

# Implementación de un sistema de control inteligente para el procesamiento de aguas residuales.

## Implementation of intelligent control systems for wastewater processing.

Oscar Javier Suarez-Sierra<sup>1</sup>, Luis Fernando Ortega-Ibáñez<sup>2</sup>, Typhanie Solano-López<sup>3</sup>,  
Aldo Pardo-García<sup>4</sup>, Abelardo Mejía-Bugallo<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Pamplona, Pamplona - Colombia

ORCID: <sup>1</sup>[0000-0002-6754-5713](https://orcid.org/0000-0002-6754-5713), <sup>2</sup>[0009-0004-9032-4902](https://orcid.org/0009-0004-9032-4902), <sup>3</sup>[0009-0007-7842-0557](https://orcid.org/0009-0007-7842-0557), <sup>4</sup>[0000-0003-2040-9420](https://orcid.org/0000-0003-2040-9420),  
<sup>5</sup>[0000-0002-0812-6471](https://orcid.org/0000-0002-0812-6471)

Recibido: 09 de mayo de 2024.

Aceptado: 14 de agosto de 2024.

Publicado: 01 de septiembre de 2024.

**Resumen-** La creciente demanda de procesos eficientes y sostenibles en la industria del tratamiento de aguas ha motivado la búsqueda de soluciones avanzadas de control automático. El desarrollo del proyecto implicó la instalación y configuración de una planta de tratamiento de agua a escala, equipada con sensores de nivel y temperatura, actuadores y un sistema de control inteligente y una interfaz de monitorización diseñada en LabView. Se implementaron y evaluaron diferentes estrategias de control, incluyendo controladores clásicos (como PID) y técnicas avanzadas de control inteligente. Este enfoque permitió una comparación exhaustiva de los rendimientos de cada método en condiciones reales de operación. La implementación de un control difuso multivariable permitió la regulación simultánea del nivel de líquido y la temperatura del sistema, con un bajo coste de procesamiento permitiendo compactar el proceso. Este enfoque de control multivariable no solo mejoró la eficiencia general del sistema, sino que también demostró la viabilidad de automatizar procesos complejos de tratamiento de agua con mínima intervención humana.

**Palabras clave:** control clásico, control difuso, simulación, procesamiento de aguas residuales.

**Abstract—** The growing demand for efficient and sustainable processes in the water treatment industry has motivated the search for advanced automatic control solutions. The development of the project involved the installation and configuration of a scaled water treatment plant, equipped with level and temperature sensors, actuators and an intelligent control system and monitoring interface designed in LabView. Different control strategies were implemented and evaluated, including classical controllers (such as PID) and advanced intelligent control techniques. This approach allowed a comprehensive comparison of the performances of each method under real operating conditions. The implementation of multivariable fuzzy control allowed the simultaneous regulation of the liquid level and temperature of the system, with a low processing cost allowing compactness of the process. This multivariable control approach not only improved overall system efficiency, but also demonstrated the feasibility of automating complex water treatment processes with minimal human intervention.

**Keywords:** classical control, fuzzy control, simulation, wastewater processing.

\*Autor para correspondencia.

Correo electrónico: [oscar.suarez@unipamplona.edu.co](mailto:oscar.suarez@unipamplona.edu.co) (Oscar Javier Suarez Sierra).

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad de Santander.

Este es un artículo bajo la licencia CC BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Como citar este artículo: O. J. Suarez-Sierra, L. F. Ortega-Ibáñez, T. Solano-López, A. Pardo-García y A. Mejía-Bugallo, "Implementación de un sistema de control inteligente para el procesamiento de aguas residuales", *Aibi revista de investigación, administración e ingeniería*, vol. 12, no. 3, pp. 171-184 2024, doi: [10.15649/2346030X.4702](https://doi.org/10.15649/2346030X.4702)

## I. INTRODUCCIÓN

El tratamiento de aguas residuales es un proceso fundamental para garantizar la sostenibilidad ambiental y la salud pública en las sociedades modernas [1], [2]. Este proceso complejo implica una serie de etapas interconectadas que tienen como objetivo principal transformar el agua contaminada en un recurso seguro y reutilizable, reduciendo significativamente el impacto negativo de la contaminación hídrica en los ecosistemas y comunidades [3].

El tratamiento de aguas residuales abarca una variedad de procesos físicos, químicos y biológicos, cada uno diseñado para abordar aspectos específicos de la purificación del agua [4]. Entre estos procesos, se destacan la oxidación, la adsorción y la ultrafiltración por membranas, que desempeñan roles cruciales en la eliminación de contaminantes y la mejora de la calidad del agua [5]. En este estudio, nos enfocamos específicamente en el tratamiento primario y secundario de aguas residuales, donde el control preciso del nivel y la temperatura que juegan un papel fundamental [6]. El tratamiento primario implica la sedimentación de sólidos suspendidos, mientras que el tratamiento secundario utiliza procesos biológicos para degradar la materia orgánica [7]. En ambas etapas, mantener un nivel adecuado de líquido y una temperatura óptima es crucial para la eficiencia del proceso. Un aspecto crítico en estos procesos es la determinación precisa de la cantidad de químicos necesarios en relación con el volumen de líquido a tratar, así como el mantenimiento de condiciones térmicas apropiadas para la actividad microbiana, lo que requiere un control y una monitorización constante de ambos parámetros [8].

El artículo es dividido en 5 secciones de la siguiente manera: en la sección II se presenta el marco teórico y el fundamento del estado del arte revisado, en la sección III se presenta la metodología utilizada para la identificación del sistema y el diseño de los controladores clásicos e inteligentes. Por su parte, en la sección IV se encuentran los resultados de simulación y tiempo real implementados en LabVIEW, en la sección V las principales conclusiones del trabajo desarrollado y finalmente en la sección VI los agradecimientos de quienes apoyaron la presente investigación.

## II. MARCO TEÓRICO

En este contexto, el control preciso del nivel y la temperatura emergen como componentes vitales del tratamiento de aguas residuales. La importancia de mantener una correlación casi perfecta entre el agua contaminada y los procesos de tratamiento no puede subestimarse, ya que cualquier desviación significativa puede comprometer la eficacia del tratamiento y, en consecuencia, la calidad del agua resultante [9]. Un control inadecuado del nivel puede llevar a situaciones donde el líquido tratado no cumpla con los estándares requeridos para el consumo humano o el vertido seguro en el medio ambiente [10].

Paralelamente, el control de la temperatura desempeña un papel crucial en la optimización de los procesos de tratamiento. Mantener una temperatura constante o elevarla de manera controlada puede aumentar significativamente la eficiencia de los procesos biológicos y químicos involucrados en el tratamiento de aguas residuales [11], [12]. Por ejemplo, temperaturas más altas pueden acelerar las reacciones químicas y aumentar la actividad metabólica de los microorganismos responsables de la degradación de contaminantes, lo que resulta en una mayor tasa de tratamiento y una mejor calidad del efluente [13].

La planta de tratamiento objeto de este estudio incorpora una serie de procesos secuenciales interdependientes. Para facilitar el análisis y la implementación, se ha dividido el sistema en dos secciones principales: el control de nivel y el control de temperatura. Este trabajo se centra en el desarrollo de un sistema de control inteligente que integra ambos parámetros, reconociendo su papel fundamental en garantizar el funcionamiento óptimo de los procesos subsiguientes [14]. La regulación simultánea del nivel y la temperatura no solo mejora la eficiencia general del tratamiento, sino que también permite una mayor flexibilidad operativa y adaptabilidad a diferentes tipos de aguas residuales y condiciones ambientales [15].

