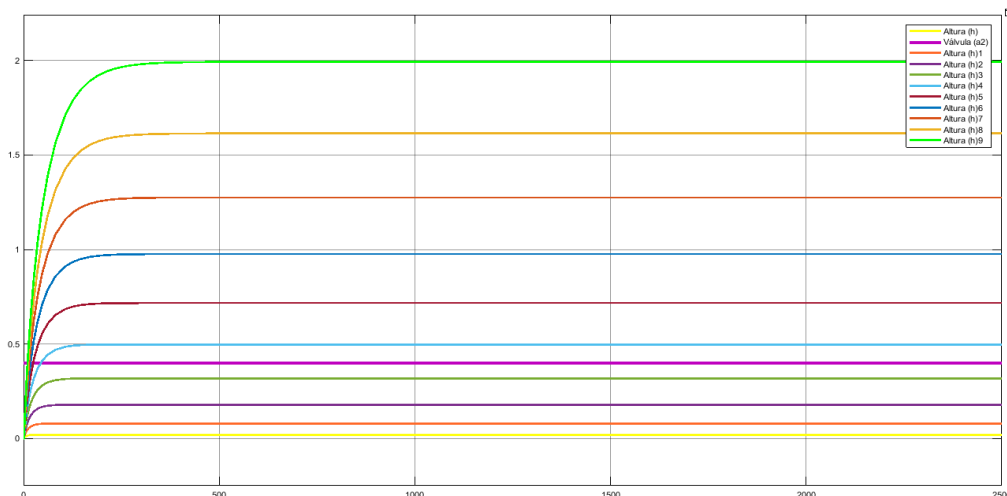


Tabla 1

Valores de entrada vs. salida del control en lazo abierto

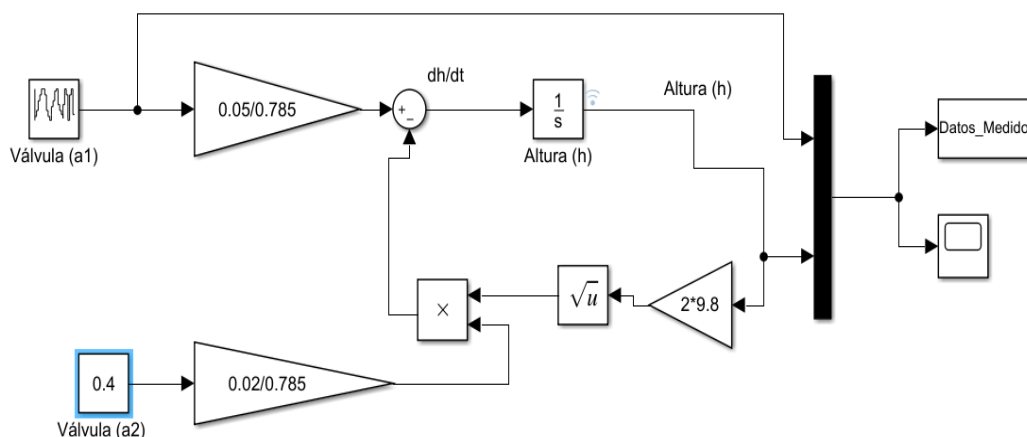
Apertura Válvula (a1)	Apertura Válvula (a2)	Nivel del líquido (h)	Tiempo de establecimiento (segundos)
0.1	0.4	0.01973	34
0.2	0.4	0.07892	86
0.3	0.4	0.1776	151
0.4	0.4	0.3157	180
0.5	0.4	0.4933	251
0.6	0.4	0.7103	300
0.7	0.4	0.9668	334
0.8	0.4	1.263	370
0.9	0.4	1.598	374
1	0.4	1.973	425

La Tabla 1, refleja una clara desviación del nivel h con respecto a la entrada válvula a_1 , ya que no realizamos ninguna acción de control. Se establece que la altura máxima que puede alcanzar es 1.973 cuando la válvula a_1 se encuentra abierta al 100 %.

Luego de verificar el comportamiento dinámico de la planta en lazo abierto mediante un modelo matemático no lineal en Simulink, se procede a obtener un modelo que represente el proceso en espacio de estados, se requiere obtener un conjunto de datos de las entradas y salidas, consiste en aplicar diferentes señales a la entrada de la planta para verificar la evolución del proceso a lo largo del tiempo (salida), los mismos que son almacenados para su posterior análisis. El esquema implementado se visualiza en la Figura 6.

