

SINTONIZACION DE CONTROL PID DE PRESIÓN PARA UN PROTOTIPO DE RED DE DISTRIBUCION DE AGUA MEDIANTE LABVIEW Y MATLAB

MIM. Manzanares-Maldonado Alejandro, Dr. Hernández-Vega José Isidro, Dr. Reynoso-Guajardo Luis Alejandro, ME. Macias-Arias María Ernestina, Dra. García-Díaz Claudia Elizabeth*

Todos los Autores están adscritos al Tecnológico Nacional de México/I. T. Nuevo León. Autor Corresponsal*

División de Estudios de Posgrado e Investigación

Ave. Eloy Cavazos 2001, Col. Tolteca, Guadalupe, N.L. C.P. 67170, México

(81) 81570500 Ext. 140

alejandro.manzanares@nuevoleon.tecnm.mx, jose.hv@nuevoleon.tecnm.mx, luis.rg@nuevoleon.tecnm.mx,

ernestina.ma@nuevoleon.tecnm.mx, claudia.gd@nuevoleon.tecnm.mx

RESUMEN.

El presente trabajo muestra el diseño, sintonización y aplicación de un controlador de presión PID (Proporcional, Integral y Derivativo) para una red de distribución de agua y la obtención de pruebas de laboratorio. Se lleva a cabo, el diseño y construcción del prototipo hidráulico, la obtención de datos y el modelado matemático de la planta, utilizando software de diseño mecánico (SolidWorks), instrumentación visual (LabView) y de herramienta matemática (Matlab). Aplicando un enfoque de control clásico para el sistema de control y por medio de la aplicación 'PID Turner' de Matlab, son obtenidos los parámetros proporcional, integral y derivativo sugeridos por la aplicación. Pruebas de control son realizadas para analizar el comportamiento de la presión en la red y el accionar de la válvula reguladora de presión (VRP), la cual, se encarga de regular de manera adecuada la presión ante perturbaciones que provocan bajas y altas presiones innecesarias. Palabras Clave: Control de Presión, PID, Sintonización en LabView y Matlab.

ABSTRACT.

The present work shows the design, tuning and application of a PID pressure controller (Proportional, Integral and Derivative) for a water distribution network and the obtaining of laboratory tests. The design and construction of the hydraulic prototype, data collection and mathematical modeling of the plant are carried out, using mechanical design software (SolidWorks), visual instrumentation (LabView) and mathematical tools (Matlab). Applying a classical control approach to the control system and through the application 'PID Turner' of Matlab, are obtained the parameters proportional, integral and derivative suggested by the application. Control tests are done to analyze the behavior of the pressure in the network and the operation of the pressure regulating valve (PRV), which is responsible for adequately regulating the pressure in view of disturbances that cause unnecessary low and high pressures.

Keywords: Pressure Control, PID, LabView and Matlab Tuning.

1. INTRODUCCIÓN

La importancia de cuidar los recursos hídricos en la actualidad toma cada vez mayor relevancia, el tema de consumo es de vital importancia, debido a la gran escasez de agua en algunas regiones y la creciente demanda en todo el mundo [1], [2] Informes del Banco Mundial arrojan que el consumo global de

agua se estima en unos 4,600 km³ al año, dividiéndose en tres grandes rubros: consumo en la industria (70%), la agricultura (20%) y doméstico (10%). En este sentido, se estima que en promedio el ser humano gasta al día alrededor de 80 a 100 litros de agua. Otros datos importantes del Banco Mundial mencionan que: 2,000 millones de personas no tienen acceso a agua potable y 3,600 millones carecen de accesos a saneamiento gestionado de manera segura [1], [2]. Por otra parte, el agua es escasa y en algunas regiones las fuentes se encuentran lejos de las ciudades, según la ONU (Organización de las Naciones Unidas) se espera que el uso del agua aumente un 40% debido a factores como: el cambio climático, la acción humana, y el crecimiento demográfico. Resultado de lo anterior es el denominado "Estrés Hídrico", donde la demanda es más alta de lo disponible, repercutiendo directamente en una desaceleración de la economía y desarrollo de un país [2], [3].

