

## Pressure management to reduce leaks in water distribution systems by means of a pressure reducing valve

J.R. Bermúdez \* C. Martínez-García \* F.R. López-Estrada \*  
G. Besançon \*\* G. Valencia-Palomo \*\*\*

\* *Tecnológico Nacional de México, IT Tuxtla Gutiérrez, C. Pan., km 1080, 29050, Tuxtla Gtz., Mexico. (e-mail: frlopez@ittg.edu.mx).*

\*\* *GIPSA-lab, CNRS, Grenoble INP, Université Grenoble Alpes, 38000 Grenoble, France. (e-mail: gildas.besancon@gipsa-lab.grenoble-inp.fr)*

\*\*\* *Tecnológico Nacional de México, IT Hermosillo, Av. Tecnológico, S/N, 83170, Hermosillo, Mexico. (e-mail: gvalencia@hermosillo.tecnm.mx).*

---

**abstract:** This paper proposes a pressure management method for water distribution systems considering the mathematical model under the water hammer equations. Two water systems are analyzed: a simple pipeline and a hydraulic network with two branches. A Pressure Reducing Valve (PRV) is modeled together with the dynamical model for controlling the pressure. This PRV works as the primary actuator, which controls the water flows under a free-leak and leakage scenario. The control strategy is based on a proportional Integral (PI) controller. The simulation results show a small but significant reduction of water losses over long periods.

*Keywords:* control, pressure management, leakage reduction, PRV, pipelines, WDS.

---

### 1. INTRODUCCIÓN

Las técnicas de control en los sistemas de distribución de agua (SDA) son necesarias para mantener los flujos y las presiones aceptables en los nodos de demanda. Existen controladores con temporizadores, otros se basan de acuerdo a la demanda y los remotos (Thornton et al., 2008). Estas técnicas ayudan a que los SDA presenten un buen desempeño sin importar su estructura y su topología (Association et al., 2008). Los SDA pueden tener una configuración en serie, con sectores ramificados y pueden estar en disposición paralela (Streeter et al., 1963), y cuenta con diversos componentes; conexiones de tubos, codos de distintos ángulos, válvulas de control de flujo y presión y varias estaciones de bombeo (Hante et al., 2017). Estos sistemas tienen gran importancia en el transporte de agua potable, aguas residuales y otros tipos de fluidos, como el petróleo y sus derivados como la gasolina, el diesel y combustible de aviones (Castro, 2017). Por otra parte, la falta de gestión de la presión en el transporte del agua generan problemas en el abastecimiento por la falta de presión, o generan rupturas del

material de las tuberías debido a la sobrepresión, además si no hay un control de la presión en estos sistemas se generan grandes magnitudes de fugas (Jowitt and Xu, 1990). De acuerdo a esto, se deben considerar tres puntos muy importantes, para mejorar el comportamiento de un SDA; la reducción de fugas, la gestión de la presión y la estimación de las demandas (Adedeji et al., 2018). Algunos trabajos se han enfocado en la dinámica de los actuadores en un SDA para el control de la presión y reducción de fugas, por ejemplo, Prescott and Ulanicki (2003) diseñan un modelado dinámico de una válvula reductora de presión (VRP) para el control de la presión, Prescott and Ulanicki (2008) rediseñan las ecuaciones de una VRP y proponen un control PID para controlar la presión en una Red hidráulica diseñada en EPANET para reducir fugas, Guillén et al. (2012) desarrollan un modelo dinámico de flujo considerando restricciones de flujo y una bomba hidráulica en una tubería, Fontana et al. (2018) diseñan un modelo dinámico de una VRP para el control de la presión en un SDA. En Galuppini et al. (2019, 2020) diseñan controladores PID aplicados a modelos obtenidos en puntos estratégicos de la red. Los trabajos mencionados anteriormente proponen localización de fugas usando el modelo dinámico de tuberías, y el control de la presión para la reducción de fugas mediante válvulas reductoras de presión en redes diseñadas en EPANET, usando un análisis de las ecuaciones estáticas-