Diferentes trabajos en el área de tratamiento de agua con sistemas inteligentes para el control se han desarrollado en los últimos años [16], [17], [18], [19]. En [16], se presentó un sistema de control inteligente basado en aprendizaje profundo para la optimización del proceso de tratamiento de aguas residuales. Su enfoque utiliza redes neuronales recurrentes para predecir y controlar parámetros clave como el nivel de oxígeno disuelto y la concentración de nitrógeno amoniacal, logrando una mejora significativa en la eficiencia energética y la calidad del efluente. En [17], se propuso un enfoque de control predictivo basado en modelo (MPC) para la optimización integrada del tratamiento de aguas residuales y la recuperación de recursos. Su sistema utiliza modelos dinámicos del proceso para predecir y optimizar simultáneamente el consumo de energía, la calidad del efluente y la producción de biogás, logrando un equilibrio entre múltiples objetivos de rendimiento. En [18], se desarrolló un sistema de control difuso adaptativo para la gestión del nivel y la temperatura en plantas de tratamiento de aguas residuales. Su método combina lógica difusa con algoritmos de optimización para ajustar dinámicamente los parámetros de control, demostrando una mayor robustez frente a perturbaciones y cambios en las condiciones de operación. Finalmente, en [19], se presentó un sistema de control inteligente híbrido que combina redes neuronales artificiales y algoritmos genéticos para la optimización en tiempo real de plantas de tratamiento de aguas residuales. Su enfoque demostró una mejora significativa en la eliminación de nutrientes y la estabilidad del proceso, adaptándose eficazmente a variaciones en la carga de entrada y las condiciones ambientales.

Como desarrollo de un control preciso del nivel, se ha implementado un sistema que utiliza un sensor de ultrasonido de bajo costo. Esta elección refleja la tendencia actual hacia soluciones económicamente viables en el tratamiento de aguas, sin comprometer la eficacia del proceso [20]. El sistema también incorpora bombas de agua para regular la entrada y salida del fluido, así como módulos de relé que permiten la integración y control a través de una tarjeta Arduino. Esta configuración no solo ofrece flexibilidad en el diseño del sistema de control, sino que también facilita la experimentación con diferentes estrategias de control [21].

El tratamiento efectivo de aguas residuales requiere la implementación de una serie de subsistemas interconectados. Estos subsistemas son responsables de la recopilación, procesamiento y transmisión de datos cruciales para la aplicación de diversos métodos de control. El espectro de técnicas de control empleadas abarca desde los enfoques clásicos hasta los más avanzados, como el control neuronal, con el objetivo de identificar la estrategia más eficaz tanto en entornos simulados como en aplicaciones prácticas [22], [23].

Antes de la implementación de cualquier sistema de control, es imperativo comprender e identificar el comportamiento intrínseco de la planta. Este proceso de caracterización es fundamental para diseñar estrategias de control efectivas y robustas [24], [25], [26]. Además, es crucial reconocer las limitaciones inherentes al uso de sensores de bajo costo y desarrollar métodos para compensar estas limitaciones, mejorando así el rendimiento general del sistema [27].

En las secciones siguientes de este artículo, se describirá detalladamente el proceso de implementación, desde el montaje físico hasta la caracterización de la planta con los resultados correspondientes. En la sección 2 se presentan los métodos para el desarrollo de los diferentes controles, en la sección 3 se presenta los resultados correspondientes para cada control con su respectivo proceso.

### III. METODOLOGÍA O PROCEDIMIENTOS

#### Funcionamiento del sistema

La Fig.1 presenta el montaje físico de la planta de tratamiento de aguas residuales, donde para el control de nivel de líquido se utilizan bombas sumergibles y para el control de temperatura se utiliza una resistencia térmica para calentar y un conducto de cobre en ciclo cerrado para el enfriamiento del tanque.



Figura 1: Montaje físico, prototipo de planta de tratamiento de aguas.  
Fuente: Elaboración propia.

In (Tiempo(s))	Out (Nivel de líquido(cm))
5.64	18.17
9.37	17.00
13.58	15.96
17.45	15.08
21.09	13.89
25.52	12.56
29.29	11.48
33.33	9.70
37.55	8.70
42.05	8.10
46.15	7.08
50.07	6.13
54.44	4.55
59.22	3.75
64.25	2.19
69.88	1.41
69.88	0.86
72.71	1.08
75.86	3.44
79.38	3.82
86.29	4.44
82.87	5.93
89.48	6.91
93.09	7.55
96.93	8.98
100.81	9.80
104.33	10.12
108.61	11.91
112.83	13.12
117.04	14.87
121.41	15.70
124.61	16.56
128.53	17.96

Tabla 1: Caracterización de la planta Nivel.  
Fuente: Elaboración propia.

### a. Caracterización de la Planta (Proceso de Nivel)

Existen varias formas de caracterizar un sistema, teniendo en cuenta los datos que disponemos en la planta se usara el método de Caja Negra para la estimación de la función de transferencia.

#### Caja Negra y Toma de Datos.

Este método es bastante practico en sistemas donde se tiene bastante claro la entrada (tiempo en segundos) y la salida (nivel de líquido).

Luego se procede a recorrer todo el rango de operación con la máxima capacidad de la bomba de entrada y un valor fijo para la bomba de salida, se tomarán los datos subiendo y bajando y se guardara los datos tanto del tiempo, como del valor real del ultrasonido cada centímetro que aumenta o disminuya el nivel hasta que recorra todos los rangos de operación.

Con respecto a la Tabla 1 es importante tener en cuenta las siguientes consideraciones, ya que nuestro sensor de ultrasonido se ubica en la parte superior del tanque, se debe tomar el valor directo que arroja el sensor sin ningún tipo de filtración o procesamiento.

Teniendo presente lo anterior se procede a identificar la Función de Transferencia del proceso de nivel del sistema.

### b. Estimación de la Función de Transferencia (Proceso de Nivel)

Una vez que los datos se cargaron en la herramienta *ident* de Matlab, como se evidencia en la Fig. 2, se procede con la estimación de la función de transferencia, donde se realizó combinaciones con la cantidad de polos y ceros, esto con el fin de tener la estimación más cercana al 100% de nuestra planta real.

$$TF1 = G(s) = \frac{0.004207}{s^2 + 0.1071s + 0.02643} \quad (1)$$



Figura 2: Comportamiento en lazo Abierto TF1.  
Fuente: Elaboración propia.

Al analizar la Fig. 2 se puede evidenciar que el tiempo de establecimiento es bastante similar al tiempo máximo del ciclo de operación de la Tabla 1 garantizando un comportamiento similar al sistema real.

**c. Caracterización de la Planta (Proceso de Temperatura)**

Una vez implementados los elementos necesarios para la variación de temperatura, se mantendrá con agua fría para hacer los cambios de temperatura mucho más rápido, ya que se conecta por medio de una tubería de cobre que retroalimenta al mismo tanque evitando que se entre más agua al tanque de temperatura y enfriándolo por medio de la transferencia de calor. Una vez teniendo el proceso de temperatura claro se procede a caracterizar el sistema tomando los datos del sensor en el rango de operación, tanto de subida como de bajada en función del tiempo.