Por otra parte, mencionar que los sistemas que se encargan de llevar el líquido son las redes de distribución de agua, las cuales se componen de manera general de una fuente de suministro, tanques de almacenamiento, líneas de distribución; red principal, secundaria y terciaria, además de, equipos actuadores como: bombas hidráulicas, válvulas reguladoras de presión y reguladores de paso [4], [5]. Una problemática que existe a través de estas redes es el desperdicio del vital líquido a causa de fugas en dichas instalaciones hidráulicas, suele ocurrir que, al no tener una presión adecuada, esta presión puede repercutir de manera negativa, dado que, si existe una alta presión, pudiera ocurrir una ruptura por sobrepresiones o exigir más carga de presión a la red, debilitándola paulatinamente, reduciendo así su vida útil y provocar fugas en la instalación. Dichas fugas se clasifican en: reportadas, no reportadas y fugas de fondo difíciles de detectar. Principalmente estas últimas son las de mayor relevancia, ya que inciden de forma oculta con el desperdicio del agua y no se ven a simple vista [2], [6], [7]. Por otra parte, una baja presión en la red puede afectar con un mal servicio en horas pico, donde la mayor parte de la población está utilizando el agua, causando que el líquido llegue de forma escasa y sin presión. Además, si existe una rotura en la instalación, al haber baja presión el agua puede salir y volver entrar a la red, pero ya contaminada al momento de reestablecerse la presión [6].

Dado lo ya mencionado debe existir una gestión adecuada de la red, principalmente un control adecuado de las presiones para reducir las fugas, el mal servicio y evitar la contaminación del vital líquido [8]. El uso de tecnologías como el control remoto en tiempo real se ha convertido en una de las formas más habituales de controlar la presión en una red. Sistemas HMI (Interfaz Hombre-Maquina), sistemas SCADA (Sistemas de Control y Adquisición de Datos), en conjunto con protocolos de comunicación inalámbricos como: GSM/GRPS, Wifi, Bluetooth, entre otros protocolos industriales de comunicación, han sido parte de la solución a esta problemática [7], [4], [9].

En la literatura se muestran trabajos que proponen y demuestran la efectividad de controlar la presión en las redes de agua, estas investigaciones van desde modelos matemáticos de la red, simulación, el uso de teoría de control clásico, moderno, inteligente, difuso, etc. En [6] por ejemplo se propone utilizar el modelo matemático de Torricelli mediante Matlab para investigar el efecto de las fugas de presión, a través de la simulación de cuatro aberturas de fugas controladas con diferentes geometrías, concluyéndose que la forma de estas afecta en menor o mayor medida al desperdicio de agua. En [10] se aplica una modelización hidráulica de la presión para una distribución eficiente del agua. Así como en [11] con un modelo de control predictivo aplicado al modelo dinámico y estático del sistema.

Otra de las formas principales y más común del control de la presión de las redes de agua, es mediante la regulación de elementos actuadores como lo son: equipos de bombeo o las válvulas reguladoras de presión (VRP), estos dispositivos pueden regular su apertura y cierre, de modo que, se incide sobre la presión de la red [5]. Precisamente en [7] se utiliza un controlador proporcional para regular la presión de la red mediante una VRP, esto a medida que la presión cambia gracias a la demanda de consumo. [12] propone principalmente el uso de una acción integral para el control de presión, los resultados muestran no tener problemas con la estabilidad. Al igual que en [13] que utiliza un sistema más completo de control, con un enfoque clásico como PID, en el cual se investiga la interacción entre la VRP con las fluctuaciones y respuesta transitoria del sistema hidráulico, además de, cuidar que no se produzca el golpe de ariete ya que puede ser destructivo para la red si se activan demasiado rápido los actuadores, obteniéndose como resultado una mejora significativa de la respuesta de la presión en la red. En [14] se comparan estos diversos enfoques PD, PID con controladores no lineales robustos, analizando la respuesta de cada uno de ellos.

Otros enfoques incluyen aprendizaje iterativo, el cual es utilizado para cumplir con la presión en puntos críticos de la red a través de medidores que transmiten datos constantemente, considerando patrones de consumo de los usuarios finales [8]. Además de los enfoques clásicos de control, también existen enfoques alternativos como el control difuso que contempla diversas metodologías y combinaciones con otro tipo de controladores.