---

\* Este trabajo fue financiado en conjunto por el CONACYT a través del programa de becas Nacionales y por el Tecnológico Nacional de México a través de la convocatoria "Proyectos de Investigación Científica 2021" con referencia 10391.21-P

dinámicas para las Redes de Distribución de Agua (RDA), propias de este Software, y no consideran una disminución de la presión aceptable para el nodo de control en los periodos de demandas mínimas. Este trabajo propone la gestión de la presión para la reducción de fugas mediante controladores PI, diseñados para dos enfoques de un SDA; como tubería simple que transporta agua potable y como una red ramificada (presentada en la sección 2), en este caso se propone el modelado matemático de estos sistemas parametrizados con valores de la red piloto construida en el Tecnológico nacional de México/ITTG (Santos-Ruiz et al., 2018; Bermúdez et al., 2018). Los modelos están acoplados en línea con una válvula reductora de presión la cual permite manipular la presión en el sistema, presentando una técnica puramente dinámica. El objetivo de control consiste en tomar en cuenta la gestión de la presión en los sistemas, además el actuador reduce aún más la presión en los periodos de demanda mínima para poder tener un mayor ahorro del agua fugada. El control PI es diseñado directamente al sistema no lineal de la tubería y la red piloto, demostrando el porcentaje de ahorro de agua fugada (presentado en la sección 3).

## 2. CASOS DE ESTUDIO

### 2.1 Caso 1 Sistema de tuberías

Considere el modelo matemático de una tubería simple de una red de distribución de agua, representado por las siguientes ecuaciones de golpe de ariete:

$$\dot{Q}_1(t) = a_1(H_1 - H_2) + \mu(Q_1)Q_1 |Q_1|, \quad (1)$$

$$\dot{H}_2(t) = a_2(Q_1 - Q_2), \quad (2)$$

$$\dot{Q}_2(t) = a_3(H_2 - H_3) + \mu(Q_2)Q_2 |Q_2|, \quad (3)$$

$$\dot{H}_3(t) = a_4(Q_2 - Q_3), \quad (4)$$

$$\dot{Q}_3(t) = a_5(H_3 - H_4) + \mu(Q_3)Q_3 |Q_3|, \quad (5)$$

con

$$a_{1,3,5} = \frac{gA_r}{z_{1,3,5}}, \quad a_{2,4} = \frac{c^2}{gA_r z_{2,4}}, \quad \mu(Q_{1,2,3}) = -\frac{f(Q_{1,2,3})}{2dA_r},$$

$$f(Q_{1,2,3}) = \frac{1.325}{\log\left(\frac{\epsilon}{3.7d} + \frac{5.74}{\left(\frac{4Q_{1,2,3}}{\pi d v}\right)^{0.9}}\right)^2}$$

donde  $H_1, H_2, H_3$  y  $H_4$  son las presiones  $[m]$ ,  $Q_1, Q_2$  y  $Q_3$  corresponden a los flujos de entrada y salida a lo largo de la tubería  $[m^3/s]$ ,  $g$  es la aceleración de la gravedad  $[m/s^2]$ ,  $A_r$  es el área transversal de la tubería  $[m^2]$ ,  $c$  es la velocidad de onda  $[m/s]$ ,  $d$  es el diámetro de la tubería  $[m]$ ,  $z_1$  es la distancia del extremo inicial de la tubería hacia el nodo controlado,  $z_2$  es la distancia estimada de la fuga (estimada en Santos-Ruiz et al. (2018)), y  $z_3$  es la longitud de la tubería restante hacia el nodo de demanda. y  $f(Q_{1,2,3})$  corresponden a los factores de fricción de Swamee-Jain, y  $v$  representa a la viscosidad cinemática.

Se considera que en el sistema de ecuaciones (1)-(5), el siguiente modelo de fuga se tome en cuenta:

$$Q_l = \lambda \sqrt{|H_3|}, \quad (6)$$

donde  $\lambda$   $[m/s]$  es el coeficiente de fuga y  $H_3$  es la presión del nodo donde se efectúa la fuga.