Figura 6

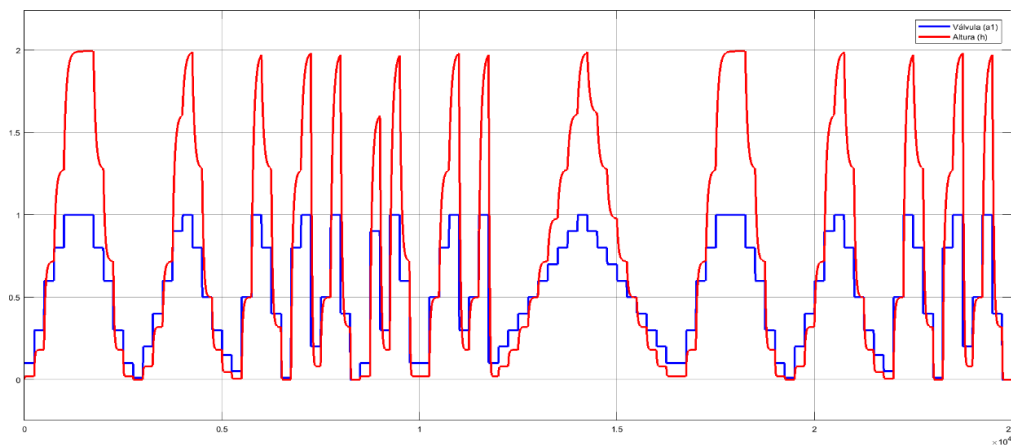
Sistema de control a lazo abierto para identificación de modelo matemático



Al sistema de control en lazo abierto de la Figura 6, por medio de una entrada tipo escalón ascendentes y descendentes se manipula a la válvula a_1 y la válvula a_2 se mantiene con una apertura de 0.4 (40%), se almacena la información con una frecuencia de muestreo de 0.1 segundos. En la Figura 7, se presenta la dinámica de la planta de nivel.

Figura 7

Dinámica del proceso

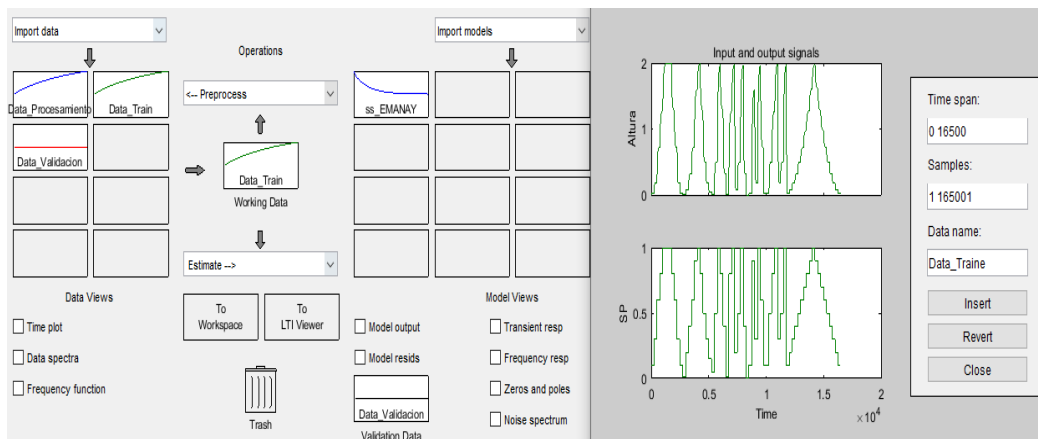


Nota. Entrada: apertura válvula (a_1), línea de color azul; Salida: altura (h), línea de color rojo. Número de muestras registradas 25000.

Para identificar el modelo matemático en espacio de estados se hace uso del Toolbox SystemIdentification de Matlab (Troncoso y Suárez, 2017). Con la información registrada de entrada y salida del proceso, se realiza un preprocesamiento segmentando en dos partes: 16500 datos para entrenamiento y 8500 datos para validación. Como se muestra en la Figura 8.

Figura 8

Preprocesamiento



La función de transferencia obtenida en espacio de estados, para el diseño de los controladores obtuvo un 72% de similitud, se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2

FT en espacio de estados

A=				
	x1	x2	x3	x4
x1	-0.0153	-0.0189	-7.036E-06	2.519E-05
x2	-0.0135	-0.016	-0.0401	0.0311
x3	-0.138	-0.1077	-0.8661	3.8831
x4	0.1278	0.1265	0.8274	-6.3881
B=				
	SP			
x1	0.001052			
x2	0.008244			
x3	0.4652			
x4	-0.6948			
C=				
	x1	x2	x3	x4
Altura	60.85	-0.05732	0.0001112	-1.429E-05
D=				
	SP			
Altura	0			