La investigación que se muestra en [15] propone un sistema de control de presión del tipo PID-Difuso del orden fraccionario, el cual modifica los parámetros proporcional, integral y derivativo en función de la dinámica del sistema. Otras investigaciones utilizan en conjunto control difuso y redes neuronales, donde se reciben y envían datos a través de la IoT (Internet Industrial de las Cosas) para el monitoreo y control de la presión [9]. Estas formas de control hacen uso de software de herramienta matemática como Matlab y su aplicación Simulink [16]. Algunas otras combinaciones se muestran en [17] como lo es control clásico y control inteligente, tal es el caso de controladores PID-Neuronales o meramente utilizando redes neuronales o incluso algoritmos genéticos [18]. En este trabajo para contrarrestar los efectos negativos de la presión en redes de agua, se utiliza una forma innovadora de diseñar y sintonizar el sistema de control a través de software de última generación.

2. DESARROLLO

2.1. Diseño y Construcción del Prototipo

A pesar de que las redes de distribución de agua se pueden clasificar básicamente en tres tipos: ramal, anillo y mixta, esta red se diseñó y construyó en forma de anillo, puesto que, debido a su diseño, este tipo de configuración es muy común encontrarla en campo, teniendo la ventaja de que el agua circule en ambos sentidos, ya que, si existiese una rotura grave en la instalación, esta pueda circular por el otro lado, y no dejar de suministrarse el vital líquido. Aun así, hay que señalar que el diseño y construcción de las redes de distribución de agua también quedan sujetas a la topología del terreno y demanda de usuarios que tendrá la red.

El prototipo desarrollado es un sistema de red de distribución de agua a escala, compuesto por un tanque de almacenamiento de 20 litros, un equipo hidroneumático; formado de un tanque precargado de aire de 24 litros de volumen y una bomba de 1Hp, además de, una válvula reguladora de presión (VRP) bridada de 2 pulgadas y un sensor de presión con salida de 0 a 4.5V equivalentes a la medición de presión de 0 a 174 psi, entre otros elementos de acondicionamiento de señal y pre actuadores. El diseño del Prototipo se realizó en el software de diseño mecánico (SolidWorks), en este programa se diseñaron cada una de las piezas de la red y el ensamble de esta. Figura 1.

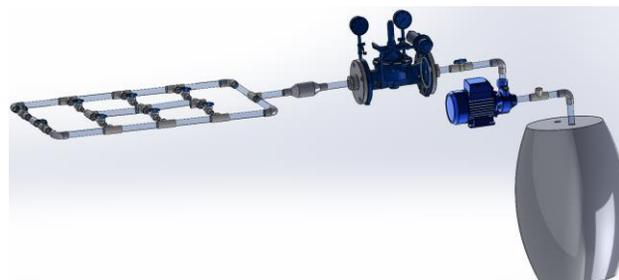


Figura 1. Diseño de red de distribución de agua a tamaño escala en SolidWorks.

El ensamble de las piezas se puede observar en la figura 2, en la cual se muestra el diseño y construcción final de prototipo [19].



Figura 2. Red de distribución de agua a tamaño escala para pruebas a nivel laboratorio.

2.2. Esquema de Control PID

Para el sistema de control de presión se utilizó un enfoque clásico de control PID, dicho enfoque hasta el día de hoy es uno de los más utilizados en automatización industrial, dado al uso extendido y popular para el control de diversas variables en todo tipo de procesos, además de, su buen manejo y eficiencia comprobada en sistemas retroalimentados [13], [19]. Figura 3.

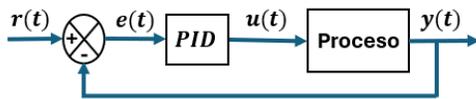


Figura 3. Esquema de sistema de control de lazo cerrado.

