

Proportional-Integral Control for a water supply system prototype using the IoT platform Node-RED

J.D. Avilés *, R. Miranda *, G. Becerra **, J. Morales ***,
H. Mujica ****, J.F. Flores *, C. L. Márquez *, R. Martínez *

* *Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Administrativas y Sociales, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Universidad No. 1, San Fernando, C.P. 21460, Tecate B.C., México*

** *CONAHCYT - Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, Blvd. Bahía S/N, Col. del Bosque, C.P. 77019, Chetumal, Quintana Roo, México*

*** *Colegio de Ciencia y Tecnología, Universidad Autónoma de la Ciudad de México, Calzada Ermita Iztapalapa No. 4163, Col. Lomas de Zaragoza, C.P. 09620, CDMX, México.*

**** *Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Coyoacán, Ciudad de México, México*

Abstract:

In our days, there is a set of problems associated with water scarcity due to its vital importance for humans, as it is related to most of our domestic activities, hygiene, production chains, etc. This situation worsens if we consider technical problems in distribution as leaks as a result of lack of maintenance and aging of infrastructure. Motivated by the issues with the hydraulic distribution network in the city of Tecate, Baja California, Mexico, a prototype was built in order to emulate its operation and validate proposed control schemes as an alternative to the current manual management. The prototype has been built integrating a series of industrial sensors and actuators to truly provide the features of a real application to ease the implementation in a real scenario, using the IoT platform Node-RED. This paper describes a PI-IoT proposed control system for regulating the level of a tank by means of an analog valve. In the real system, these elements are indeed separated by a distance of 4.5 km, which implies the use of a real time communication channel to effectively regulate the level. The performance of the proposed scheme is validated by real time experiments.

Keywords: Hydraulic system control, PI-IoT, Proportional-Integral control, Node-RED

1. INTRODUCCIÓN

El abastecimiento de agua en poblaciones que se encuentran en regiones áridas y semi-áridas representa un tópico crucial en las organizaciones gubernamentales, no gubernamentales y empresariales, así como en las comunidades científicas y tecnológicas, por el traslado del vital líquido de la fuente natural hasta su lugar de consumo, llegando a recorrer grandes distancias (ver Alperovits y Shamir (1977), Ratnayaka et al. (2009), Whittle et al. (2013), Tian et al. (2015), Agnew y Anderson (2024)). Un claro ejemplo de esta situación ocurre en las ciudades de Mexicali, Tecate y Tijuana, ubicadas en el Estado de Baja California, México, las cuales tienen precipitaciones muy escasas con promedios anuales menores a 200 [mm], predominando un clima seco y temperaturas por arriba de los 40 [°C], siendo Mexicali la ciudad que reporta la

cifra más baja de lluvias en México con datos inferiores a los 50 (mm) (INEGI, 2024). Por estas condiciones climatológicas adversas, estas ciudades son abastecidas de agua proveniente de los afluentes del Río Colorado en Estados Unidos, transportándolo por el acueducto Río Colorado-Tijuana, mediante seis plantas de bombeo, con una distancia aproximada de 150 [km] (ver Cortez Lara (2011), citecortes2021estimating, CEABC (2024)). Una ramificación de tal acueducto desemboca en la presa denominada Las Auras, y posteriormente se conduce el líquido por gravedad a las potabilizadoras nombradas como Nopalera y Cuchumá, las cuales en conjunto con la presa integran el sistema de abastecimiento de la ciudad de Tecate. Tales potabilizadoras, Nopalera y Cuchumá, pueden entregar aproximadamente 280 y 90 litros de agua potable por segundo, respectivamente, que son encauzados a tanques de almacenamiento con capacidades de

5,000 y 1,000 metros cúbicos, y finalmente son conducidos a la población.