Debido al efecto de fuga (6), se considera el acoplamiento de una válvula reductora de presión a la tubería, que se utiliza para reducir la presión del agua entrante a un nivel aguas abajo. En consecuencia, la válvula reductora de presión acoplada a la tubería es modelada de la forma siguiente (De Persis and Kallesoe, 2011):

$$\Delta H_{v1,v2} = H_{v1} - H_{v2} = \frac{Q_1 |Q_1|}{(rE)^2}, \quad (7)$$

donde  $Q_1$  es el flujo a través de la válvula,  $r$  es el control de apertura para que el flujo pase a través de la válvula, donde  $r = 1$  corresponde al 100% de apertura y  $r = 0$  corresponde a un 0% de apertura, que significa que está cerrada,  $H_{v1}$  y  $H_{v2}$  corresponden a la presión en los extremos de la válvula,  $E$  representa la velocidad del agua que sale a través del orificio de la válvula, calculada a partir de la ecuación de Torricelli dada por:

$$E = C_v A_v (2g)^{1/2}, \quad (8)$$

donde  $C_v$  es el coeficiente de pérdida de la presión de la válvula,  $A_v$  es el área de sección transversal de la válvula  $[m^2]$  y  $g$   $[m/s^2]$  es la constante de aceleración de la gravedad. La topología de la tubería descrita anteriormente se muestra en la siguiente figura:

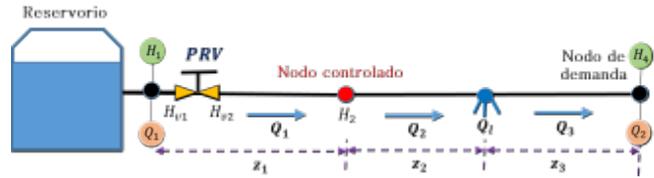


Figura 1. Tubería simple de una red de distribución de agua

donde el modelo matemático de la tubería con una posible fuga y un acoplamiento en línea de la válvula reductora de presión es dado por las siguientes ecuaciones:

$$\dot{Q}_1(t) = a_1(H_1 - H_2) + \mu(Q_1)Q_1 |Q_1| - a_1 \frac{Q_1 |Q_1|}{(rE)^2}, \quad (9)$$

$$\dot{H}_2(t) = a_2(Q_1 - Q_2), \quad (10)$$

$$\dot{Q}_2(t) = a_1(H_2 - H_3) + \mu(Q_2)Q_2 |Q_2|, \quad (11)$$

$$\dot{H}_3(t) = a_2(Q_2 - Q_3 - Q_l), \quad (12)$$

$$\dot{Q}_3(t) = a_3(H_3 - H_4) + \mu(Q_3)Q_3 |Q_3|. \quad (13)$$

### 2.2 Caso 2 Red de Distribución de Agua

En este caso, se considera una red de distribución de agua con la topología que se muestra en la Fig. 2

Esta red representa un sistema de tubería que se encuentra en el Laboratorio de Hidroinformática del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez/TecNM cuyo modelo matemático está escrito como sigue y validado en Bermúdez et al. (2017):

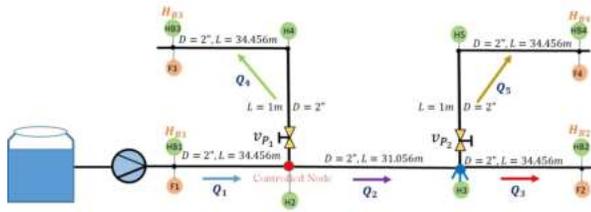


Figura 2. Topología de una red de distribución de agua

$$\dot{Q}_1(t) = a_1(H_{B1} - H_2) + \mu(Q_1)Q_1|Q_1| - a_1 \frac{Q_1|Q_1|}{(rE)^2}, \quad (14)$$

$$\dot{H}_2(t) = a_2(Q_1 - Q_2 - Q_4), \quad (15)$$

$$\dot{Q}_2(t) = a_1(H_2 - H_3) + \mu(Q_2)Q_2|Q_2|, \quad (16)$$

$$\dot{H}_3(t) = a_2(Q_2 - Q_5 - Q_3 - Q_1), \quad (17)$$

$$\dot{Q}_3(t) = a_1(H_3 - H_{B2}) + \mu(Q_3)Q_3|Q_3|, \quad (18)$$

$$\dot{Q}_4(t) = a_1(H_2 - H_{B3}) + \mu(Q_4)Q_4|Q_4|, \quad (19)$$

$$\dot{Q}_5(t) = a_1(H_3 - H_{B4}) + \mu(Q_5)Q_5|Q_5|, \quad (20)$$

de manera similar al caso anterior, el modelo matemático de la red de distribución de agua (14)-(20) considera una posible fuga en el nodo  $H_3$  (acoplada en la ecuación (17)) y un acoplamiento en línea de la válvula reductora de presión, como se muestra en la ecuación (14).