La ecuación en el tiempo y en términos de factor común de dicho sistema de control es la siguiente:

$$u(t) = K_c \left[e(t) + \frac{1}{t_i} \int_0^t e(t) dt + t_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

Donde:

$u(t)$ = Salida de acción del controlador PID
 K_c = Constante de factor común
 $e(t)$ = Error en el tiempo del sistema
 t_i = Constante de tiempo integral
 t_d = Constante de tiempo derivativa
 t = Dominio del tiempo

Dicha expresión comúnmente se representa en términos de las constantes de las acciones del controlador, es decir, la constante proporcional, integral y derivativa como a continuación se describe:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

Donde:

K_p = Acción proporcional
 K_i = Acción Integral
 K_d = Acción Derivativa

La figura 4 muestra la representación de las tres acciones de control en el dominio del tiempo [13].

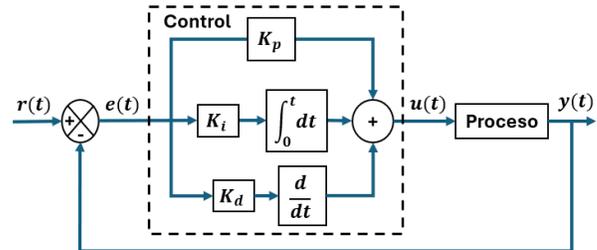


Figura 4. Esquema clásico de control PID en el dominio del tiempo.

La expresión de la función del controlador en términos del dominio de Laplace se puede representar de las siguientes maneras:

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad (3)$$

En términos de las acciones PID la ecuación queda de la siguiente forma:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (4)$$

La figura 5 muestra la representación en el dominio de Laplace del sistema de control [9].

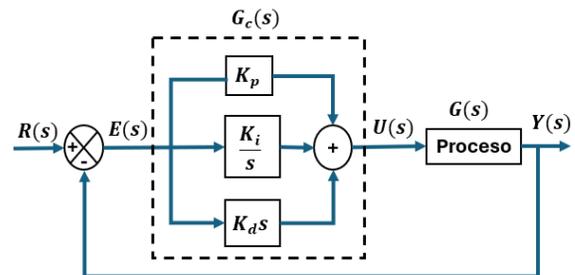


Figura 5. Esquema clásico de control PID en el dominio de Laplace.

2.3. Controlador PID mediante LabView

El desarrollo e implementación del sistema de control de presión se hace con el programa de instrumentación visual (LabView), mientras que, para la recepción y envío de datos se utiliza la plataforma Arduino, tanto una de sus entradas analógicas como una de sus salidas digitales. Figura 6.

A pesar de que el Arduino Uno tiene una tasa de muestreo máxima de alrededor de 10kHz (1 muestra cada 100 microsegundos) este tiempo se hace más lento si se incluyen diversos procesos en el programa y por la forma de gestionar los datos, para este caso el tiempo de muestreo mínimo que permitió la aplicación fue de 5ms. [20]. Figura 6 y Figura 10.



Figura 6. Esquema control PID de presión en lazo cerrado.

LabView cuenta con dos ventanas para el desarrollo de proyectos (diagrama a bloques y panel frontal), es en la primera donde se realiza la programación modular, en la cual se arrastran al área de trabajo bloques preprogramados llamados 'toolkits', que llevan las funciones y herramientas para el procesamiento de señales. La figura 7 muestra los bloques de control PID, lectura y escritura de Arduino, selectores, indicadores y graficas para el monitoreo y control de la presión.

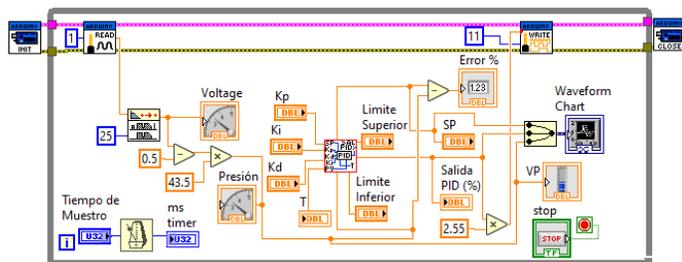


Figura 7. Diagrama a bloques del controlador PID por medio de LabView.

Por otra parte, la figura 8 muestra el panel frontal de LabView, en este se observa los componentes de manera visual para la manipulación de los parámetros del sistema de control PID, se pueden ver botones, selectores, indicadores y graficas de una forma más real y amigable para el usuario, tal cual, como un HMI (Interfaz Hombre-Maquina) [21], [22].