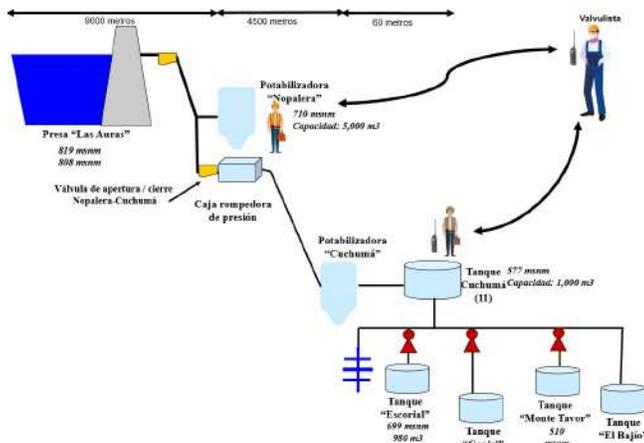


Fig. 1. Sistema de abastecimiento de agua de la ciudad de Tecate, *Las Auras-Nopalera-Cuchumá*. Fuente Miranda et al. (2023).

Actualmente, el sistema de abastecimiento de agua de Tecate opera de manera tradicional, por medio de la radiocomunicación entre trabajadores de cada potabilizadora y de la central logística, con la finalidad de regular el flujo de entrada y el nivel de los tanques de almacenamiento de las potabilizadoras con la apertura y cierre de válvulas (ver Figura 1). Debido a los problemas de obsolescencia en los sistemas de control y monitoreo que prevalecen en el sistema de abastecimiento, en Miranda et al. (2023) se propuso una solución de automatización y monitoreo del sistema hidráulico *Las Auras-Nopalera-Cuchumá*, integrando tecnologías de la Industria 4.0, asociadas a los sistemas SCADA (Control, Supervisión y Adquisición de Datos, por sus siglas en inglés) e IoT (Internet de las cosas, por sus siglas en inglés). Para ello, se diseñó y construyó un prototipo que emula la operación del sistema hidráulico mencionado, con el propósito de analizar el comportamiento de las parámetros y variables críticas, así como las herramientas de software y hardware que pueden ser utilizadas. En especial, se desarrolló la plataforma SCADA-IoT usando el software LOGO! Web Editor de Siemens en combinación con Node-RED de IBM (Hagino, 2021) para el control y monitoreo del sistema hidráulico.

La aportación del presente trabajo consiste en continuar con la línea de investigación y aplicación de tecnología iniciada en Miranda et al. (2023), para dar una solución de control automático en el prototipo del sistema hidráulico *Las Auras-Nopalera-Cuchumá*. La idea principal es aplicar un controlador Proporcional-Integral (PI), el cual es ampliamente conocido en la literatura de la teoría de control (ver Wang (2020), Rojas et al. (2021)), en el prototipo del sistema hidráulico de abastecimiento de agua de Tecate, utilizando la plataforma de IoT de Node-RED, específicamente para controlar la

válvula analógica de flujo de entrada del tanque de la potabilizadora Cuchumá, que se encuentra ubicada en el sistema real a una distancia de 4.5 [km]., en las cercanías a la potabilizadora de Nopalera. La validación experimental demuestra la efectividad del controlador PI-IoT para regular el nivel tanque a distancia.

El resto del trabajo está organizado de la siguiente manera. El planteamiento del problema se presenta en la Sección 2. En la Sección 3 se expone el modelo matemático y diseño de controlador PI. La validación experimental de nivel del tanque Cuchumá con el controlador PI-IoT en Node-red, implementado en el sistema hidráulico, se presenta en la sección 4. Finalmente, algunos comentarios se dan a manera de conclusiones en la sección 5.

2. PRELIMINARES

2.1 Prototipo del Sistema Hidráulico

El funcionamiento de la red de distribución de agua en la ciudad de Tecate, consiste en trasladar el líquido de la presa Las Auras a las dos plantas potabilizadoras de la Ciudad, la Nopalera y la de Cuchumá. Cada potabilizadora está conectada a sus propios tanques de almacenamiento. En Miranda et al. (2023) se describe el desarrollo de un prototipo del sistema hidráulico *Las Auras-Nopalera-Cuchumá* que emula la distribución y almacenamiento antes descrito (ver Figura 2).