Diseño del control Fuzzy

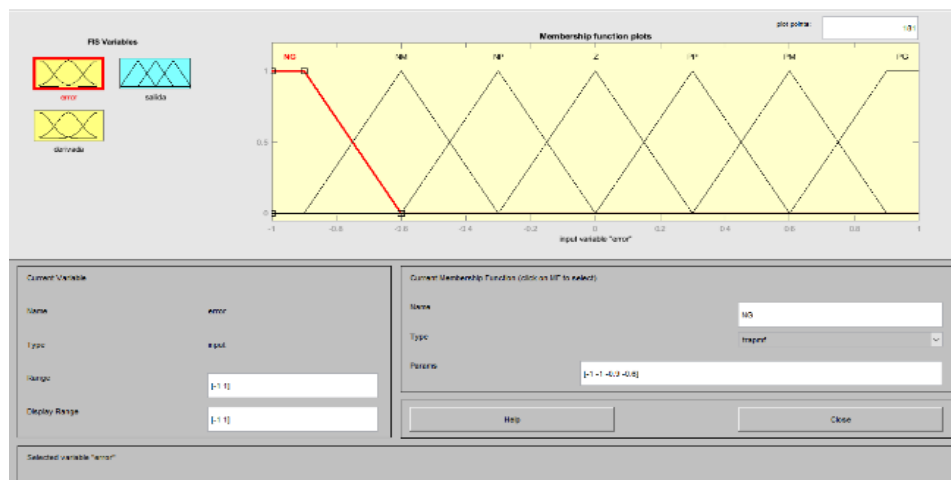
Se establecen los parámetros y condiciones de funcionamiento adecuados de la planta para el diseño del control Fuzzy. Se establecen 2 entradas y una salida; las variables de entrada son el error e , definido como la diferencia entre el valor de altura h deseado y el medido y la derivada del error. El rango o universo de discusión para el error y tasa de cambio del error es de $[-1 \text{ a } 1]$. La variable de salida del controlador corresponde a la acción de control, cuyo rango es de $[-1 \text{ a } 1]$.

Conjuntos difusos y variables lingüísticas:

Se establece siete conjuntos difusos para las variables de entrada; todos los conjuntos están distribuidos uniformemente en todo el universo de discusión mediante funciones de membresía tipo triángulo, a excepción de los extremos que tienen funciones trapezoidales. Puede ver conjuntos borrosos con funciones de pertenencia correspondientes en la Figura 9.

Figura 9

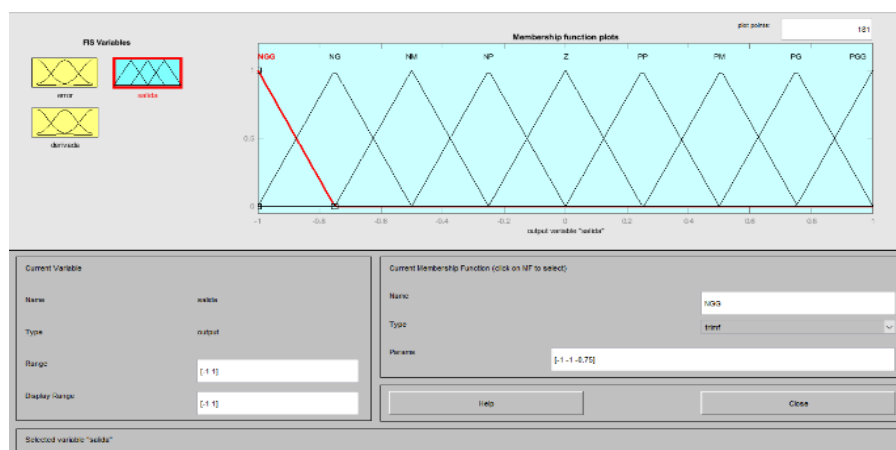
Funciones de pertinencia para las variables de entrada



En la Figura 9, se puede apreciar el nombre de las variables lingüísticas asignadas a cada conjunto de entradas, se disponen siete variables: NG (negativo grande), NM (negativo medio), NP (negativo pequeño), Z (cero), PP (positivo pequeño), PM (positivo medio) y PG (positivo grande) (Alomoto Iza y Quimbita Panchi, 2015; Jiménez Madrigal, 2007). Para la variable de salida se establecieron 9 conjuntos difusos distribuidos uniformemente en todo el universo de discusión mediante funciones de membresía tipo triángulo. En la Figura 10, se puede apreciar dichos conjuntos con las respectivas variables lingüísticas asignadas a cada uno: NGG (negativo grande grande), NG (negativo grande), NM (negativo medio), NP (negativo pequeño), Z (cero), PP (positivo pequeño), PM (positivo medio), PG (positivo grande) y PGG (positivo grande grande) (Calle Calle y Guamán Novillo, 2018).