Ambos casos, presentan el siguiente problema.

### 2.3 Formulación del problema

Debido al acoplamiento en línea de una válvula reductora de presión en una tubería simple (Caso 1), y en una red de distribución de agua (Caso 2) descritos en la sección anterior, la válvula reductora de presión (VRP) es ahora el actuador de la planta. Con la finalidad de gestionar la presión, reduciendo el caudal perdido debido a la fuga, es necesario controlar automáticamente la apertura y/o cierre de la válvula, para suministrar la presión de referencia dada, de acuerdo al patrón de consumo de agua, y al mismo tiempo, reducir el caudal perdido debido a fugas. Tal pérdida se considera que puede tener un comportamiento abrupto o intermitente. Por lo tanto, es necesario controlar la válvula reductora de presión acoplada en ambos casos expuestos, cumpliendo con los siguientes objetivos de control:

- Regulación de la presión en el nodo controlado, de acuerdo al patrón de demanda de presión (perfil de presión).
- Gestión de la presión en el nodo controlado, a pesar de las fugas.
- Gestión de la presión para la reducción de la presión, debido a fugas.

## 3. DISEÑO DEL ALGORITMO DE CONTROL

### 3.1 Gestión de la presión

Para cumplir con los tres objetivos de control planteados anteriormente, se propone un control Proporcional Integral (PI), de tal manera que la acción de control  $r(t)$ , actúe directamente sobre la apertura y cierre de la válvula, que controla la presión del nodo, por lo tanto, la acción de control es expresada de la siguiente forma:

$$r(t) = K_p \varepsilon(t) + K_i \int_{t=0}^T \varepsilon(t) dt, \quad (21)$$

donde  $\varepsilon(t) = H_{ref} - H_s$  es la señal del error.  $H_{ref}$  es la presión de referencia, es decir, el patrón de demanda para cada caso (tubería simple y red de distribución de agua).  $H_s$  corresponde a la presión de salida.  $K_p$  y  $K_i$  son las ganancias proporcional e integral del control, respectivamente. De forma gráfica podemos ver en la siguiente Fig. 3 como es interconectado el control a los casos de estudios presentados. El control para la gestión

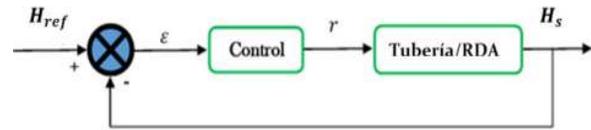


Figura 3. Diagrama de control para la gestión de la presión en ambos casos.

de la presión en los casos de la tubería y la red no requiere de ninguna transformación del sistema, para poder aplicarse, es decir, el sistema no lineal de la planta con los acoples del modelo de la válvula y el modelado de posibles fugas se conservan para la implementación del control, además, para el cálculo de las ganancias del controlador, el control requiere de solo la información del patrón de demanda o perfil de la presión para cumplir con el objetivo de seguir la referencia, mantener la presión y reducir las pérdidas debido a las fugas. Las ganancias pueden ser fácilmente calculadas con el sintonizador de MATLAB.

Para mostrar el cumplimiento de los objetivos de control, a continuación, se muestran los resultados en simulación para ambos casos. Donde el valor de los parámetros para ambos casos, son dados en la tabla 1.

*Caso 1* Se evalúan los primeros dos objetivos de control con el sistema de tubería simple (9)-(13) descrito en la sección 2.

Los resultados del primer objetivo de control se muestran en la Fig. 4, donde se puede visualizar que en la primera gráfica de arriba de la Fig. 4, muestra cuatro diferentes cambios de presión, dados por la línea azul punteada denominada como  $H_{ref}$ , a estos cambios se le denominan perfil de presión. Este perfil de presión es la referencia para la presión de salida  $H_2$ . Con un valor de  $K_p = 1.5$  y  $K_i = 1.8$  para las ganancias del controlador PI,

Tabla 1. Parámetros del sistema.