Fig. 2. Prototipo de sistema hidráulico.

Tal prototipo considera el uso de una motobomba hidráulica trifásica de 230 [VCA] con una potencia de 1/2 [HP], conectada al tanque de dimensiones mayores asociado a la Presa Las Auras y a los dos tanques de almacenamiento, Nopalera y Cuchumá, mediante tuberías de 3/4 de pulgada. Asimismo, el prototipo cuenta

con el equipamiento de sensores de nivel, presión, caudal, pH y un PLC's para cada tanque. Además, tiene electroválvulas ON/OFF y una válvula analógica, dos tableros de control y luces indicadoras de nivel. En general, los dispositivos utilizados en el prototipo podrán ser usados en campo, en la red de abastecimiento real de agua de la ciudad de Tecate.

Los dispositivos principales que fueron integrados al prototipo hidráulico se enlistan en las Tablas 1 y 2. Información recuperada de Miranda et al. (2023).

Table 1. Equipamiento para tanque Cuchumá

No.	Elementos
2	PLCs LOGO! marca Siemens V8.3.
1	módulo de expansión de entradas analógicas marca Siemens mod. AM2.
1	Electroválvula DN25 de 3/4", con alim. 24, [V].
1	Sensor de nivel hidrostático QDY60A con display LCD, de 4-20, [mA] y 0-5 [m].
1	Sensor de nivel sonar Siemens mod. SITRANS LU150 de 4-20, [mA], y de rango de 0-5 [m].
1	Sensor de presión mod. 2088 con display LCD, de 0-100 [MPa], 4-20, [mA].
1	Sensor de pH modelo 4502C con electrodo E201-BNC. Rango de detección 0-14 (ácido/base).
1	Caudalímetro YF-B1 de 4-20 [mA], de 1-30, [L/min].

Table 2. Equipamiento para tanque Nopalera.

No.	Elementos
2	PLCs LOGO! marca Siemens V8.3.
1	módulo de expansión de salidas analógicas marca Siemens mod. AM2 AQ.
1	válvula ON/OFF motorizada DN25 de 3/4", con alimentación de 24, [V].
1	válvula de esfera analógica DN25 de 3/4", con alimentación 24, [V], de 4-20 [mA].
1	Sensor de nivel hidrostático QDY60A de 4-20, [mA] y 0-5 [m].
1	Sensor de presión mod. 2088, de 0-100 [MPa], 4-20, [mA].
1	Sensor de pH modelo 4502C con electrodo E201-BNC. Rango de detección 0-14 (ácido/base).
1	Caudalímetro YF-B1 de 4-20 [mA], de 1-30, [L/min].
1	Bomba hidráulica WEG de 1/2 [HP] con alim. trifásica.
1	Contacto trifásico Allen Bradley K09 de 1/2 [HP], con alim. 120 [VAC].
1	Relevador de sobrecarga 1/2 [HP].
1	Tablero de control tipo industrial de 25 [cm], × 30 [cm].
1	Tablero de control Siemens de 25 [cm], × 30 [cm].
2	Botones de arranque y paro de emergencia.
2	Luces piloto de 120 [VAC] para activ. de motor.

2.2 Planteamiento del problema

En el sistema real de abastecimiento de la ciudad de Tecate, la válvula V_2 que controla la apertura/cierre del tanque de almacenamiento Cuchumá está ubicada en los alrededores de la potabilizadora Nopalera, a una distancia lineal de 4.5 [km]., mientras que el recorrido en las

avenidas de la ciudad podría considerar hasta un trayecto de 6.5 [km]. Tal distribución puede ser bosquejada como la mostrada en la Figura 3.