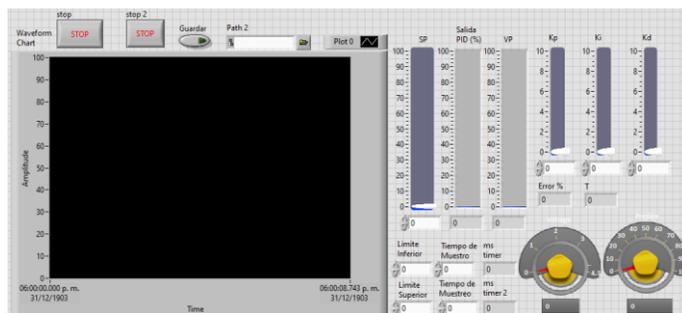


Figura 8. Panel frontal del controlador PID por medio de LabView.

2.4. Obtención de Datos por LabView

Para la obtención del modelo matemático del sistema se utiliza un programa diferente en LabView, este se compone de selectores que permiten someter al sistema a una entrada escalón, la cual, se introduce al solicitar la apertura máxima de la válvula reguladora de presión, es decir, el 100% (Figura 9). La respuesta en el tiempo de la presión se puede visualizar a través de graficas que nos permiten conocer cómo se comporta la variable de proceso ante una determinada entrada [16]. Figura 10.

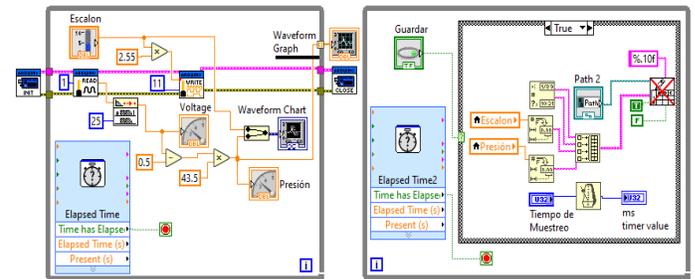


Figura 9. Diagrama a bloques para la obtención de datos de presión de la planta mediante LabView.

La respuesta al escalón, tanto como responde on-line en el proceso y una captura de esta, se puede observar en la figura 10. La gráfica muestra un aumento súbito de la presión al exigirle la máxima presión al sistema, llegando a tenerse una presión de hasta 75 psi.

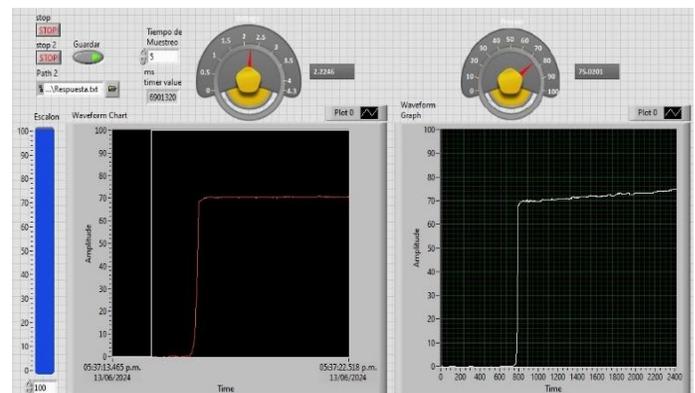


Figura 10. Panel frontal para la obtención de datos de presión de la planta mediante LabView.

2.5. Modelo Matemático y Sintonización por Matlab

Para una visualización más clara de la respuesta de la presión, se pueden obtener los datos de esta a través de Excel, el programa de LabView de la figura 9, permite guardar los datos de la presión del sistema en un archivo Excel, los cuales sirven para graficar de nueva cuenta la respuesta y con ellos posteriormente pasarlos a Matlab para la obtención del modelo matemático del sistema [11]. Figura 11.