Figura 10

Funciones de pertinencia para la variable de salida



Base de conocimientos y defusificación:

Una vez que se han definido los conjuntos difusos con las respectivas funciones de pertinencia y variables lingüísticas, se establece el conjunto de 49 reglas de control como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3

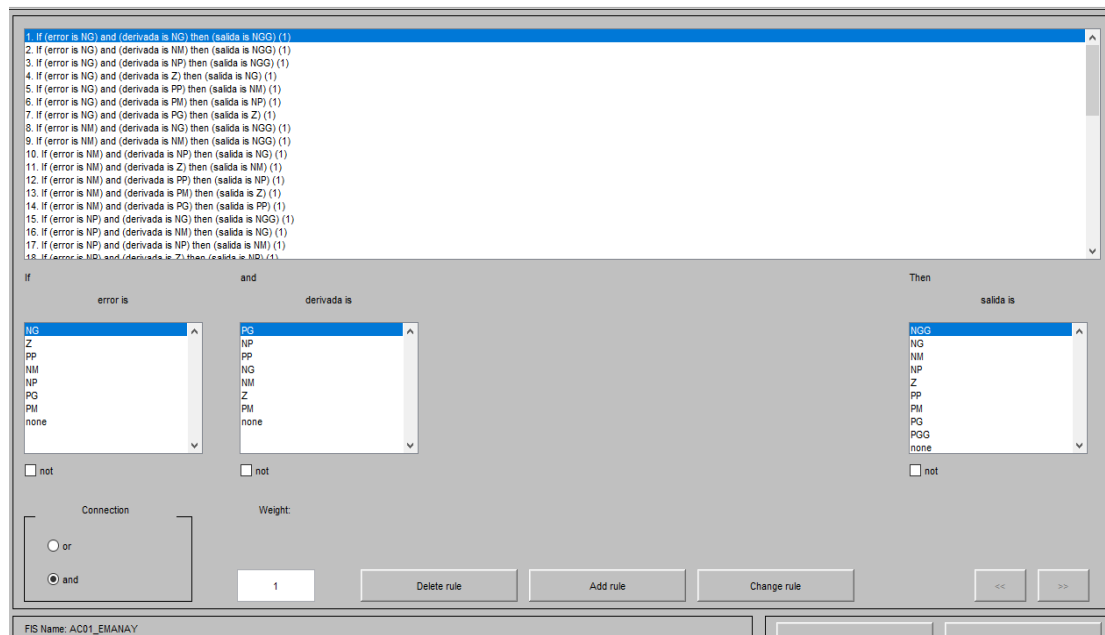
Reglas de control

e/de	NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
NG	NGG	NGG	NGG	NG	NM	NP	Z
NM	NGG	NGG	NG	NM	NP	Z	PP
NP	NGG	NG	NM	NP	Z	PP	PM
Z	NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
PP	NM	NP	Z	PP	PM	PG	PGG
PM	NP	Z	PP	PM	PG	PGG	PGG
PG	Z	PP	PM	PG	PGG	PGG	PGG

La Tabla 3, se debe interpretarse con una estructura IF-AND-THEN. Para la defusificación se empleó el método de Mandani, obteniendo la salida mediante el método del centroide (Kouro y Musalem, 2002). En la Figura 11, se presenta las reglas de control.

Figura 11

Reglas de control en la ventana rule editor

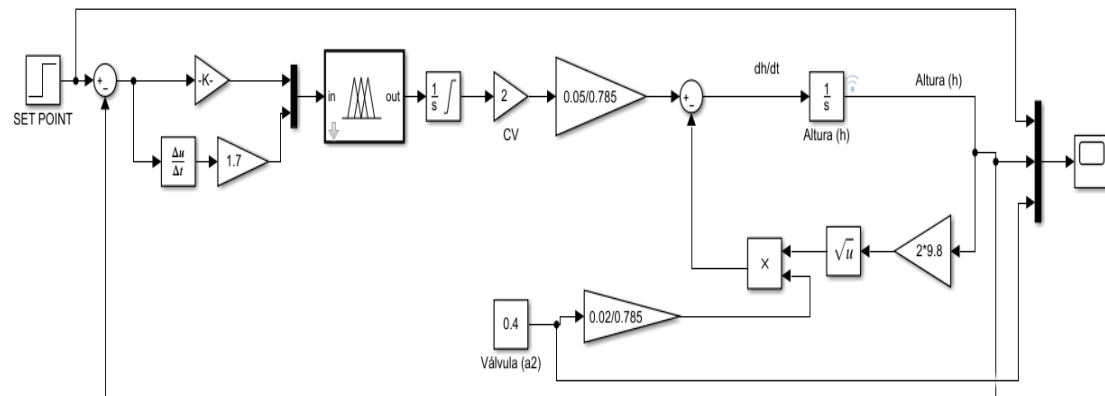


Implementación del controlador Fuzzy en Simulink

Se implementa el sistema a lazo cerrado con un control PD difuso con acción integral en Simulink, como se muestra en la Figura 12.

Figura 12

Sistema de control Fuzzy a lazo cerrado



Diseño del control MPC

Elementos del control predictivo

El modelo de predicción: debe ser capaz de capturar la dinámica del proceso para poder predecir las salidas futuras (Tsoeu y Esmail, 2011). Para el diseño del MPC, se opta por el modelo en espacio de estados.