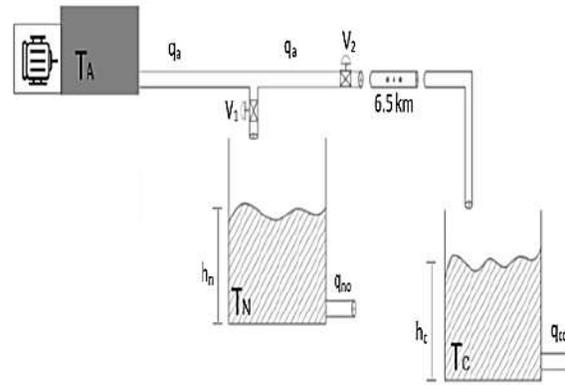


Fig. 3. Representación esquemática del sistema hidráulico.

En este trabajo, el problema de control consiste en regular la variable h_c del tanque Cuchumá T_C a un valor deseado $h_{c,eq}$ usando un controlador PI en la válvula analógica V_2 , para permitir la apertura o cierre gradual del flujo de entrada en el tanque Cuchumá $q_{a,c}$ y evitar el golpe de ariete. Tal controlador debe ser implementado en una plataforma de IoT para llevar a cabo el control a distancia de h_c .

3. DISEÑO DE CONTROLADOR PARA SISTEMA HIDRÁULICO

En esta sección, se desarrolla el modelo matemático para el prototipo que emula la operación del sistema de abastecimiento de agua. Además, se considera el tipo de controlador más adecuado para el prototipo del sistema *Las Auras-Nopalera-Cuchumá*.

3.1 Modelo matemático del sistema hidráulico

Podemos observar de la Figura 3 que tenemos dos tanques aislados, T_N y T_C , ambos alimentados por el flujo volumétrico q_a que proviene del depósito de la presa T_A , representado por una bomba de agua. La válvula ON/OFF V_1 permite el llenado del tanque T_N .

Nuestra atención está centrada en controlar el nivel h_c del tanque T_C mediante la aplicación de un controlador en la válvula V_2 . Para ello, se considera para este primer estudio que la válvula V_2 puede estar relativamente cerca a la instalación del tanque Cuchumá de acuerdo al análisis del prototipo del sistema hidráulico *Las Auras-Nopalera-Cuchumá*, ver la Figura 2.

Aplicando el balance de los flujos que entran y salen en el tanque T_C , dado por la Ley de Bernoulli, el

comportamiento dinámico en \mathbf{T}_C puede ser representado por la siguiente ecuación diferencial:

$$A_T \frac{dh_c(t)}{dt} = q_{a,c}(t) - q_{co}(t), \quad (1)$$

donde A_T es el área de la base de contenedor, $q_{a,c}$ es el flujo volumétrico de entrada, el cual depende del control de posición de una válvula analógica \mathbf{V}_2 , y q_{co} es el flujo de salida del mismo tanque, el cual puede ser expresado por la ecuación no-lineal:

$$q_{co}(t) = a_c k_c \sqrt{2gh_c(t)}, \quad (2)$$

donde k_c es la constante de apertura/cierre de q_{co} y a_c es el área transversal del flujo de salida. Sustituyendo la ecuación (2) en (1), se obtiene

$$\frac{dh_c(t)}{dt} = \frac{1}{A_T} q_{a,c}(t) - \frac{a_c k_c \sqrt{2g}}{A_T} \sqrt{h_c(t)}. \quad (3)$$

