

Análisis experimental de válvulas reductoras de presión proporcionales para sistemas de distribución de agua

García-Todolí, S.^a, Iglesias-Rey, P.L.^b y Martínez-Solano, F.J.^c

^aDepartamento de Ingeniería hidráulica y Medio Ambiente - Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n. 46022 Valencia (España). email: sgtodoli@upv.es, ^bDepartamento de Ingeniería hidráulica y Medio Ambiente - Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n. 46022 Valencia (España). email: piglesia@upv.es y ^cDepartamento de Ingeniería hidráulica y Medio Ambiente - Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n. 46022 Valencia (España). email: jmsolano@upv.es.

Línea temática D | Estructuras hidráulicas

RESUMEN

Las válvulas de reducción de presión (VRPs) son un dispositivo ampliamente utilizado para controlar sistemas de distribución de agua. El comportamiento de estas válvulas se basa en la regulación de la entrada y salida de agua de una cámara de control. Las válvulas reductoras de presión proporcionales (VRPPs) son una variación de los VRPs, donde el sistema de control es una conexión directa entre la cámara y el punto aguas abajo de la válvula. Se utilizan donde se requieren grandes reducciones de presión. El balance de equilibrio tradicional de las VRPPs considera una relación constante entre la presión de entrada y de salida (λ). En este trabajo se ha realizado un enfoque alternativo basado en un análisis experimental de λ . Las pruebas muestran que el parámetro λ no puede considerarse constante. Así, para caracterizar estas VRPPs se ha desarrollado un modelo matemático. Este modelo puede explicar las variaciones de λ con la variación de presión de entrada y caudal convirtiéndose ciertamente en una forma más completa de representar este tipo de válvulas.

Palabras clave | Válvula hidráulica; reducción proporcional; ratio de reducción; coeficiente de caudal; grado de apertura.

INTRODUCCIÓN

Las válvulas son uno de los elementos fundamentales en el control y operación de las redes de distribución de agua. Sin válvulas de control muchos sistemas difícilmente podrían operar bajo las condiciones de diseño, o requerirían grandes inversiones y costos de operación. De hecho, aunque el presupuesto de válvulas es una parte muy pequeña del presupuesto total de una instalación, son elementos esenciales para el correcto funcionamiento del sistema.

Hay una amplia gama de válvulas. En muchos casos, la misma válvula se utiliza para realizar diferentes funciones, acoplando diversos elementos complementarios. Así, teniendo en cuenta la función que realizaron, se pueden definir cuatro grandes grupos de válvulas:

- Válvulas de operación, que permiten el mantenimiento diario de las redes. Actúan como todo-nada, permitiendo aislar tramos de las conducciones.
- Válvulas de protección o de seguridad, que actúan como protección de los elementos del sistema cuando son requeridas, interviniendo de forma ocasional, en situaciones excepcionales o de emergencia. Por lo general, están diseñadas para evitar roturas de tuberías o para controlar fenómenos como golpe de Ariete o en operaciones de llenado y vaciado de red.
- Válvulas de regulación, que permiten el control de cualquier variable del fluido, si bien, no funcionan generalmente de forma autónoma. Reciben órdenes a distancia desde un puesto de control, o bien, siguiendo una determinada secuencia.
- Válvulas de control de flujo, también denominadas válvulas hidráulicas automáticas, funcionan generalmente de manera autónoma, tratando de mantener una determinada consigna (presión, flujo, pérdida de la cabeza...).

El esquema de operaciones de este tipo de válvulas se muestra en la figura 1. Dentro de este grupo se encuentran las válvulas proporcionales de reducción de presión (VRPPs) estudiadas en este trabajo.

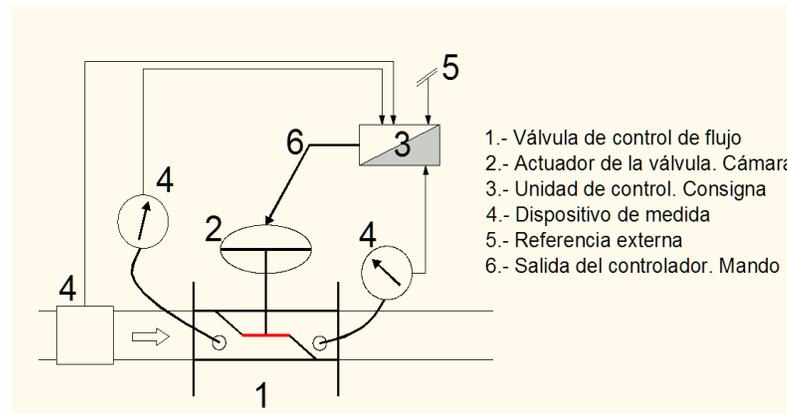


Figura 1. Representación esquemática de válvula de control de flujo

Las VRPPs corresponden al grupo de válvulas de control y el actuador dispone de diversos elementos: pistón, diafragma (simple o doble cámara). Este actuador puede estar embebido en el propio cuerpo de la válvula o puede estar conectado externamente a la válvula a través de un vástago. En general, el actuador consta de una cámara cerrada que habilita un volumen, que recibe agua del propio tubo y/o lo expulsa fuera de la cámara.