Función objetivo: los diferentes algoritmos de control predictivo utilizan diferentes funciones objetivo o de costo para la obtención de la ley de control (Troncoso y Suárez, 2017).

$$J = [w(t + 1) - \hat{y}(t + 1|t)]^2 + \lambda[\Delta u(t)]^2 \quad (3)$$

Trayectoria de referencia: el sistema reaccionará antes que el cambio haya sido efectivamente aplicado, evitando de este modo retardos en la respuesta del proceso.

Procedimiento

Obtención del modelo de predicción: Para el diseño del controlador, se basa en el modelo generalizado en espacio de estados (Suwannik et al., 2016).

$$\dot{x}(t + 1) = Ax(t) + Bu(t) \quad (4)$$

$$y(t) = Cx(t + 1) \quad (5)$$

Compresión del optimizador: se usa el siguiente modelo de optimización el mismo que es cuadrático y con restricciones lineales (Jichkar y Sondkar, 2017).

$$\begin{aligned} \text{Min } J(u) &= \sum_{k=1}^N (\hat{y}(t+k|t) - w(t+k))^2 & (6) \\ u_{\text{mín}} &\leq u \leq u_{\text{máx}} \\ 0 &\leq u \leq 1 \\ y_{\text{mín}} &\leq y \leq y_{\text{máx}} \\ 0 &\leq y \leq 1 \end{aligned}$$

Parámetros de sintonización: se establece un tiempo de muestreo de 0.1 segundos, horizonte de predicción de 150 y horizonte de control de 15 (Báez Pedraza, 2018).

Implementación del controlador en Simulink

Para la simulación se propone el diagrama de control diseñado en Simulink, nótese que se ha desactivado la medición de perturbación, puesto que no está considerado en el modelamiento dicha variable, Figura 13, el bloque del controlador predictivo está configurado como ilustra la Figura 14.

Figura 13 Diagrama de control MPC

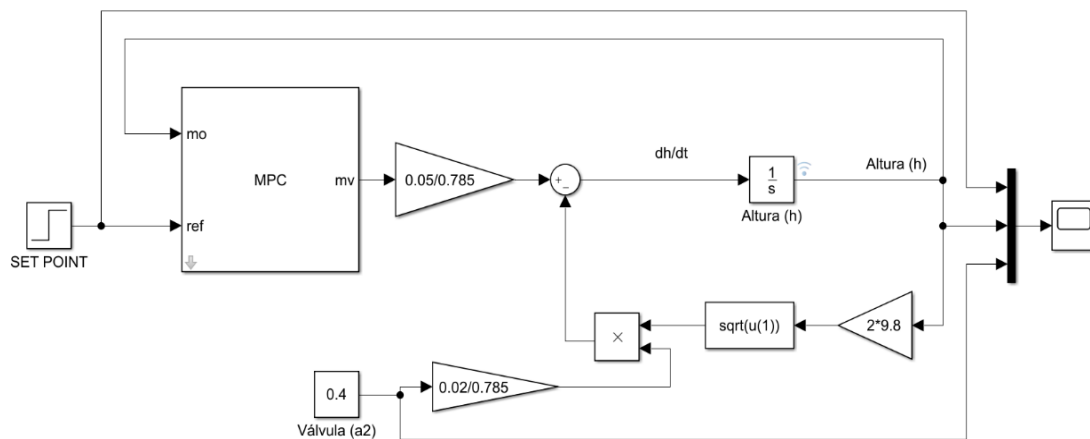
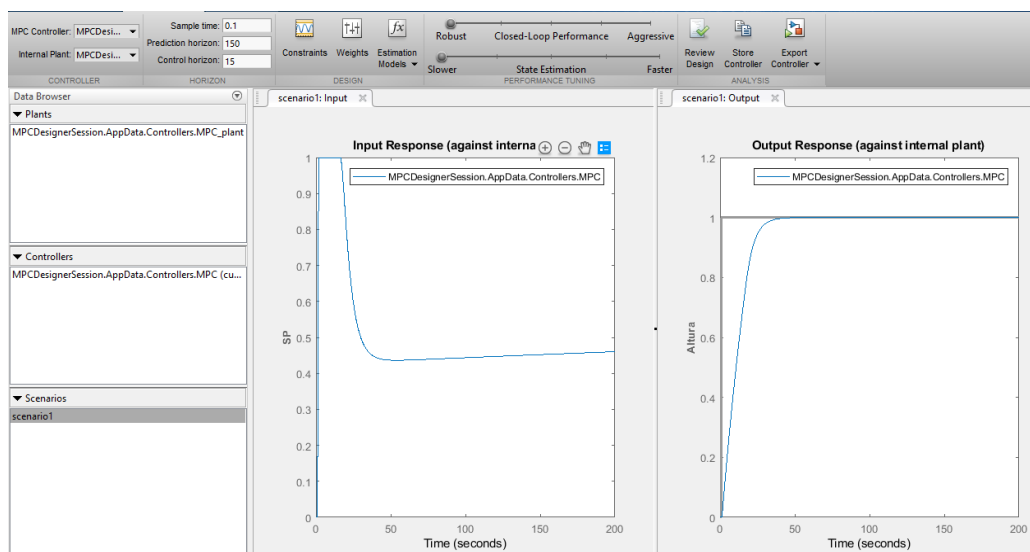