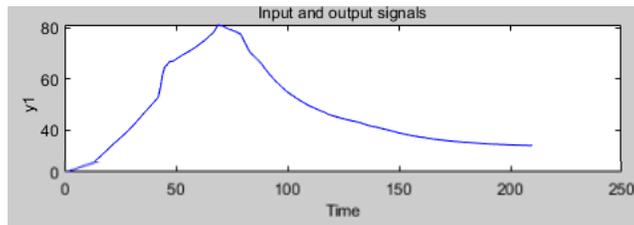


Figura 3: Caracterización de Temperatura.  
Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la Fig. 3 se utiliza la función interna de Matlab “*ident*” donde se estimó la siguiente función de transferencia.

$$TF2 = G2(s) = \frac{0.0001713}{s^2 + 0.008983s + 0.0004743} \quad (2)$$

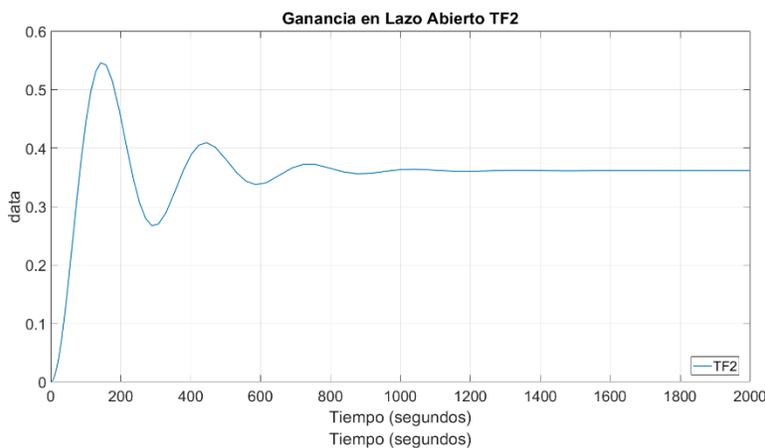


Figura 4: Comportamiento en lazo Abierto TF2.  
Fuente: Elaboración propia.

Debido a que la ganancia en lazo abierto no limita la potencia de la resistencia real, esta provoca un sobre pico en el modelo de los dos sistemas tanto nivel Fig. 2 y temperatura Fig. 4.

#### d. Control Clásico (Sintonización Nivel)

De la Fig.2 se tiene en cuenta que dicha respuesta es de tipo sigmoideal, por consiguiente se utilizará los métodos en lazo cerrado, comparándolas con el “pidtune” de Matlab para verificar el mejor resultado. Con los datos obtenidos utilizando el método de Ziegler Nichols y Tyreus-Luyben, obtenemos un periodo crítico  $P_{cr} = 2.738$  y  $K_{cr}$  de 1250.

	Ziegler Nichols	Tyreus-Luyben	pidtune
<b>K<sub>p</sub></b>	750.00	568.18	12.3
<b>K<sub>i</sub></b>	547.85	93.38	0.997
<b>K<sub>d</sub></b>	256.69	246.93	38.2

Tabla 2: Cálculo de las constantes por el método dos o en lazo cerrado.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenidos los datos de las constantes de los controladores clásicos, se procede a modelar el sistema en el diagrama de bloque de simulink. Se utilizó el ruido blanco para representar las perturbaciones reales en nuestro sistema, adicionalmente se optó por regular en un punto para la comparación de los controladores.

#### e. Control Difuso (Diseño Nivel)

Teniendo en cuenta la función de transferencia del proceso de nivel (1), se procede a diseñar el controlador Difuso, donde utilizaremos el control difuso proporcional derivativo de 5 funciones de membresía y el controlador difuso proporcional, integral, derivativo de 3 funciones de membresía con el fin de comparar su respuesta y escoger el más adecuado para nuestro sistema.

##### 1. Controlador Difuso PD5.

Se configura los rangos para la **salida** del controlador, con las funciones de la siguiente forma, donde tenemos 3 funciones triangulares en la parte interna y dos de tipo trapezoidal en los extremos.

- $Eje\ x = [-70\ 190]$
- $Z = [16.68\ 60\ 103.3]$
- $PS = [80.8\ 125.2\ 171.7]$
- $NS = [-49.2\ -5\ 41.8]$
- $PB = [158.7\ 190\ 268\ 268]$
- $NB = [-135\ -135\ -70\ -36.2]$

Para la **entrada (Error)**, donde tenemos 3 funciones triangulares en la parte interna y dos de tipo trapezoidal en los extremos.

- $Eje\ x = [-6\ 6]$
- $Z = [-0.3\ 0\ 0.3]$
- $PS = [0\ 0.3\ 0.6]$
- $NS = [-0.6\ -0.3\ 0]$
- $PB = [0\ 0.6\ 6\ 6]$
- $NB = [-6\ -6\ -0.6\ 0]$

Para la **entrada derivativa (Derror)**, donde tenemos 3 funciones triangulares en la parte interna y dos de tipo trapezoidal en los extremos.

- $Eje\ x = [-1500\ 1500]$
- $Z = [-750\ 0\ 750]$
- $PS = [525\ 975\ 1425]$
- $NS = [-1425\ -975\ -525]$
- $PB = [939\ 1200\ 1500\ 1500]$
- $NB = [-1500\ -1500\ -1200\ -939]$
- 

##### 2. Controlador Difuso PID3.

Se configura los rangos para la salida del controlador, con las funciones de la siguiente forma, donde tenemos una función triangular en la parte interna y dos de tipo trapezoidal en los extremos.

- $Eje\ x = [-70\ 190]$
- $Z = [35.93\ 60\ 84.15]$
- $P = [79.64\ 111.4\ 260.2\ 260.2]$
- $N = [-827.6\ -158.3\ 6.343\ 40.28]$

Para la **entrada (Error)**

- $Eje\ x = [-8\ 8]$
- $Z = [-0.16\ 0\ 0.16]$
- $P = [0.1287\ 0.8\ 8\ 8]$
- $N = [-8\ -8\ -0.8\ -0.1287]$

Para la **entrada Derivativa (Derror)**

- Eje  $x = [-1500 \ 1500]$
- $Z = [-450 \ 0 \ 450]$
- $PB = [270 \ 750 \ 1500 \ 1500]$
- $NB = [-1500 \ -1500 \ -750 \ -270]$

Para la **entrada Integrativa (Ierror)**

- Eje  $x = [-2000 \ 2000]$
- $Z = [-800 \ 0 \ 800]$
- $P = [0 \ 800 \ 2167 \ 3500]$
- $N = [-3500 \ -2167 \ -800 \ 0]$

**3. Análisis Difuso PD5 vs PID3.**

Una vez obtenido los datos se genera el diagrama de bloques para analizar de forma simultánea las dos respuestas.

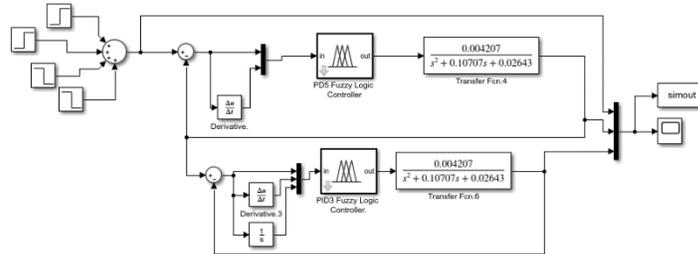


Figura 5: Diagrama de Bloques para Controladores Difusos Nivel.  
Fuente: Elaboración propia.

De la Fig.5 se puede evidenciar un seguimiento de trayectoria en 4 puntos comunes de operación, para verificar las respuestas de los controladores difusos y evidenciar el más óptimo para el proceso de nivel.

**f. Control Difuso (Diseño Temperatura)**

Teniendo en cuenta la función de transferencia del proceso de temperatura (2), se diseña el controlador Difuso, donde utilizaremos el PD de 5 funciones de membresía para controlar el sistema térmico.

**1. Controlador Difuso PD5.**

Para la **salida (Output)** del controlador, donde tenemos 3 funciones triangulares en la parte interna y dos de tipo trapezoidal en los extremos.