Note que el modelo del tanque está expresado por una ecuación diferencial no-lineal causado por el término $\sqrt{h_c(t)}$ que aparece en el flujo de salida del tanque q_{co} . Debido a esto, aplicamos el método de linealización por series de Taylor, tomando el equilibrio $(h_{c,eq}, q_{a,eq})$, para obtener el modelo linealizado del sistema no-lineal en (3), dado por la forma,

$$\delta \dot{h}_c(t) = -p_1 \delta h_c(t) + p_2 \delta q_a(t), \quad (4)$$

donde $\delta h_c(t) \triangleq h_c(t) - h_{c,eq}$, $\delta q_a(t) \triangleq q_a(t) - q_{a,eq}$, $\delta \dot{h}_c(t) \triangleq f(h_c, q_a) - f(h_{c,eq}, q_{a,eq})$, son las variables de desviaciones. Además, $p_1 = \frac{\partial}{\partial h_c} f(h_{c,eq}, q_{a,eq})$ y $p_2 \triangleq \frac{\partial}{\partial q_a} f(h_{c,eq}, q_{a,eq})$ son las derivadas parciales de primer orden con respecto a h_c y q_a , respectivamente, y ambas evaluadas en el punto de equilibrio $(h_{c,eq}, q_{a,eq})$. Entonces, tales expresiones del sistema en (4) son sintetizadas como

$$p_1 = \frac{a_c k_c^* \sqrt{2g}}{A_T \sqrt{h_{c,eq}}}, \quad p_2 = \frac{1}{A_T}.$$

Ahora bien, si aplicamos la transformación de Laplace en cada término del modelo en (4), se tiene

$$(s + p_1) \delta H_c(s) = p_2 \delta Q_a(s). \quad (5)$$

De esta manera, la respuesta del nivel del tanque \mathbf{T}_C en el dominio s está dada por la siguiente ecuación,

$$\delta H_c(s) = G_p(s) Q_a(s) \quad (6)$$

donde

$$G_p(s) \triangleq \frac{p_2}{s + p_1} \quad (7)$$

es la función de transferencia del modelo linealizado. Los valores de p_1 y p_2 están definidos en el apartado previo.

3.2 Controlador PI para nivel del tanque \mathbf{T}_C

En este apartado, establecemos un sistema de control en lazo cerrado para regular el nivel h_c del tanque Cuchumá \mathbf{T}_C (ver Figura 4).

La señal de error está dada por

$$e(t) = r(t) - h_c(t), \quad (8)$$

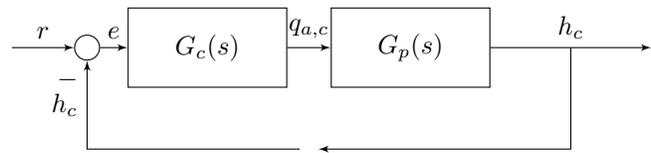


Fig. 4. Sistema de control en lazo cerrado para nivel h_c de tanque \mathbf{T}_C .

donde $r(t)$ es la referencia del nivel deseado, o también conocido como set-point. $G_c(s)$ es la función de transferencia del controlador a elegir. Entonces, la función de transferencia en lazo cerrado está descrita por

$$G_{lc}(s) = G_c(s) \frac{p_2}{s + p_1}. \quad (9)$$

Es importante mencionar que $G_{lc}(s)$ es una función de transferencia del tipo 0, es decir, que tiene cero integradores puros, además es de primer orden. Así que para asegurar que el error tomará valores cercanos a cero en el estado estacionario, $e(t) \rightarrow 0$, se elegirá a un controlador Proporcional-Integral,

$$G_c(s) \triangleq k_p + \frac{k_i}{s}, \quad (10)$$

donde k_i es la ganancia de la acción integral. Note que no se requiere una acción derivativa porque la respuesta carece de comportamiento subamortiguado. Es importante destacar que la dinámica de un sistema hidráulico es linealizada con respecto a un punto de equilibrio que supone que el flujo de entrada y salida del tanque son iguales. Si se considera que estos flujos ingresan y extraen volúmenes de agua relativamente pequeños en relación con el volumen del tanque, la variación que producirán en la altura del mismo serán igualmente pequeños, lo que implica que, en estas condiciones, el modelo linealizado representa de manera adecuada el comportamiento dinámico del sistema. Más aún, si se toma en cuenta que el tanque Cuchumá, que es donde se tiene contemplado la implementación física de este esquema de control, tiene una capacidad de 1000 metros cúbicos y cuyo llenado y vaciado requiere de varias horas, entonces el modelo linealizado puede ser utilizado para el diseño del controlador.