Figura 14 Configuración del control MPC



3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El sistema de control PD difuso con acción integral y MPC, para la simulación en base al diseño de la Figura 13 y Figura 14 respectivamente, se sometió a una entrada de tipo escalón unitaria, con una apertura de la válvula a_2 de [0.4 a 0.56], se verifico el comportamiento del sistema frente al controlador PID.

Se presenta cada uno de los resultados en la Figura (15, 16, 17).

Nota. Señal del controlador, línea de color verde; Variable de proceso: nivel, línea de color azul; Set Point: válvula a_1 , línea de color rojo; Apertura Válvula (a_2), línea de color naranja.

Figura 15

Control PID

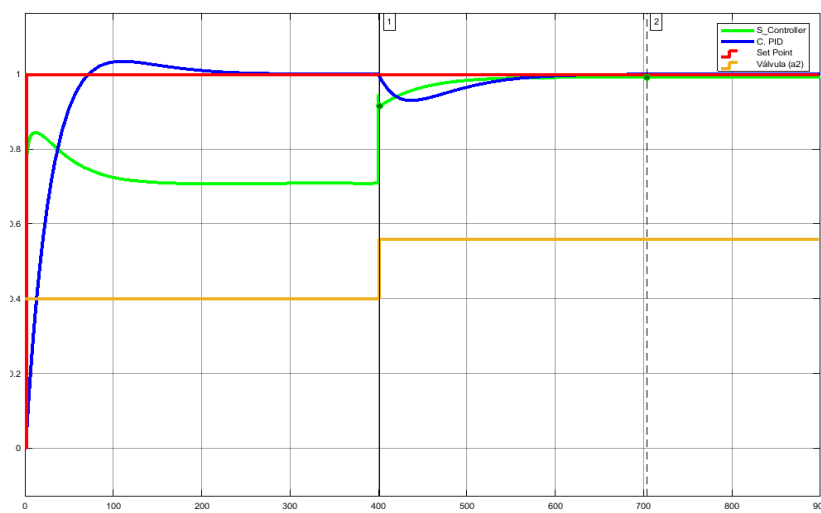


Figura 16

Control PD difuso con acción integral

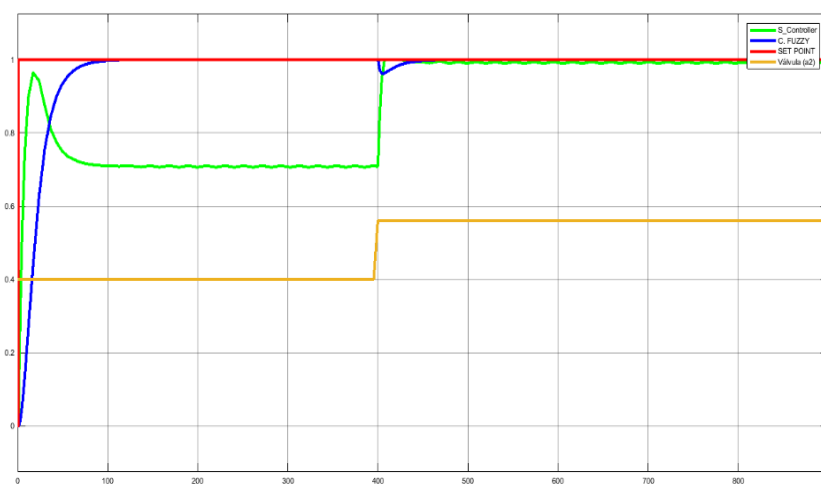
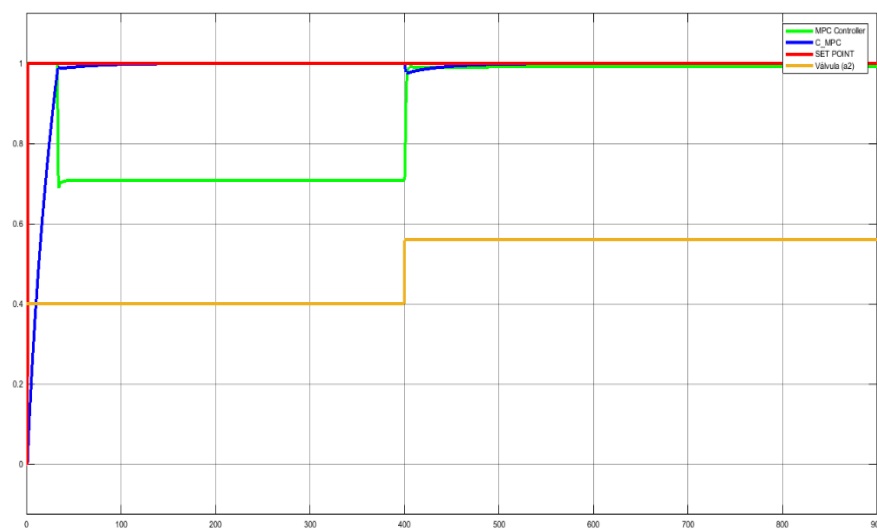


Figura 17

Control MPC



De las Figuras (15,16,17), se extraen características representativas como se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4.