- Eje  $x = [70 \ 230]$
- $Z = [118 \ 150 \ 182]$
- $PS = [175.6 \ 198 \ 214]$
- $NS = [86 \ 102 \ 126.1]$
- $PB = [204.4 \ 220.4 \ 268.4 \ 268.4]$
- $NB = [44.4 \ 44.4 \ 76.4 \ 92.4]$

Para la **entrada (Error)**, donde tenemos 3 funciones triangulares en la parte interna y dos de tipo trapezoidal en los extremos.

- Eje  $x = [-6 \ 6]$
- $Z = [-0.3 \ 0 \ 0.3]$
- $PS = [0 \ 0.3 \ 0.6]$
- $NS = [-0.6 \ -0.3 \ 0]$
- $PB = [0 \ 0.6 \ 6 \ 6]$
- $NB = [-6 \ -6 \ -0.6 \ 0]$

Para la **entrada derivativa (Derror)**, donde tenemos 3 funciones triangulares en la parte interna y dos de tipo trapezoidal en los extremos.

- Eje  $x = [-500 \ 500]$
- $Z = [-250 \ 0 \ 250]$
- $PS = [175 \ 325 \ 475]$
- $NS = [-475 \ -325 \ -174.8]$
- $PB = [313 \ 400 \ 500 \ 500]$
- $NB = [-500 \ -500 \ -400 \ -312.8]$

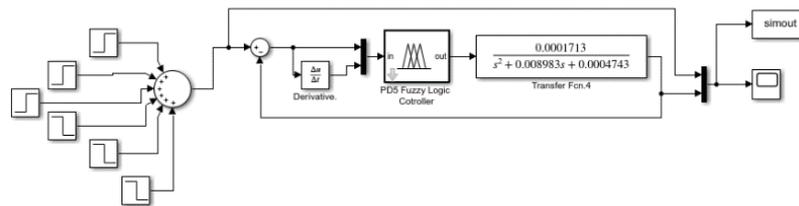


Figura 6: Diagrama de Bloques Difuso Temp.  
Fuente: Elaboración propia.

#### IV. RESULTADOS, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

Teniendo en cuenta los resultados de la Tabla 2, obtenemos la siguiente respuesta para los controladores clásicos.

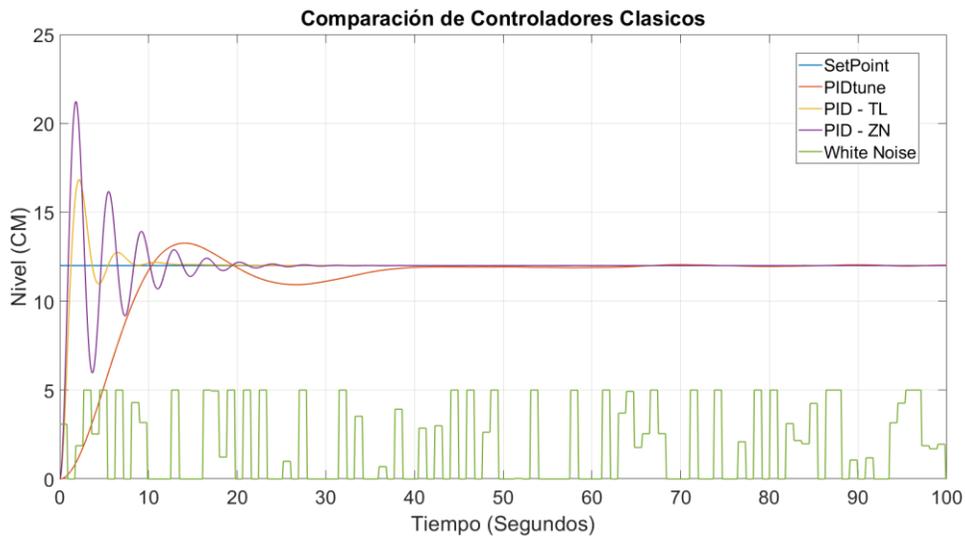


Figura 7: Respuesta Simulada para Controladores PID Clásicos.  
Fuente: Elaboración propia.

Lo primero que debemos considerar de la Fig. 7 es que cada controlador llega al valor deseado, pero no necesariamente sus respuestas son las más adecuadas, como se ha mencionado en el inciso 2.1, es fundamental entender el comportamiento natural de la planta o proceso, ya que la planta es para el nivel de líquido, es muy fundamental la reducción de los sobre picos, ya que naturalmente dicho proceso tiene una reacción tardía para la estabilización por consiguiente no es primordial los tiempos de subida del sistema.

Con lo anterior se puede afirmar que el mejor controlador es el pidtune de Matlab, ya que dicha función maneja compensadores inteligente que reducen considerablemente el Overshoot, estas constantes será nuestro punto de partida para el ajuste fino de las constantes reales de la planta.

##### a. Implementación de Controladores Clásicos.

Como se ha mencionado anteriormente es fundamental el ajuste fino de las constantes para reducir el sobre impulso a valores nulos.

Luego de probar diferentes combinaciones de las constantes en tiempo real, se pudo evidenciar una correlación de las constantes proporcionales y derivativos al reducir estas constantes se reducía los sobre picos del sistema, con esto presente se aplicó el ajuste fino en el controlador PID, teniendo como resultados finales las siguientes constantes.

$$K_p = 0.2; \quad K_i = 0.0788; \quad K_d = 0.7;$$

Obteniendo la siguiente respuesta de los datos reales de nuestra planta.

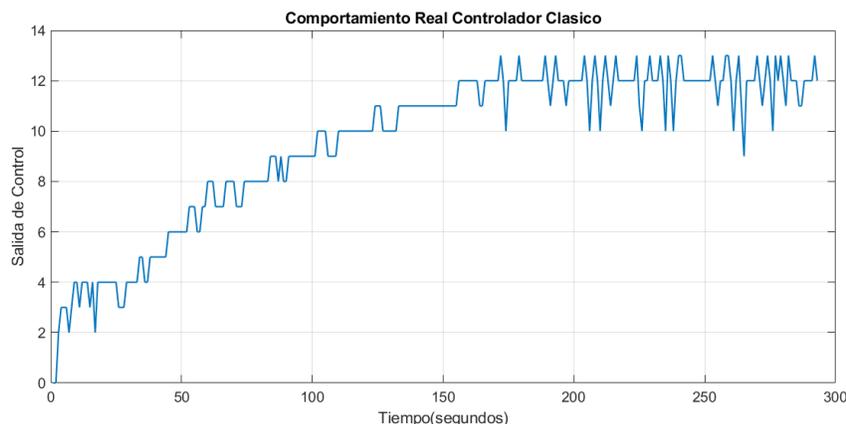


Figura 8: Respuesta Real para Controladores PID Clásicos.  
Fuente: Elaboración propia.

Ya que nuestro sensor de ultrasonido es de bajo costo, las perturbaciones del mismo son bastantes agresivas, independiente de esto el controlador logra regular y mantiene el SetPoint de forma correcta, adicionalmente es importante tener en cuenta que el caudal de salida en la primera etapa de la planta es constante para retroalimentar el agua, esto hace que el controladore reaccione antes los cambios constantes de la bomba.

### b. Análisis de Controladores Difusos Nivel.

Teniendo en cuenta la Fig. 6 se obtiene la siguiente respuesta.