3.3 Implementación del controlador PI-IoT en Node-RED

Aquí, la idea es implementar un control PI a distancia para regular el nivel h_c del tanque \mathbf{T}_C , mediante la aplicación de la acción de control en la válvula \mathbf{V}_2 , ubicada cerca del tanque Nopalera, usando la plataforma de IoT de Node-RED.

En la figura 5 se observa que h_c es la variable de salida a ser controlada (originalmente para evitar derrames en zonas aledañas o la falta de suministro del vital líquido en las zonas habitacionales y parques industriales), y es transferida al servidor de Node-RED instalado en la nube de Google, mediante la comunicación de un PLC y un ordenador. También, la plataforma de Node-RED es alojada en el ordenador de forma local. Por

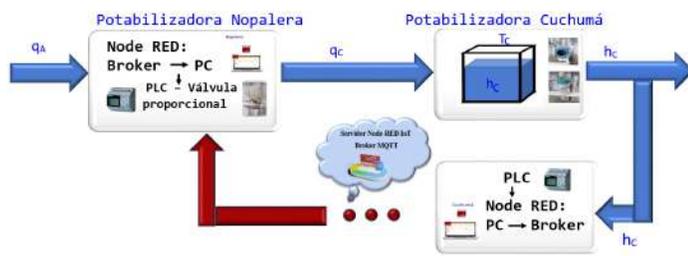


Fig. 5. Sistema de control en lazo cerrado usando un control PI-IoT con Node RED.

otro lado, en el servidor Node-RED se desarrolla el esquema de control PI-IoT usando las conexiones de flujos y nodos en las cuales se reciben y procesan los valores acondicionados del nivel h_c , y posteriormente se transmite la señal de control a la zona del tanque Nopalera, considerando la comunicación de la plataforma Node-RED en el computador de tal potabilizadora y un PLC con la finalidad de manipular la válvula analógica motorizada. Entonces, la señal de control PI-IoT permite abrir y cerrar de forma parcial o total la válvula analógica para dar paso al flujo q_c por tal válvula y conducido por la tubería al tanque T_C .

Para enviar y recibir información al Servidor de Node-RED, o también denominado Broker Node-RED), se configuran los nodos MQTT de lectura y escritura a través del protocolo Modbus (Modbus Read - Modbus Write). Tales nodos deben contener la IP externa o el dominio DNS para tener la comunicación directa entre la conexión entre el Broker de Node-RED y las plataformas locales de Node-RED instaladas en cada potabilizadora. Es importante mencionar que el monitoreo de todas las variables se encuentran disponibles de forma local en las plataformas Node-RED de cada ordenador de las potabilizadoras. Además, están disponibles de forma remota en el Broker Node-RED, ingresando con la IP externa definida o con el dominio DNS registrado.

4. RESULTADOS

Los valores numéricos de los parámetros asociados al tanque T_C están dados en la siguiente tabla.

Table 3. Valores de parámetros de Tanque Cuchumá.

Parámetros	Valores numéricos
Dimensiones T_C	0.40 [m] × 0.40 [m] × 0.55 [m]
a_c	2.8502×10^{-4}
k_c^*	0.652783232
A_T	0.16 [m ²]
g	9.81 [m/s ²]
$h_{c,eq}$	0.13 [m]
$q_{a,eq}$	0.000297143 [m ³ /s]

Adicionalmente, los valores de los parámetros del controlador PI en (10) fueron escogidos $k_p = 20$ y $k_i = 0.001$,

para lograr el llenado relativamente rápido y evitar derrochar el agua. La figura 6 ilustra, en la parte derecha, el comportamiento del nivel h_c con respecto a una referencia (set-point) considerando el control PI-IoT en Node-RED, así como del error dado por el valor de referencia y la señal de salida, $e = r - h_c$. En la parte izquierda, se muestran algunos parámetros de la válvula analógica en indicadores virtuales (dashboards) de Node-RED.