Características de control PID, Fuzzy y MPC con apertura de la válvula $a_2 = 0.4$

Tiempo (s)		Tiempo (s)					
Retardo (t_d)	Crecimiento (t_r)	Pico (t_p)	Sobre impulso máximo (M_p)	Establecimiento (t_s)	Variable de proceso: nivel del líquido (h)	Error en estado Estacionario	
PID	18.262	71.644	101.613	3.30 %	292.664	1.001	0.20 %
Fuzz y	20.135	84.755	0	0	119.407	0.9991	0.09 %
MPC	13.580	51.977	0	0	140.947	0.9999	0.01 %

Tabla 5.

Características de control PID, Fuzzy y MPC con apertura variable de la válvula $a_2 = [0.4 \text{ a } 0.56]$

	Tiempo de perturbación	Tiempo Transitorio	Tiempo de establecimiento (t_s)	Variable de proceso: nivel del líquido (h)	Error en estado Estacionario
PID	400	167.638	244.433	0.9982	0.20 %
Fuzzy	400	35.588	82.414	0.9989	0.09 %
MPC	400	46.826	137.669	0.9999	0.01 %

En base a las Tablas 4, 5: el controlador PID, genera un sobre impulso máximo de 3.30 %, un tiempo de establecimiento de 292.664 segundos y un error de estado estacionario de 0.20 %. El control Fuzzy por su parte no genera sobre impulso, con un tiempo de estabilización de 119.407 segundos con un error en estado estacionario de 0.09 %. La respuesta del controlador MPC es rápida con un tiempo de establecimiento de 140.947 segundos y no tiene sobre impulso máximo, no obstante, existe un cambio brusco de la parte transitoria a la parte estable con un error en estado estacionario de 0.01 %.

Los controladores diseñados ante una la apertura de la válvula a_2 menores a 0.56 (56 %), tienen la capacidad de volver a estabilizarse, mientras que, si ingresamos una perturbación a la válvula a_2 mayor a 0.6 (60 %), ya no tienen la capacidad de volver a recuperarse.

4. CONSIDERACIONES FINALES

El control Fuzzy: PD difuso con acción integral no genera sobre impulso, con un tiempo de estabilización de 119.407 segundos y un error en estado estacionario de 0.09 %.

La respuesta del controlador MPC es rápida con un tiempo de establecimiento de 140.947 segundos y no tiene sobre impulso máximo, pero no obstante existe un cambio brusco de la parte transitoria a la parte estable con un tiempo de crecimiento de 51.977 segundos y un error en estado estacionario del 0.01 %.

El control Fuzzy: PD difuso con acción integral, presenta un mejor rendimiento para el proceso de nivel, ya que, el tiempo de establecimiento es de 119.407 segundos y ante una perturbación se establece en un tiempo de 82.414 segundos.

Los controladores Fuzzy, MPC y PID tienen un buen desempeño ante aberturas de la válvula a_2 no mayores del 56 %.

5. LISTA DE REFERENCIAS

- Alomoto Iza, L. M., & Quimbita Panchi, E. A. (2015). Artículo Científico-Diseño e implementación de controladores difusos aplicado a los procesos de Presión y Flujo del Laboratorio de Redes Industriales y Control de Procesos de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE Extensión Latacunga, integrados por una Red Ethernet Industrial. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/9346>
- Alotaibi, M., Balabid, M., Albeladi, W., & Alharbi, F. (2019, June). Implementation of liquid level control system. In 2019 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS) (pp. 311-314). IEEE. doi:10.1109/i2cacis.2019.8825058
- Åström, K. J., & Murray, R. M. (2008). Feedback systems. An Introduction for Scientists and engineers. Princeton University Press.
- Báez Pedraza, M. C. (2018). Control predictivo multivariado para el sistema de péndulo invertido. Bogotá. [Tesis de Ingeniería, Universidad Santo Tomas]. <https://repository.usta.edu.co/jspui/bitstream/11634/15462/1/2019camilabaez.pdf>
- Bo, B., Chuang, L., & Meng, C. (2016, July). Based on plc fuzzy control algorithm in the application of level control. In 2016 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C) (pp. 698-701). IEEE. doi:10.1109/is3c.2016.179
- Calle Calle, D. E., & Guamán Novillo, P. F. (2018). Diseño e implementación de un control difuso de velocidad para el motor hidráulico HRE HIDRAULIC [Tesis de ingeniería, Universidad Politécnica Salesiana]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/16369/1/UPS-CT007970.pdf>
- De Prada, C. (2010). El futuro del control de procesos. *Revista Iberoamericana de automática e informática industrial*, 1(1), 5-14. doi: 10.4995/riai.2004.8020
- Efheij, H., Albagul, A., & Albraiki, N. A. (2019, March). Comparison of model predictive control and PID controller in real time process control system. In 2019 19th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA) (pp. 64-69). IEEE. doi:10.1109/sta.2019.8717271
- Gehlaut, S., Varshney, T., & Gupta, S. (2018, June). Performance Analysis of MPC for Level Control of Modified Quadruple Tank System. In 2018 2nd International