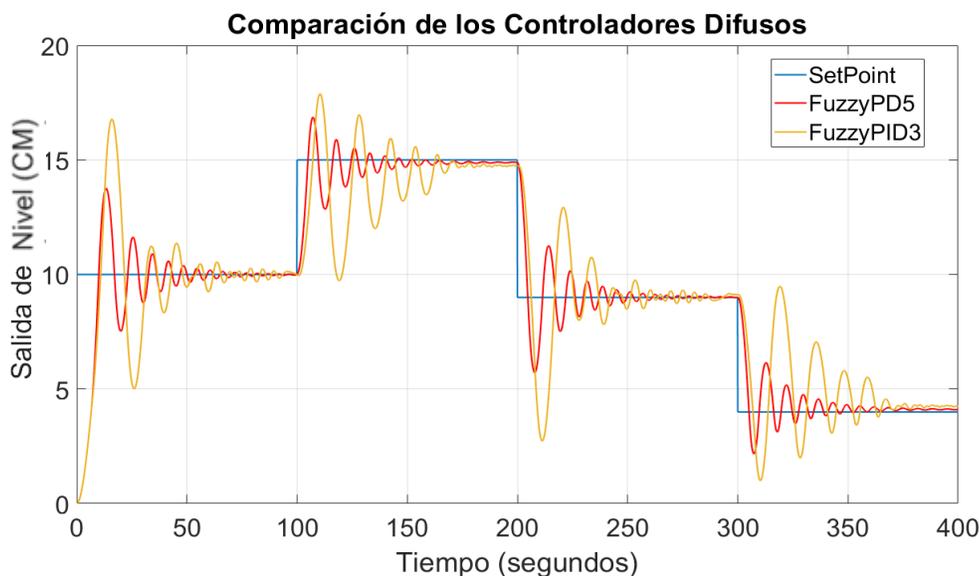


Figura 9: Respuesta Simulada para Controladores Difusos.  
Fuente: Elaboración propia.

Sin un análisis detallado se puede descartar directamente el Fuzzy PID3 ya que los sobre impulsos pueden superar el 50% del valor deseado, por ende, no es recomendable para sistemas de nivel de líquido, ya que esto puede producir derrames en los tanques y pérdida de tiempo ya que su estabilización también es más lenta con un transitorio bastante agresivo para el sistema. Por consiguiente el controlador adecuado para nuestra planta es el PD de 5 Funciones de membresía.

### c. Implementación Difuso PD5 Nivel.

La primera diferencia y la más importante, es que, a comparación de un control clásico, el difuso no dispone de una ecuación que se pueda implementar en un script, en este caso se tiene que tener en cuenta que tenemos que cumplir dos etapas en el control difuso, la interfaz de fusificación y la interfaz de desfusificación utilización la toolbox interna o no, que depende del programa a trabajar.

En primera estancia, para utilizar Matlab se debe trabajar en Simulink, esto conlleva un gran consumo de memoria del equipo donde se trabajará, esto limitando la efectividad del controlador, por eso se decidió la implementación del programa LabVIEW que optimiza considerablemente la comunicación con tarjetas programables en nuestro caso Arduino.

Lo más ideal es implementar el mismo controlador de forma simulada para verificar detalles que podrían cambiar en LabView, dando como resultado.

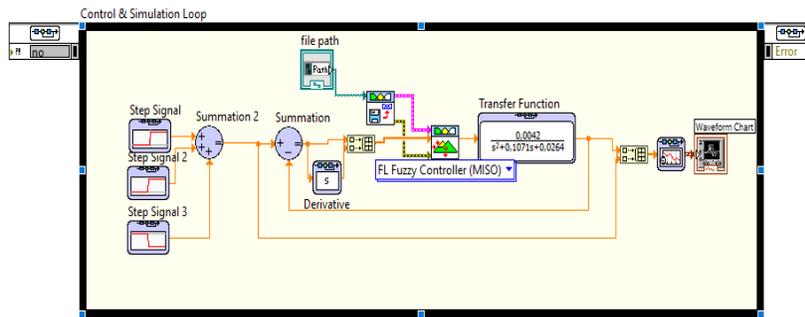


Figura 10: Diagrama de Bloques para Controladores Difusos LabView. Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento dinámico de la TF de nuestro proceso de nivel con controladores difusos en LabView, como se evidencia en la Fig. 10 da como resultado.

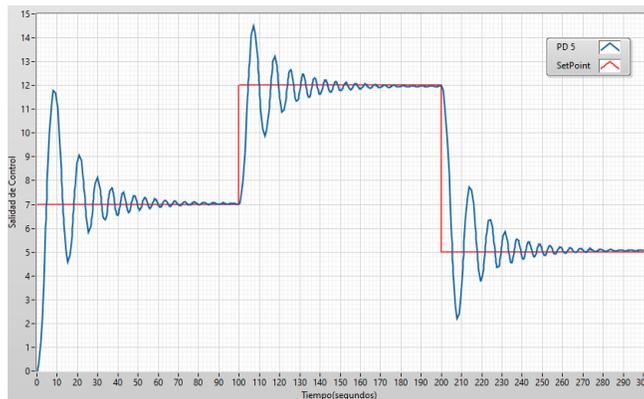


Figura 11: Respuesta Simulada para Controladores Difusos en LabView. Fuente: Elaboración propia.

A nivel general la respuesta de la Fig. 11 es igual a los resultados del mismo controlador en Simulink, permitiéndonos una mejor posibilidad para implementar Difusos en sistemas reales. Para la implementación del control difuso, se instaló el Toolbox MakerHud (LINX) de LabView. De la Fig. 13 se puede observar en la parte superior la comunicación con las entradas y salidas necesarias para el proceso de nivel. Es importante tener en cuenta que LabView ejecuta los códigos de Izquierda a Derecha, por ende, se recomienda dejar las entradas a la izquierda con respecto a las salidas.

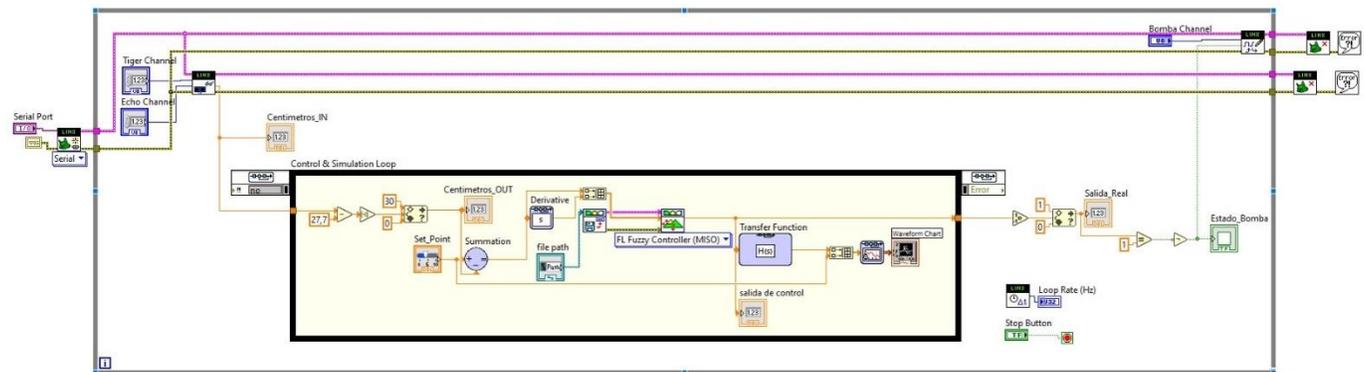


Figura 12: Controlador Difuso en LabView y Arduino Nivel. Fuente: Elaboración propia.