La hipótesis de una reducción proporcional de presión se basa en el balance de fuerzas en la válvula (Prescott y Ulanicki 2008). Algunos estudios previos se han centrado en el comportamiento dinámico de la válvula, ya sea considerando su respuesta (Prescott y Ulanicki 2003) o considerando la aparición de cavitación en el interior (Ulanicki et al., 2015).

Sin embargo, el análisis experimental muestra que esta relación de reducción de presión no es constante. Varía con la presión de entrada y el caudal. Por esta razón, este trabajo profundiza en el funcionamiento de las VRPPs. Para ello, se toma como punto de partida el estudio teórico de su comportamiento. Posteriormente, se analizará experimentalmente la respuesta de estas válvulas y finalmente se propondrá un modelo teórico para explicar y justificar los resultados experimentales.

MODELO TEÓRICO DE VRPP

Una válvula que funciona como una VRPP requiere un actuador con cámara doble. La cámara superior está conectada directamente con un punto aguas abajo de la válvula, mientras que la inferior está conectada a la atmósfera. Este tipo de conexión genera una reducción proporcional entre las presiones de entrada y de salida. Es decir, la relación entre la presión de entrada y la de salida es prácticamente constante.

Por lo tanto, las VRPPs deben tener doble cámara. La presión aguas abajo está conectada a la cámara superior ejerciendo una fuerza de cierre sobre la cara superior del diafragma y, por medio del vástago sobre el disco de cierre. Por otra parte, la presión aguas arriba ejerce una fuerza de apertura sobre la cara inferior del disco de cierre. La fuerza neta resultante de la acción de las dos fuerzas dinámicas opuestas (figura 2) sobre el diafragma y el obturador de la válvula es el que determina el grado de apertura de la válvula. La válvula tiende al punto de equilibrio entre ambas fuerzas. Cualquier aumento de la presión aguas abajo aumenta momentáneamente la fuerza de cierre. Como resultado, la válvula se cierra para reducir la presión aguas abajo y mantener el equilibrio de la fuerza.

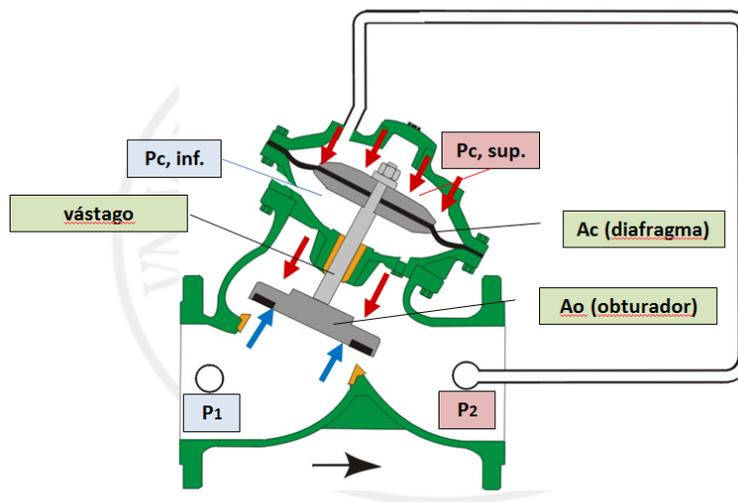


Figura 2. Balance de fuerzas de una VRPP

El resultado del balance de fuerzas determina la posición de la válvula (Dvir 1997). La posición de equilibrio se alcanza cuando la Fuerza F sobre el obturador de la válvula es cero. Matemáticamente, en una posición genérica de la válvula (figura 2), la fuerza F que tiende a abrir la válvula viene dada por la expresión:

$$F = p_1 A_0 + p_{c,inf} A_c - p_2 A_0 - p_{c,sup} A_c \quad (1)$$

Las fuerzas que originan la abertura de la válvula son la acción de la presión aguas arriba p_1 sobre la superficie de asiento de válvula A_0 y la presión dentro de la parte inferior de la cámara $p_{c,inf}$ actuando sobre el diafragma. Por su parte, las fuerzas que intervienen en el cierre de la válvula son generadas por la presión aguas abajo p_2 sobre la cara posterior del asiento (A_0) y sobre la parte superior del diafragma (superficie A_c).

Algunos estudios previos (Prescott y Ulanicki 2003) consideran que en el balance (1) es necesario tener en cuenta el término relacionado con el momento generado por el chorro de agua que impacta sobre el asiento de la válvula. Esta fuerza actúa directamente en la misma dirección del eje y por lo tanto en la misma dirección que las fuerzas consideradas en (1). Teniendo en cuenta este efecto, el equilibrio de fuerzas puede escribirse como:

$$F = p_1 A_0 + \rho \frac{Q^2}{A_0} + p_{c,inf} A_c - p_2 A_0 - p_{c,sup} A_c \quad (2)$$

Donde Q es el flujo a través de la válvula y ρ es la densidad del agua.