Parámetro	Valor
Longitud $z_1, z_2$ y $z_3$ (tubería)	11.278;29.86;58.82[m]
Longitud $z_1$ y $z_3$ (RDA)	34.456 [m]
Longitud $z_2$ (RDA)	31.056 [m]
Longitud $z_4$ y $z_5$ (RDA)	35.456 [m]
Rugosidad relativa, $\epsilon$	$0.347 \times 10^{-4}$
Densidad del fluido (agua), $\rho$	995.736 [kg/m <sup>3</sup> ]
Viscosidad cinemática, $\nu$	$0.803 \times 10^{-6}$ [m <sup>2</sup> /s]
Presión (RDA), $H_{B1}$ $H_{B2}$	5.6542; 1 [mH <sub>2</sub> O]
Presión (RDA), $H_{B3}$ $H_{B4}$	1; 1 [mH <sub>2</sub> O]
Presión (RDA/tubería), $H_1$ $H_4$	3.5480; 1.5884 [mH <sub>2</sub> O]
Aceleración de la gravedad, $g$	9.81 [m/s <sup>2</sup> ]
Coefficiente de la válvula, $C_v$	1.156
Diámetro interior, $d$	0.048 [m]
Onda de presión, $c$	422.754

hacen que la acción de control como se muestra en el gráfico de en medio de la Fig. 4, la válvula realice las aperturas necesarias, para que la salida de presión controlada  $H_2$  siga la referencia  $H_{ref}$  (en el gráfico  $H_{PI}$ ). Posteriormente, en el gráfico inferior de la Fig. 4 se muestra el comportamiento del flujo, de acuerdo con el patrón de demanda de presión.

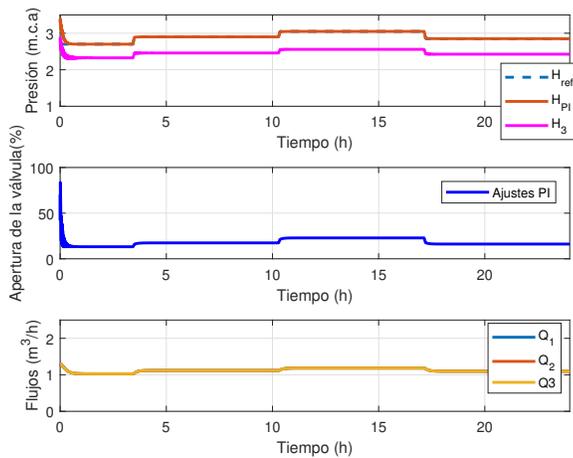


Figura 4. Control de la presión en la tubería simple.

Para el segundo objetivo de control, que es gestionar la presión de la demanda a pesar de la existencia de una fuga. El sistema de tuberías (9)-(13) es sujeto a las siguientes fugas intermitentes con el mismo patrón de demanda de presión que en el caso anterior, la primera fuga se activa aproximadamente a las 4 horas con un coeficiente de fuga de  $\lambda = 9e^{-5}$ , después a las 7 horas con un valor de  $\lambda = 1.5e^{-4}$ , y finalmente, a las 16 horas con  $\lambda = 1.7e^{-4}$ , estas fugas intermitentes se pueden ver manifestadas como picos en los gráficos mostrados en la Fig. 5. Al activarse estas variaciones de coeficientes de fugas, hacen que exista una caída de la presión de salida  $H_2$  (en el gráfico  $H_{PI}$ ), sin embargo, la acción de control hace ajustar la apertura y cierre de la válvula reductora

de presión mostrada en el gráfico de en medio de la Fig. 5 (con los mismos valores de ganancias del controlador PI, del caso sin fuga) para satisfacer la presión de demanda, a pesar de las fugas. Es decir, en la primera activación de la fuga, la válvula se abre alrededor del 8% más (ver el gráfico de en medio de la Fig. 5), para satisfacer la presión requerida en la segunda demanda. Posteriormente, con el segundo cambio del coeficiente de fuga, la válvula se abre alrededor del 7% más para seguir manteniendo la presión de la segunda demanda, y finalmente en el tercer cambio de coeficiente de fuga que se activa en el periodo final de la máxima demanda, la válvula se abre aproximadamente un 12% más, para seguir manteniendo la presión de la demanda máxima, así como la demanda mínima. El gráfico en la parte inferior de la Fig. 5 muestra la evolución dinámica de los flujos de la tubería a medida que se dan los cambios mencionados.