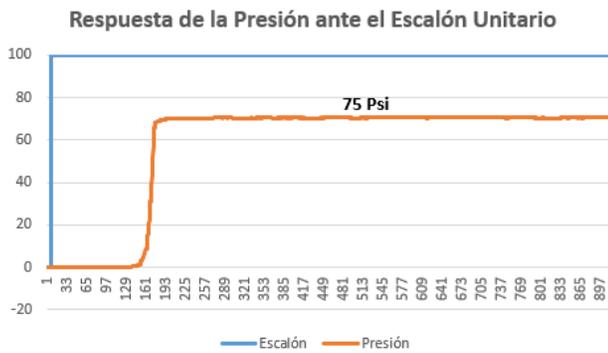


Figura 11. Respuesta de la presión del sistema hidráulico ante una entrada escalón.

Los datos obtenidos se guardan en Matlab en las variables ‘Escalón’ y ‘Presión’, con estas, se realiza la identificación del sistema a través del comando ‘ident’, en el cual se importan los datos y se estima el modelo matemático del sistema. Fig. 12.

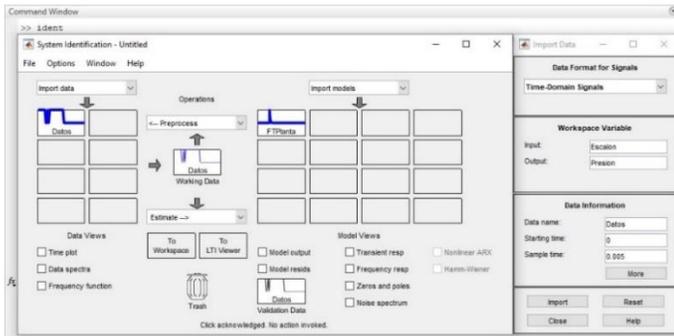


Figura 12. Importación de datos y estimación del sistema en Matlab.

Una vez que se importan los datos y se estima el modelo, se obtiene la función de transferencia del sistema, agregando un ‘delay’ o tiempo de retraso, el cual es evidente al no reaccionar la presión instantáneamente ante el escalón. Figura 13.

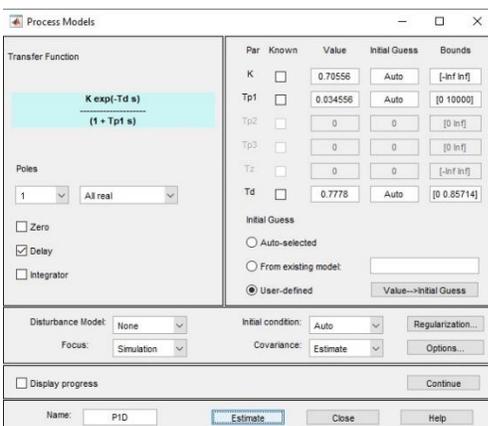


Figura 13. Modelado de la planta por medio de Matlab.

La función de transferencia que arroja Matlab se observa en la figura 14, este es el modelo matemático de la planta y relaciona la salida de presión ante una entrada del tipo escalón.

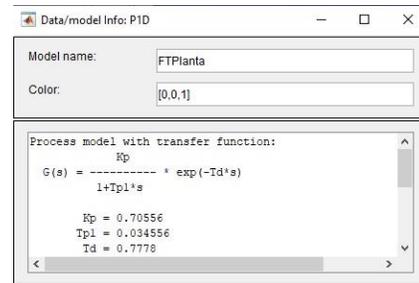


Figura 14. Función de transferencia obtenida mediante Matlab.

La función de transferencia de 1er orden con retardo del sistema de presión con sus constantes incluidas es la siguiente.

$$G(s) = e^{-0.778 s} \left[\frac{0.7056}{0.03456 s + 1} \right] \quad (5)$$

Se importa el modelo de la función de transferencia G(s) obtenida de la aplicación PID Tuner que incluye Matlab (Figura 15), esta aplicación se encarga de sintonizar el control PID específicamente para este sistema. Los parámetros que arroja dicha sintonización para las tres acciones: proporcional, integral y derivativa para aplicar en el controlador, son:

$$K_p = 0.4199 \quad (6)$$

$$K_i = 0.7331 \quad (7)$$

$$K_d = 0 \quad (8)$$

Esta aplicación PID Tuner permite mediante las opciones ‘Slower’ y ‘Agressive’ modificar visualmente la respuesta del sistema de control, permitiendo hacer la respuesta más lenta o rápida, sobre-amortiguada, críticamente-amortiguada o sub-amortiguada, según los requerimientos del sistema.