Fig. 6. Respuesta del nivel h_c en el prototipo del sistema hidráulico usando el control PI-IoT en Broker Node-RED. Imagen tomada del monitor del sistema que está operando en tiempo real.

Las gráficas de la Figura 7 muestran el comportamiento de las señales de nivel h_c , presión, potencial de hidrógeno pH y flujo volumétrico de entrada $q_{a,c}$ para el tanque T_C , considerando el funcionamiento del controlador PI-IoT en Node-RED. El nivel h_C del tanque Cuchumá T_C es la variable de mayor relevancia en la solución del problema de automatización. Debido a esto, se implementaron dos instrumentos de medición de esta variable que utilizan diferentes tecnologías para obtener la unidad de lectura, uno es el transmisor de nivel hidrostático y otro es el ultrasónico. Ambos comportamientos de nivel de estos transmisores presentan comportamientos similares, los cuales responden apropiadamente a los cambios de la referencia del nivel.

5. CONCLUSIONES

El presente trabajo propone el diseño y la implementación de un sistema de control en la plataforma IoT de Node-RED para monitorear y controlar un sistema hidráulico que emula el funcionamiento de la red de abastecimiento de agua en la ciudad de Tecate, en Baja California, México. Para lograr esto, se construyó y validó un prototipo que representa el sistema hidráulico del lugar. El objetivo actual consiste en controlar las variables involucradas y mejorar el tipo de tecnología en los componentes de software y hardware, con el fin de desarrollar aplicaciones de campo utilizando el software de Siemens y la plataforma IoT Node-RED de internet. Dadas las características del diseño y construcción del prototipo, no solo se valida el sistema de control propuesto, sino que se consideran las dificultades técnicas que pudieran surgir en