- Conference on Power, Energy and Environment: Towards Smart Technology (ICEPE) (pp. 1-6). IEEE. doi:10.1109/epetsg.2018.8659317
- Jichkar, C. D., & Sondkar, S. Y. (2017, April). Comparative study of real time implementation of LabVIEW based MPC controller and PID controller for flow control loop. In 2017 2nd International Conference for Convergence in Technology (I2CT) (pp. 464-470). IEEE. doi:10.1109/i2ct.2017.8226172
- Jiménez Madrigal, R. (2007). Diseño de un controlador lógico difuso, aplicado al control de posición de un servomotor de CD, usando un algoritmo genético. <https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/123456789/1736/Tesis-Jimenez-Madrigal-Rene.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Kouro, S., & Musalem, R. (2002). Control mediante lógica difusa. *Técnicas Modernas en Automática*, 1, 1-7. <http://www2.elo.utfsm.cl/~elo377/documentos/Fuzzy.pdf>
- Mursyitah, D., Faizal, A., & Ismaredah, E. (2018, October). Level Control in Coupled Tank System Using PID-Fuzzy Tuner Controller. In 2018 Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS) (pp. 293-298). IEEE. doi:10.1109/eccis.2018.8692846
- Patel, H. R., & Shah, V. (2018, May). Fuzzy logic based passive fault tolerant control strategy for a single-tank system with system fault and process disturbances. In 2018 5th international conference on electrical and electronic engineering (ICEEE) (pp. 257-262). IEEE. doi:10.1109/iceee2.2018.8391342
- Perez, M., Pérez, A., & Pérez, E. (2008). Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo. *Universidad Nacional de San Juan*. <http://dea.unsj.edu.ar/control1/apuntes/unidad1y2.pdf>
- Popescu, M. (2018). Comparative study of PID and Fuzzy level control using delta v distributed system. In 2018 10th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI) (pp. 1-4). IEEE. doi:10.1109/ecai.2018.8679011
- Prusty, S. B., Pati, U. C., & Mahapatra, K. (2014, February). Implementation of fuzzy-PID controller to liquid level system using LabVIEW. In Proceedings of the 2014 International Conference on Control, Instrumentation, Energy and Communication (CIEC) (pp. 36-40). IEEE. doi:10.1109/ciec.2014.6959045
- Suwannik, P., Jennawasin, T., & Banjerdpongchai, D. (2016, November). Design of linear model predictive control for level control process with output feedback from

- wireless transmitter. In 2016 International Automatic Control Conference (CACCS) (pp. 132-136). IEEE. doi:10.1109/cacs.2016.7973897
- Troncoso, C., & Suárez, A. (2017). Control del Nivel de Pulpa en un Circuito de Flotación utilizando una Estrategia de Control Predictivo. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 14(3), 234-245. doi: 10.1016/j.riai.2017.04.003
- Tsoeu, M. S., & Esmail, M. (2011, September). Unconstrained MPC and PID evaluation for motion profile tracking applications. In *IEEE Africon'11* (pp. 1-6). IEEE. doi:10.1109/afrcon.2011.6072037
- Tzafestas, S., & Papanikolopoulos, N. P. (1990). Incremental fuzzy expert PID control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 37(5), 365-371. doi:10.1109/41.103431
- Vinothkumar, C., & Esakkiappan, C. (2021). Fuzzy PI and Fuzzy PID Controller Based Hopper Tank Level Control System. In *2021 International Conference on Advances in Electrical, Computing, Communication and Sustainable Technologies (ICAECT)* (pp. 1-5). IEEE. doi:10.1109/icaect49130.2021.9392451
- Yao, G., Gao, F., Wang, C., & Chen, X. (2009, June). Design and simulation based on Kalman filter fuzzy adaptive PID control for mold liquid level control system. In *2009 Chinese Control and Decision Conference* (pp. 6105-6109). IEEE. doi:10.1109/ccdc.2009.5195297