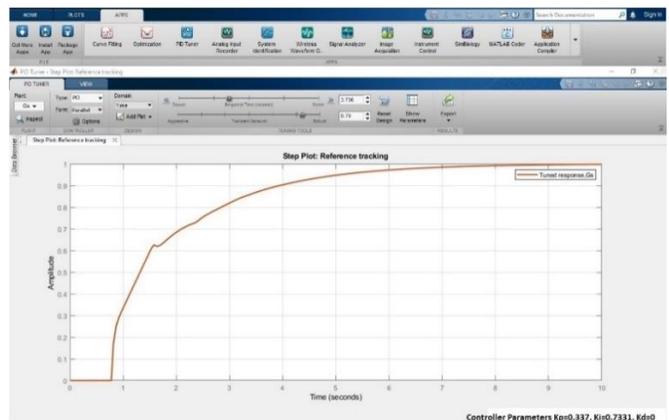


Figura 15. Aplicación PID Tuner de Matlab para la obtención de las constantes PID.

3. RESULTADOS

Al tratarse de un control de presión en un sistema hidráulico, es conveniente que el sistema actúe de forma paulatina, debido a que una activación rápida de los sistemas actuadores como es la válvula reguladora de presión puede incidir de forma negativa en la estructura física del sistema, pudiendo provocar el denominado golpe de ariete, un efecto que puede ser destructivo para la red por la sobrepresión de las partículas de agua que quedan estáticas a la entrada de la válvula al cerrarse abruptamente y que chocan con las que vienen de aguas arriba. La respuesta del sistema de control de presión (Figura. 16) con las constantes sugeridas por Matlab, ante un valor de referencia de presión (línea blanca) tiene un comportamiento muy parecido al de la simulación (Figura. 15), este comportamiento de la presión (línea verde) es adecuado, dado que, se observa un tiempo de establecimiento del sistema de aproximadamente 10 segundos, tiempo suficiente para la apertura y cierre del accionar de la válvula (línea roja) y así poder llegar al valor de deseado.

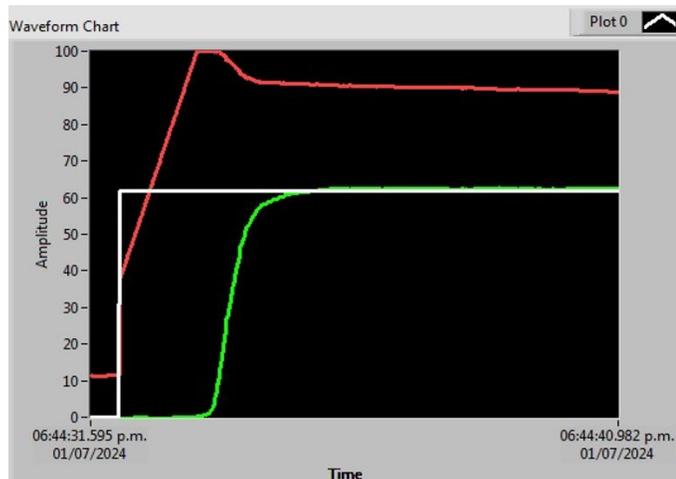


Figura 16. Respuesta del sistema de control de presión.

4. CONCLUSIONES

El uso de nuevas tecnologías tanto de software como de hardware sirven para hacer tareas de forma mas sencilla a como habitualmente se realizan. La utilidad de programas como SolidWorks, Matlab y LabView, permiten lograr el diseño, construcción, desarrollo y sintonización de sistemas de control con diversas variables en todo tipo de plantas. En este trabajo el enfoque de control propuesto se implementa gracias a esta tecnología, la cual puede ser imprescindible para el desarrollo de cualquier proyecto, incluso con otro tipo de controladores como pueden ser control difuso o control inteligente. Además de que se muestra una forma tecnológicamente novedosa e innovadora de modelar y controlar diversos tipos de procesos, consiguiendo resultados muy similares o idénticos a los obtenidos en la simulación.