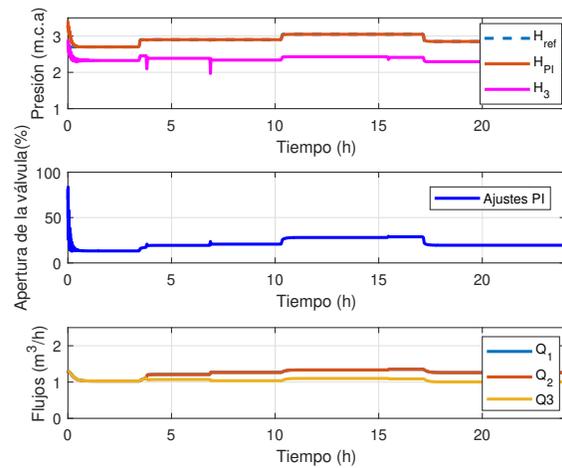


Figura 5. Control de la presión en la tubería con fugas.

*Caso 2* La evaluación del tercer objetivo de control se describe a continuación, que es gestionar la presión y tratar de reducir la presión para ahorrar un caudal perdido debido a fugas. La evaluación es hecha con la red de distribución de agua dada por la ecuaciones (14)-(20), descrita y mostrada en la sección 2, evaluada con dos diferentes patrones de demanda.

Para la gestión de la presión de la red de distribución de agua (Fig. 2), se elige como nodo controlado  $H_2$ , con el fin de evitar sobre presiones en el resto de los nodos de la red. Para ello, se propone un primer patrón de demanda dado en línea negra punteada, denominado  $Ref_{sin\ fuga}$  como se muestra en el gráfico de arriba de la Fig. 6. El patrón tiene tres demandas de presión, la primera demanda comienza entre las 0 horas y 10 horas aproximadamente, la segunda demanda máxima comienza entre las 10 horas y 18 horas y finalmente, entre las 18 horas y 24 horas se tiene la demanda mínima. Durante el proceso de demandas, a las 13 horas, en el nodo  $H_2$  se activa una fuga con un

coeficiente de fuga de  $\lambda = 5e^{-4}$ . La activación de la fuga, se puede ver en el gráfico de en medio de la Fig. 6, donde se puede ver que la presión en ese nodo disminuye, como consecuencia de la fuga al igual que la presión del nodo  $H_2$ , sin embargo, la acción de control con un valor de ganancia de  $K_p = 3.5$  y  $K_i = 5$  hace que la válvula se abra 30 % más (ver gráfico abajo Fig. 6) para poder suministrar y seguir la presión requerida en la máxima demanda, ya que en este período de máxima demanda, es sabido que el usuario no puede quedar sin suministro, por el contrario que en el período de demanda mínima, en este período es posible hacer reducciones de presión para reducir el flujo debido a fugas, sin afectar el suministro del usuario, por lo tanto, en el período de demanda mínima para nuestro caso, el control hace que la válvula se acerque a su mínima apertura, por lo tanto, esta acción hace que la presión disminuya como se puede ver en el gráfico de arriba de la Fig. 6. En consecuencia, con esta reducción de presión a la salida, en las demandas mínimas genera un ahorro de 1836 l/h a 1772 l/h en 24 horas, aproximadamente a un 4 % de reducción. La Fig. 7 muestra la evolución del flujo de demanda  $Q_3$ ,  $Q_4$  y  $Q_5$  que son los flujos de salida de la red, ante los efectos de las fugas, el flujo disminuye y lo hace un tanto más sin llegar a quedarse sin flujo al momento de la reducción.