La parte inferior de la Fig. 12 es el controlador difuso procesando los datos para el control preciso del nivel, la parte inferior izquierda nos indica la inversión del valor de los cm del sensor de ultrasonido, ya que ese valor será la retroalimentación negativa del sistema, adicionalmente se le establecido los rangos mínimo y máximo de operación, para evitar los ruidos provocados por el sensor ultrasónico, y la parte inferior derecha representa la salida de la señal de control directamente del controlador Difuso, donde se le aplico una saturación para que funcionara respecto a los rangos de funcionamiento del dispositivos real en Arduino.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores al comprobar el funcionamiento del controlador Difuso, este se comportó mejor de lo esperado, ya que, sin la necesidad de ajuste fino, el control inteligente logra adatar los datos de salida para nuestra planta sin ajustar los parámetros hallados con la función de transferencia y esta logra mantener el nivel de líquido con un error máximo de  $\pm 2\text{mm}$ , ya que se mantiene oscilando con el *SetPoint*, evitando que el nivel aumente más de lo permitido. Teniendo en cuenta que el sistema mantiene el flujo de salida constante.

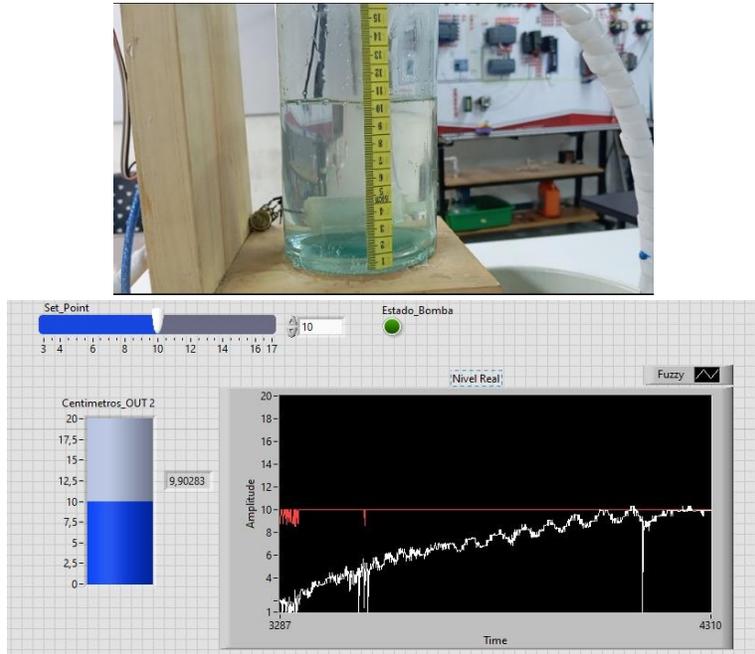


Figura 13: Respuesta Real Controlador Difuso en LabView y Arduino.  
Fuente: Elaboración propia.

Comprobando la robustez del controlador Fuzzy PD5 se modificó el valor deseado como se evidencia en la Fig. 13, donde se evidenció que el controlador tiene un límite a la hora de subir la señal de extremo a extremo o específicamente si el *SetPoint* es 10cm mayor que el valor de retroalimentación o el nivel actual del nivel de líquido que se mide con el sensor de ultrasonido. Esto solo aplica al subir el nivel, ya que bajando el controlador puede ir del valor de operación máximo al mínimo en un solo cambio en la variable *SetPoint*.

Con las limitaciones anteriores se puede rediseñar el código para cuando dicha diferencia de subida supere los 10 cm donde el código de forma automática enviara diferentes valores de *SetPoint* en diferentes lapsos de tiempos hasta llegar al valor del *SetPoint* establecido.

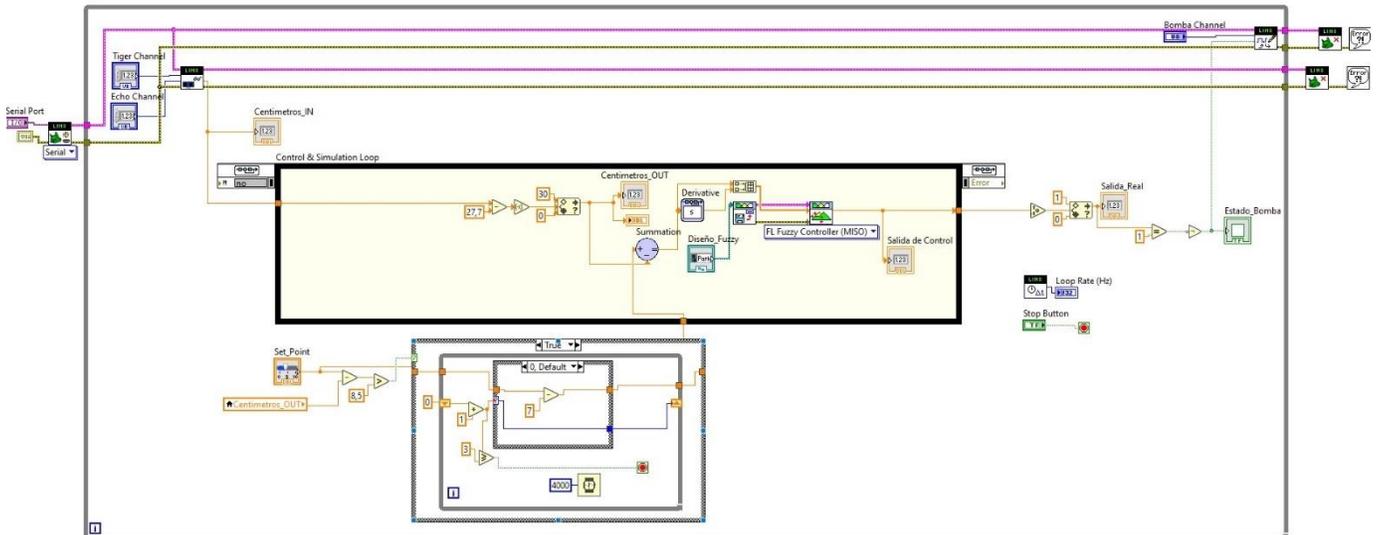


Figura 14: Máquina de Estados y Controlador Difuso en LabView y Arduino.  
Fuente: Elaboración propia.

La parte inferior de la Fig. 14 representa una máquina de estados que solo funcionara cuando la diferencia entre el *SetPoint* y la señal del sensor ultrasónico supere los 8.5 cm, donde al cumplirse esa condición se le enviara un valor de *SetPoint* menor y se aumentara cada cierto periodo de tiempo y cuando se deja de cumplir dicha condición el *SetPoint* se le enviara de forma directa, con esto mejoramos que el controlador opere sin interrupciones.

**d. Control Difusos Temperatura.**

De la Fig. 6 se obtiene la siguiente respuesta.