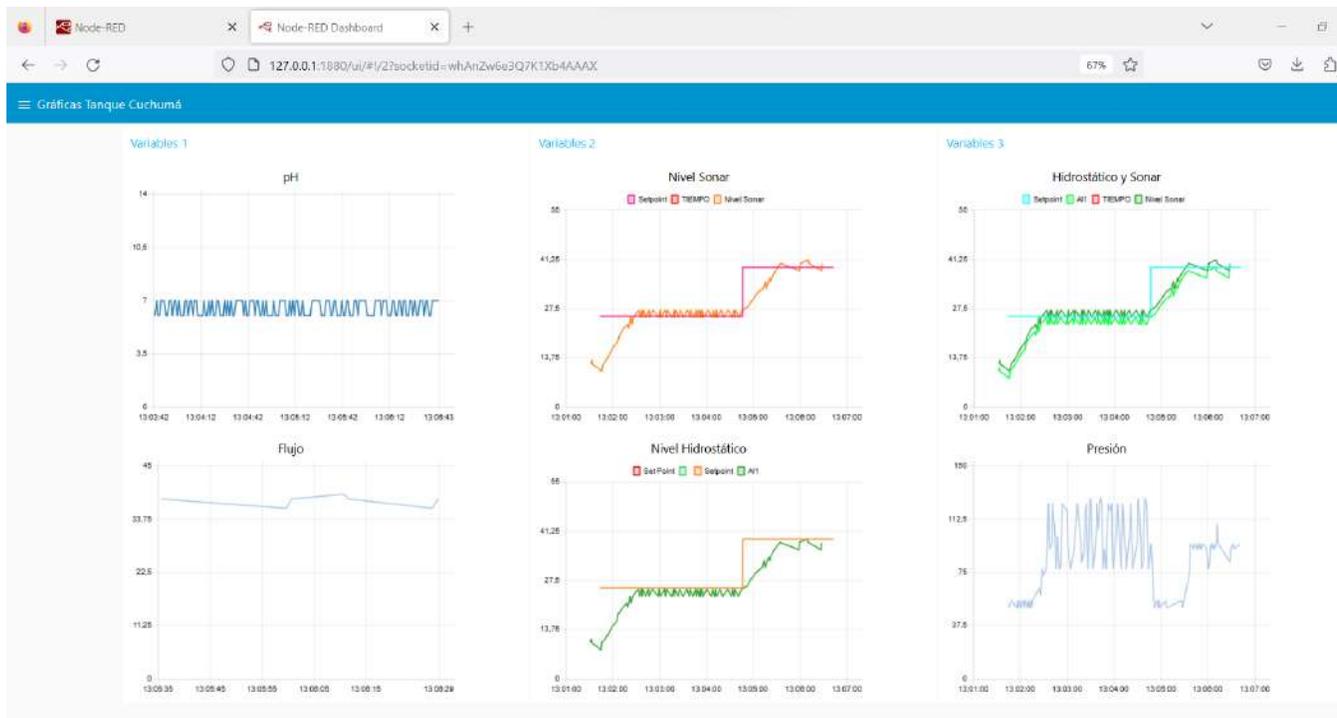


Fig. 7. Desempeño en la regulación de las señales de nivel h_c mostradas por los sensores hidrostático y ultrasónico, así como de pH , flujo de entrada y presión.

la implementación en el sistema real, ya que los componentes utilizados son similares a los que se encuentran en campo. En cuanto al desempeño del sistema de control, el esquema proporcional-integral muestra una regulación al nivel deseado con valores del error en estado estable cercanos a cero, aún cuando existe ruido en la medición del nivel del líquido el cual es atribuido al movimiento intrínseco del agua. Estos resultados motivan a verificar el desempeño de diferentes esquemas de control integrando técnicas como control difuso, redes neuronales, machine learning, etc. y al mismo tiempo nos proporcionan certeza acerca del comportamiento del sistema en un ambiente real.

REFERENCES

- Agnew, C. y Anderson, E. (2024). *Water resources in the arid realm*. Taylor & Francis.
- Alperovits, E. y Shamir, U. (1977). Design of optimal water distribution systems. *Water resources research*, 13(6), 885–900.
- CEABC (2024). Comisión Estatal del Agua de Baja California - Acueducto San Luis Río Colorado-Tijuana. URL <http://www.cea.gob.mx/arct.html>.
- Cortez Lara, A. (2011). Gestión y manejo del agua: el papel de los usuarios agrícolas del valle de mexicali. *Problemas del desarrollo*, 42(167), 71–95.
- Hagino, T. (2021). *Practical Node-RED Programming: Learn powerful visual programming techniques and best practices for the web and IoT*. Packt Publishing Ltd.
- INEGI (2024). Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática. información de tu entidad. URL <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/bc/territorio/clima.aspx>.
- Miranda, R., Avilés, J., Flores, J., Márquez, C., Martínez, R., y Becerra, G. (2023). Design and application of a scada-iot platform for monitoring a raw water distribution network. In *Memorias del Congreso Nacional de Control Automático*, 431–436. doi: 10.58571/CNCA.AMCA.2023.081.
- Ratnayaka, D.D., Brandt, M.J., y Johnson, M. (2009). *Water supply*. Butterworth-Heinemann.
- Rojas, J.D., Arrieta, O., y Vilanova, R. (2021). *Industrial PID controller tuning*. Springer.
- Tian, Y., Zheng, Y., Wu, B., Wu, X., Liu, J., y Zheng, C. (2015). Modeling surface water-groundwater interaction in arid and semi-arid regions with intensive agriculture. *Environmental Modelling & Software*, 63, 170–184.
- Wang, L. (2020). *PID control system design and automatic tuning using MATLAB/Simulink*. John Wiley & Sons.
- Whittle, A.J., Allen, M., Preis, A., y Iqbal, M. (2013). Sensor networks for monitoring and control of water distribution systems.