5. REFERENCIAS

- [1] «Banco Mundial,» 28 Julio 2023. [En línea]. Available: <https://www.bancomundial.org>. [Último acceso: 25 Marzo 2024].
- [2] «ONU-HABITAT,» 22 Marzo 2021. [En línea]. Available: <https://onuhabitat.org.mx/>. [Último acceso: 18 Abril 2024].
- [3] T. C. Moseithe, «Appraising the Impact of Pressure Control on Leakage Flow in Water Distribution Networks,» *MDPI-Water*, vol. 13, n° 2617, pp. 1-13, 2021.
- [4] K. B. Adedeji, «Pressure Management Strategies for Water Loss Reduction in Large-Scale Water Piping Networks: A Review,» *Springer Water*, pp. 465-480, 2018.
- [5] T. C. Moseithe, «A Survey of Pressure Control Approaches in Water Supply Systems,» *MDPI-Water*, vol. 12, n° 1732, pp. 1-17, 2020.
- [6] K. B. Adedeji, «Burst Leakage-Pressure Dependency in Water Piping Networks: Its Impact on Leak Openings,» *IEEE Proceedings*, pp. 1502-1507, 2017.
- [7] P. R. Page, «Real-time adjustment of pressure to demand in water distribution systems: Parameter-less P-controller algorithm,» *ELSEVIER*, pp. 391-397, 2016.
- [8] T. N. Jensen, «Iterative Learning Pressure Control in Water Distribution Networks,» *IEEE Conference on Control Technology and Applications*, pp. 583-588, 2018.
- [9] J. V. S. d. Araújo, «Fuzzy Control of Pressure in a Water Supply Network Based on Neural Network System Modeling and IoT Measurements,» *MDPI-SENSORS*, vol. 22, n° 9130, pp. 1-28, 2022.
- [10] L. Mpiana, «Graph based Hydraulic Modelling of Pressure in Water Distribution Networks,» *IEEE Africon Proceedings*, pp. 1558-1563, 2017.
- [11] N. G. N. Mohammed, «Water Supply Network System Control based on Model Predictive Control,» *IMECS*, vol. 2, 2009.
- [12] G. Sanz, «Pressure Control of a Large Scale Water Network using Integral Action,» *IFAC Proceedings*, vol. 45, n° 3, pp. 270-275, 2012.
- [13] M. Torshizi, «Making a Smart Pressure Reducing Valve for Reducing Pressure Fluctuation Caused by Water Hammer in Water Distribution Network Using Input-Output Feedback Linearization,» *Journal of Water and Wastewater*, vol. 33, n° 3, pp. 126-138, 2022.
- [14] P. KUMAR, «Comparative study of three types of controllers for water distribution networks,» *AWWA*, pp. 74-86, 2009.
- [15] N. Kanagaraj, «Design of Intelligent Fuzzy Fractional-Order PID Controller for Pressure Control Application,» *IEEE-ICICT*, pp. 525-530, 2017.
- [16] SulingL, «Fuzzy Control and Simulation of the constant pressure water supply system for small-type water works,» *IEEE*, pp. 117-120, 2011.
- [17] S. A. Hosseini, «Design and application of supervisory control based on neural network PID controllers for pressurizer system,» *ELSEVIER Progress in Nuclear Energy*, 2020.
- [18] H. Luo, «Layout Optimization of Large - scale Urban Water Supply Network Pressure Measuring Point Distribution Using Genetic Algorithm,» *Proceedings of the 36th Chinese Control Conference*, pp. 1687-1691, 2017.
- [19] N. Fontana, «A lab prototype of pressure control in water distribution networks,» *ELSEVIER-IFAC*, pp. 15373-15378, 2017.
- [20] A. Entezari, «A PID for Needle Valve Output Pressure Control Based on Servo Motor & LabVIEW,» *IEEE-KBEI*, pp. 0151-0155, 2017.
- [21] E. Creaco, «Real time control of water distribution networks: A state-of-the-art review,» *ELSEVIER-Water Research*, pp. 517-530, 2019.
- [22] N. Fontana, «Real-Time Control of Pressure for Leakage Reduction in Water Distribution Network: Field Experiments,» *Water Resour.* pp. 1-12, 2018.