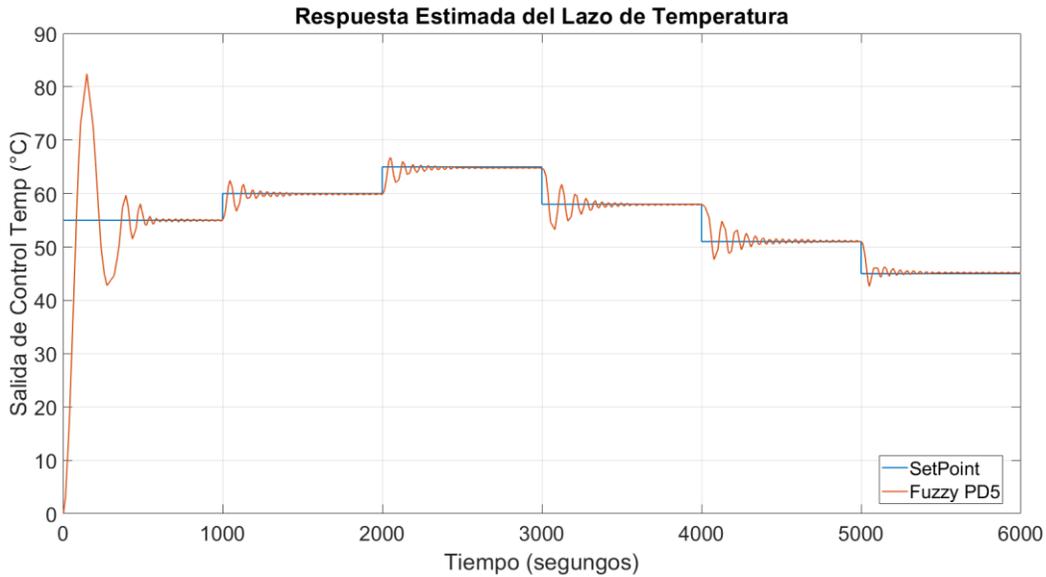


Figura 15: Respuesta Simulada para Controladores Difusos.  
Fuente: Elaboración propia.

De la respuesta de la Fig. 15 se puede analizar el comportamiento del controlador cuando no se tiene en cuenta la potencia de la resistencia térmica, por ende, aumenta considerablemente el sobre pico de primer seguimiento de trayectoria, adicionalmente se evidencia que el controlador sufre al haber cambios mayores a 7°C de subida, por ende, cada cambio se hizo de 5°C evidenciando un resultado bastante bueno para nuestro sistema real.

**e. Implementación Difuso PD5 Temperatura.**

La principal diferencia de este lazo es que debemos garantizar el funcionamiento de forma paralela con el lazo de nivel, ya que los dos controladores deben funcionar de forma simultánea, teniendo en cuenta lo anterior se implementa el siguiente diagrama de bloques el LabView como se evidencia la Fig. 17.

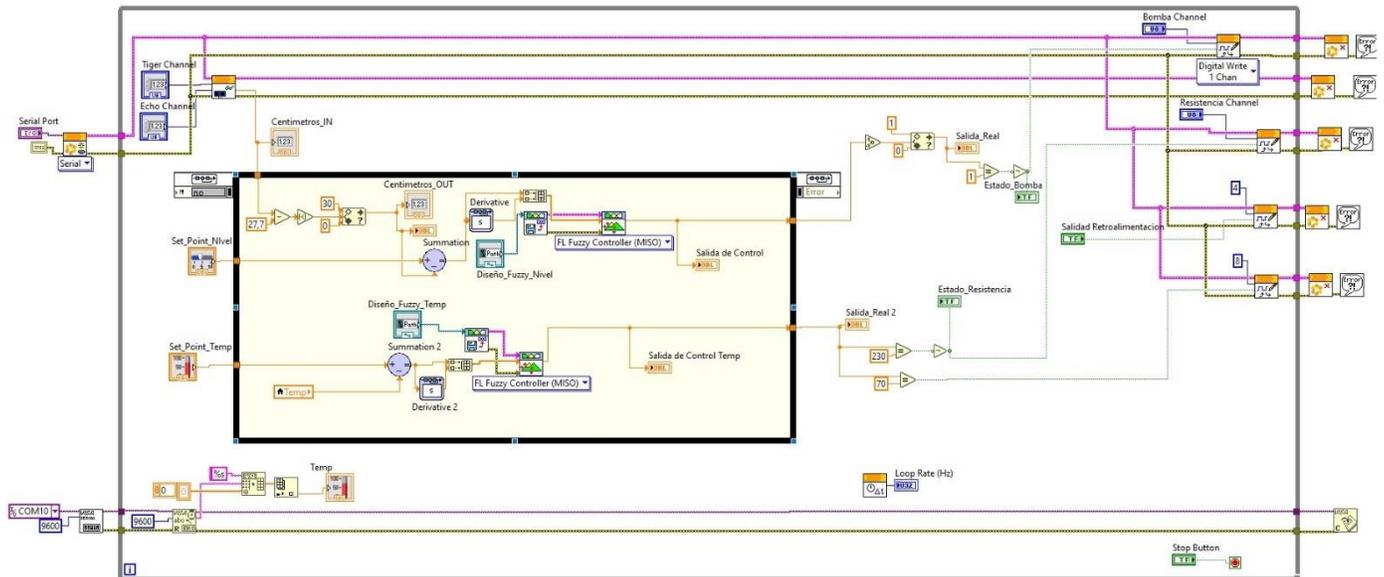


Figura 16: Controlador Difuso en LabView y Arduino Nivel y Temperatura.  
Fuente: Elaboración propia.

Como se evidencia en la Fig. 16 fue necesario la implementación de comunicación serial con otro Arduino, ya que el sensor de temperatura DS18B20 no es compatible con la librería Linx de LabView, por ende, dicho Arduino nos enviara directamente el valor de la temperatura el cual ingresara a la retroalimentación negativa de nuestro controlador, donde el mismo controlador nos enviara los datos necesarios para la activación de la resistencia térmica o la activación de la bomba de refrigeración. Con lo anterior se garantiza que los dos controladores funcionen simultáneamente y poder el variar el setpoint como sea correspondiente.

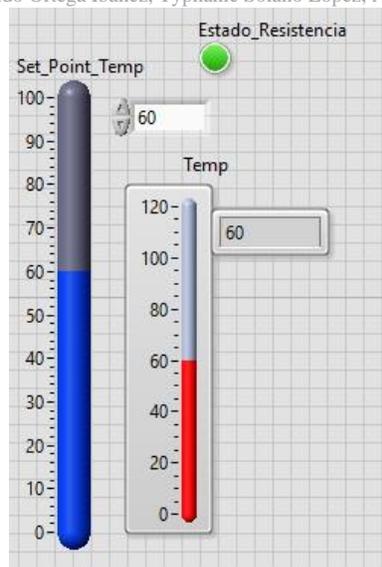


Figura 17: Respuesta Real Controlador Difuso en LabView y Arduino.  
Fuente: Elaboración propia.

Es importante analizar los datos de salida que directamente proporciona los controladores difusos ya que con esos valores se puede hacer una relación lineal con respecto a los parámetros de entrada de nuestros actuadores, donde el mismo controlador puede variar una variable PWM o directamente el estado de un relay para su activación o desactivación. La Fig. 18 evidencia la respuesta del sistema en tiempo real con la temperatura del controlador implementado en LabVIEW.

## V. CONCLUSIONES

Todo lo que se pueda medir en la naturaleza se puede describir, entender y controlar su comportamiento de forma matemática, por eso es para las industrias es importante tener sus plantas en modelos matemáticos, para así poder analizar su comportamiento idóneo con respecto a la realidad.

Para lograr una correcta caracterización de la planta, es importante comprender el comportamiento natural de la misma, ya que sin esto en cuenta hay más posibilidades de cometer errores en las mediciones y por ende a la hora de estimar la Función de Transferencia no representara de forma correcta la planta a trabajar.

Se logro mantener el nivel y la temperatura en valores deseados tanto en simulación como en la implementación de los controladores difusos en tiempo real. El objetivo principal de la lógica difusa es crear un sistema basado en el comportamiento y pensamiento humano, es por ello que con el diseño propuesto basado en funciones de membresía presentado en la sección III del documento, se logró utilizar el sistema en cascada de cada variable en los rangos para los cuales fue diseñado.