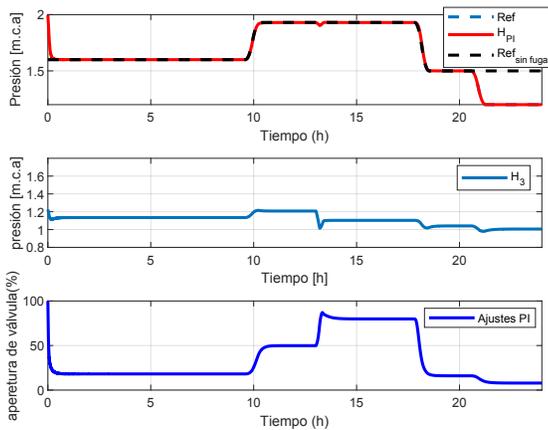


Figura 6. Comportamiento de la presión en 24 horas

Ahora, la red de distribución de agua, es evaluada con otro perfil de demanda de 24 horas, con cuatro cambios de demanda, como se muestra en el gráfico de arriba de la figura 8 con línea negra punteada denominada  $Ref_{sin fuga}$ . El sistema es sometido a una fuga, con un coeficiente de  $\lambda = 6e^{-4}$  activado aproximadamente a las 6 horas en el nodo  $H_3$ , como se puede ver en el gráfico de en medio de la figura 8 como se disminuye la presión debido a la fuga, por lo tanto, para que la presión de salida se mantenga y siga la referencia de presión de demanda, las ganancias del controlador son  $K_p = 1.12$  y  $K_i = 0.99$ , logrando así, abrir la válvula aproximadamente un 10 % para la demanda máxima, posteriormente, al momento que se encuentra en mínimas demandas, el controlador

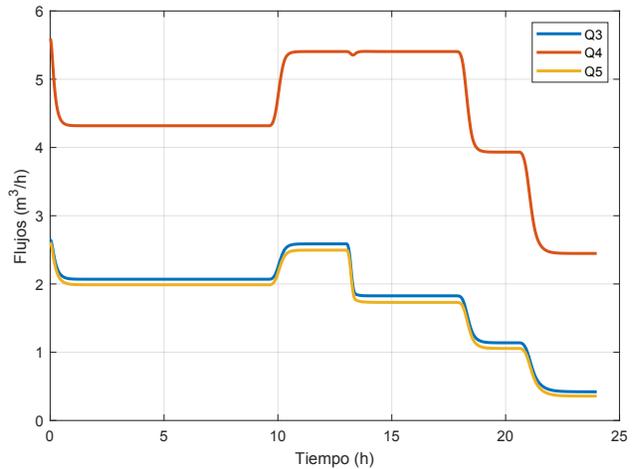


Figura 7. Flujos de demanda en 24 horas (en presencia de fuga)

hace que la válvula cierre un 12 %, para reducir la presión y el efecto de fuga, como se puede ver en las imágenes de la figura 8, con este cambio de referencia, la reducción que se hace es de aproximadamente de 2239 l/h a 2158 l/h en 24 horas, equivale aproximadamente a un 4 % de reducción. En la figura 9 se presenta el comportamiento de los flujos, de acuerdo a los ajustes de la válvula reductora de presión.

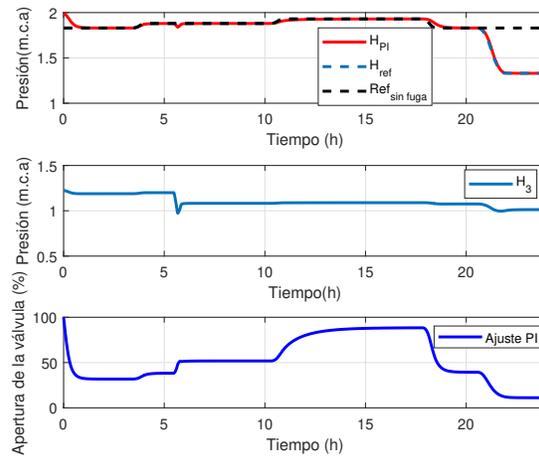


Figura 8. Control de la presión en la RDA en presencia de fuga

#### 4. CONCLUSIONES

Los objetivos de control presentados en este trabajo demuestran la gestión de la presión en los sistemas de redes de distribución de agua en función de las variaciones de la demanda. Y la reducción de fugas, a través de una VRP, donde la acción de control PI es el ajuste de apertura y cierre de la válvula, todo esto basado únicamente en el

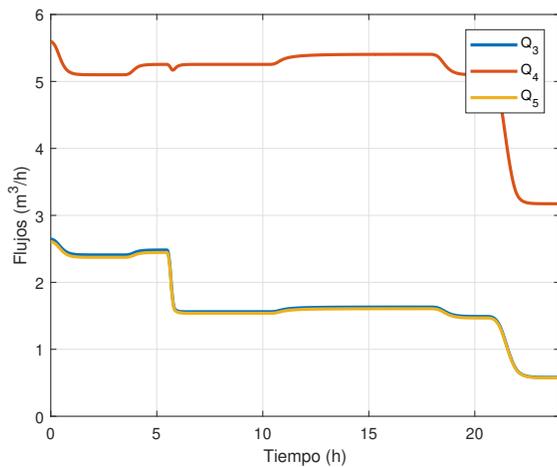


Figura 9. Flujos de demanda (durante las 24 horas, en presencia de fuga)