Las perturbaciones es uno de los factores que no se tiene en cuenta en los entornos simulados ya que normalmente ocurren por situaciones físicas aleatorias, en nuestro caso al caer el agua al tanque produce una turbulencia en el agua que provoca que el sensor varíe en su medición, adicionalmente dicho sensor de ultrasonido al ser el más económico de su tipo hace que aumente las variaciones de medición en el mismo punto de nivel del líquido, por eso es primordial aplicar el filtro correcto que priorice la optimización con la tarjeta a trabajar y con la herramienta interna para completar las etapas de dicho controlador difuso.

Al lograr relacionar de forma correcta la salida del controlador difuso con los datos de entrada de nuestro actuador real se puede hacer funcionar de forma correcta el mismo controlador en diferentes actuadores, ya sea *dimmers* digitales o analógicos o en sus defectos *relays* para el cambio de estados, por consiguiente los controladores difusos se adaptan mejor a las salidas reales de nuestro sistema.

## VI. AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a la Universidad de Pamplona, Pamplona, Norte de Santander, Colombia y su Programa de Ingeniería Mecatrónica.

## VII. REFERENCIAS

- [1] M. Asif, F. Hai, W. Price, y L. D. Nghiem, "Advances in water and wastewater treatment technologies: Fundamentals, sustainability, and emerging innovation", Elsevier, 2021.
- [2] J. Carrillo Gómez, C. Duran Acevedo, y R. Garcia Rico, "Discriminación de bacterias en agua potable a través de una nariz electrónica y un equipo de extracción de volátiles", Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, vol. 1, n.º 33, pp. 155–165, ene. 2019.
- [3] S. Liew, M. Mohd-Amin, H. Man, y M. Aroua, "Water Treatment: The Journey from Ancient Civilizations to Advanced Technologies", Water, vol. 14, no. 6, p. 983, 2022.
- [4] J. Wang y S. Wang, "Microbial degradation of sulfamethoxazole in the environment", Applied Microbiology and Biotechnology, vol. 102, no. 8, pp. 3573-3582, 2018.

- [5] N. Zaouri, L. Gutierrez, L. Dramas, D. Garces, y J. Croue, "Interfacial interactions between *Skeletonema costatum* extracellular organic matter and metal oxides: Aggregation and charging behavior", *Water Research*, vol. 116, pp. 70-78, 2017.
- [6] Y. Ding, W. Guo, H. H. Ngo, F. Bai, X. Wu, Y. Du, y Q. Wei, "Development of anaerobic granular sludge for textile wastewater treatment: Recent advances and future prospects", *Science of The Total Environment*, vol. 819, p. 153205, 2022.
- [7] Y. Gu, Y. Li, X. Li, P. Luo, H. Wang, X. Wang, J. Wu, y F. Li, "The feasibility and challenges of energy self-sufficient wastewater treatment plants", *Applied Energy*, vol. 255, p. 113646, 2019.
- [8] S. Zeng, J. Chen, L. Wan, y Y. Li, "Biological Removal of Ammonia-Nitrogen from Wastewater: A Review of Current Trends and Challenges", *Journal of Environmental Management*, vol. 291, p. 112725, 2021.
- [9] Y. Gu, Y. Li, X. Li, P. Luo, H. Wang, X. Wang, J. Wu, y F. Li, "The feasibility and challenges of energy self-sufficient wastewater treatment plants", *Applied Energy*, vol. 255, p. 113646, 2019.
- [10] S. Zeng, J. Chen, L. Wan, y Y. Li, "Biological Removal of Ammonia-Nitrogen from Wastewater: A Review of Current Trends and Challenges", *Journal of Environmental Management*, vol. 291, p. 112725, 2021.
- [11] R. Moncada Diaz y O. Rodríguez Diaz, «Diseño e implementación de un sistema de control por retroalimentación de variables de estado para una plataforma Ball and Plate», *RCTA*, vol. 1, n.º 43, pp. 92–98, mar. 2024.
- [12] M. Mahdavi, T. Mahvi, A. Mahvi, y A. Mesdaghinia, "Application of Electrochemical Reactor for Degradation of Diazinon from Aqueous Solutions: Optimization of Operating Conditions", *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, vol. 18, pp. 485-494, 2020.
- [13] N. Xie, Z. Wang, J. Lin, y W. Li, "Efficiency and Microbial Community in the Removal of Nitrogen and Phosphorus from Wastewater by an Integrated Vertical-Flow Constructed Wetland", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18, no. 4, p. 1892, 2021.
- [14] J. Alex, L. Benedetti, J. Copp, K. Gernaey, U. Jeppsson, I. Nopens, M. Pons, C. Rosen, J. Steyer, y P. Vanrolleghem, "Benchmark Simulation Model no. 2 (BSM2)", IWA Publishing, 2018.
- [15] T. Kulkarni, J. Watton, y K. Venkatasubramanian, "Adaptive Sliding Mode Control of a Water Treatment Plant," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 111561-111573, 2021.
- [16] Y. Bai, X. Zhu, R. Jiang, Y. Wang, F. Yang, S. Xie, y W. Li, "A deep learning approach for optimizing wastewater treatment processes: A review", *Water Research*, vol. 228, p. 119115, 2022.
- [17] W. Luo, M. Li, J. Xu, K. Yao, H. Deng, y Z. Yuan, "Model predictive control for integrated optimization of wastewater treatment and resource recovery", *Water Research*, vol. 212, p. 118136, 2022.
- [18] L. Zhang, J. Liu, H. Yang, X. Dai, y X. Wei, "Adaptive fuzzy control for level and temperature management in wastewater treatment plants", *Journal of Cleaner Production*, vol. 372, p. 133973, 2023.
- [19] X. Chen, Y. Liu, J. Peng, y Y. Wang, "Hybrid intelligent control system for real-time optimization of wastewater treatment plants: A neural network and genetic algorithm approach", *Environmental Technology & Innovation*, vol. 29, p. 102980, 2023.
- [20] M. Tito-Peña, A. Llana-Vega, E. Fisse-Ramos, y R. Villa-García, "Low-Cost Ultrasonic Sensor Applied to Liquid Level Measurement", *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 3, pp. 3313-3321, 2021.
- [21] A. Ivanov, "Microcontroller-Based Automation of Water Treatment Plant", 2020 International Conference on Information Technologies (InfoTech), pp. 1-4, 2020.
- [22] M. Zare, M. Zare, F. Kalantary, y S. Mehrabi, "Intelligent Control Systems: A Review of Current Challenges and Opportunities", *Journal of Intelligent Systems*, vol. 30, no. 1, pp. 212-230, 2021.
- [23] R. Jiménez Moreno, J. Martínez Baquero, y O. Agudelo Varela, "Control difuso para pinza robótica blanda orientada a objetos no rígidos", *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, vol. 2, n.º 42, pp. 1–7, oct. 2023.
- [24] L. Ljung, T. Chen, y B. Mu, "A shift in paradigm for system identification", *International Journal of Control*, vol. 93, no. 2, pp. 173-180, 2020.
- [25] C. Ariza Ariza, J. Martínez Baquero, O. Agudelo Varela, L. Rodríguez Umaña, y O. Beltrán Gutierrez, "Sistema de control y supervisión de temperatura y humedad relativa en cámara de fermentación", *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, vol. 2, n.º 40, pp. 142–151, jul. 2022.
- [26] O. Suarez, A. Pardo, y E. Sanchez, "Intelligent control for the exciter of a synchronous machine with closed loop voltage", 2016 World Automation Congress (WAC), IEEE, pp. 1-6, 2016.
- [27] A. Fakharian y M. Menhaj, "State-Space Modeling and Interval Type-2 Fuzzy Tuning of a Fractional Order PID Controller", *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 29, no. 11, pp. 3081-3090, 2021.