valor de la presión de un nodo de red. Todas las simulaciones presentan un patrón de demanda de un día (24 horas), mostrando así las demandas máximas y mínimas, durante este período, se obtiene un control que sigue las variaciones de presión en el nodo crítico. Con lo anterior, se evita otras posibles roturas debido a sobre presiones en el sistema, y satisfacción en las demandas dadas. La reducción de fugas se produce en el período de demandas mínimas en el sistema, mediante la reducción de la presión por medio de una VRP en este período de tiempo. En este sentido, es esencial subrayar que las fugas se simularon en las demandas mínimas para reducirlas sin afectar a los períodos máximos de demanda.

## REFERENCIAS

- Adedeji, K.B., Hamam, Y., Abe, B.T., and Abu-Mahfouz, A.M. (2018). Pressure management strategies for water loss reduction in large-scale water piping networks: A review. *Advances in hydroinformatics*, 465–480.
- Association, A.W.W. et al. (2008). *Water Audits and Loss Control Programs: M36*, volume 36. American Water Works Association.
- Bermúdez, J.R., López-Estrada, F.R., Besançon, G., Valencia-Palomo, G., Torres, L., and Hernández, H.R. (2018). Modeling and simulation of a hydraulic network for leak diagnosis. *Mathematical and computational applications*, 23(4), 70.
- Bermúdez, J., Santos-Ruiz, I., López-Estrada, F., Torres, L., and Puig, V. (2017). Diseño y modelado dinámico de una planta piloto para detección de fugas hidráulicas. *Asociación mexicana de control automático*.
- Castro, P.M. (2017). Optimal scheduling of multiproduct pipelines in networks with reversible flow. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 56(34), 9638–9656.
- De Persis, C. and Kallés, C.S. (2011). Pressure regulation in nonlinear hydraulic networks by positive and quantized controls. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 19(6), 1371–1383.
- Fontana, N., Giugni, M., Glielmo, L., Marini, G., and Verrilli, F. (2018). Real-time control of a prv in water distribution networks for pressure regulation: Theoretical framework and laboratory experiments. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 144(1), 04017075.
- Galuppini, G., Creaco, E., and Magni, L. (2020). A gain scheduling approach to improve pressure control in water distribution networks. *Control Engineering Practice*, 103, 104612.
- Galuppini, G., Creaco, E., Toffanin, C., and Magni, L. (2019). Service pressure regulation in water distribution networks. *Control Engineering Practice*, 86, 70–84.
- Guillén, M., Dulhoste, J.F., Besançon, G., and Santos, R. (2012). Study of a flow model for detection and location of leaks and obstructions in pipes. In *9th International Conference on Modeling, Optimization & SIMulation*.
- Hante, F.M., Leugering, G., Martin, A., Schewe, L., and Schmidt, M. (2017). Challenges in optimal control problems for gas and fluid flow in networks of pipes and canals: From modeling to industrial applications. In *Industrial Mathematics and Complex Systems*, 77–122. Springer.
- Jowitt, P.W. and Xu, C. (1990). Optimal valve control in water-distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 116(4), 455–472.
- Prescott, S. and Ulanicki, B. (2008). Improved control of pressure reducing valves in water distribution networks. *Journal of hydraulic engineering*, 134(1), 56–65.
- Prescott, S.L. and Ulanicki, B. (2003). Dynamic modeling of pressure reducing valves. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(10), 804–812.
- Santos-Ruiz, I.d.l., Bermúdez, J.R., López-Estrada, F.R., Puig, V., Torres, L., and Delgado-Aguíñaga, J. (2018). Online leak diagnosis in pipelines using an ekf-based and steady-state mixed approach. *Control Engineering Practice*, 81, 55–64.
- Streeter, V.L., Wylie, E.B., Bedford, K.W., Saldarriaga, J.G., et al. (1963). *Mecánica de los fluidos*. Technical report, Ediciones del Castillo.
- Thornton, J., Sturm, R., and Kunkel, G. (2008). *Water loss control*. McGraw-Hill Education.