Los efectos de impulso en sentidos diferentes en la dirección del vástago de la válvula pueden considerarse despreciables puesto que las tensiones en direcciones diferentes tienden a compensarse entre sí.

En el caso que la válvula (Figura 2) sea una VRPP, la cámara inferior está conectada a la atmósfera ($p_{c,inf} = 0$) y hay una conexión entre el extremo de la válvula y la cámara superior. Entonces, despreciando las pérdidas en esta conexión, la presión p_2 puede considerarse igual a la presión $p_{c,sup}$. Entonces, si el efecto de momento definido en (2) se considera insignificante, la fuerza resultante F en el vástago de la válvula es:

$$F = p_1 A_0 - p_2 A_0 - p_2 A_c \quad (3)$$

En resumen, bajo estas hipótesis la reducción de la presión λ entre la entrada y la salida viene dada por la expresión:

$$\lambda = \frac{p_1}{p_2} = \frac{A_0 + A_c}{A_0} = 1 + \frac{A_c}{A_0} \quad (4)$$

Es decir, la reducción de presión siempre sería fija y dependería solamente de la relación entre las secciones A_0 y A_c . El objetivo del trabajo es validar si las hipótesis que conducen a la ecuación (4) son válidas o no. Para ello, se realizará un análisis experimental del comportamiento de este tipo de VRPPs para establecer el rango de variación de λ y los parámetros que afectan a esta variación.

CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS VÁLVULAS

Las pruebas para la caracterización experimental de las VRPPs se han llevado a cabo en dos bancos de ensayo: uno en el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universitat Politècnica de València (Figura 3) y el otro en las instalaciones de Bermad Europe. Todos los elementos de medición y control de ambos bancos de ensayo se calibraron y ajustaron para asegurar que los resultados fueran los mismos en ambos sistemas.

Se han seleccionado diferentes fabricantes, tamaños de válvulas y mecanismos de cierre. El objetivo es estudiar experimentalmente la influencia del diseño de la válvula (diferentes fabricantes), el tamaño de la cámara (diámetros diferentes) y el mecanismo de cierre. Finalmente, se han probado cuatro modelos diferentes con dos asientos de cierre diferentes para dos de los modelos utilizados. Así, se llevaron a cabo 6 pruebas diferentes. Los detalles de estos elementos son:

- Válvula 1: Modelo A, 3" de diámetro, asiento plano.
- Válvula 2: Modelo A, 3" de diámetro, con un sistema de reducción de sección transversal para control de caudales bajos.
- Válvula 3: Modelo B, 3" de diámetro, asiento plano.
- Válvula 4: Modelo C, 2" de diámetro, asiento plano.
- Válvula 5: Modelo D, 2" de diámetro, asiento plano.
- Válvula 6: Modelo D, 2" de diámetro, un sistema de reducción de sección transversal para control de caudales bajos.



Figura 3. Banco de pruebas de válvulas en la Universitat Politècnica de Valencia (UPV)

El propósito del procedimiento de ensayo fue determinar la variación de la relación de reducción de presión (λ) con otros parámetros operativos tales como el caudal, la velocidad del fluido, la presión de entrada o la posición de la válvula.

Con el fin de obtener el grado de apertura de las válvulas y puesto que no se disponía de ningún marcador de válvula, se definió un procedimiento para la determinación del grado de apertura. Este procedimiento consistió en relacionar el volumen contenido en la cámara con el desplazamiento del vástago de la válvula. Para ello, se realizó un primer análisis rellenando completamente la cámara, lo que significó que la válvula estaba completamente cerrada. Posteriormente, se extrajeron volúmenes discretos de agua de la cámara y se observó el desplazamiento del obturador. Debe tenerse en cuenta que este ensayo se realizó con la válvula desconectada del banco de ensayo. De este modo fue posible observar y medir externamente el desplazamiento del asiento. Una vez completada esta prueba, se estableció la relación entre el volumen de agua contenido en la cámara y la posición de la válvula.

A partir de este punto, el procedimiento de ensayo fue simple ya que las únicas variables que se midieron en cada ensayo fueron la presión aguas arriba, la presión aguas abajo, el caudal de la válvula y el volumen de agua contenido en la cámara. Se realizaron un total de 27 ensayos diferentes, modificando las presiones de entrada en la válvula en valores de 3 a 12 bares. El límite operativo de las válvulas también se estableció en base a la velocidad del fluido. Algunos autores (Ulanicki y Skworcow 2014) han definido los problemas operacionales de este tipo de válvulas con caudales bajos. Por esta razón, las pruebas se limitaron a una velocidad mínima de 1m/s, ya que los valores más bajos comenzaron a generar inestabilidades. También la velocidad máxima se fijó en 5m/s, ya que valores más altos podían generar cavitación que distorsionaba tanto las pruebas como las conclusiones que se podían obtener de ellas.

Con este procedimiento de ensayo, se obtuvo el comportamiento de los seis modelos de válvulas seleccionadas. Los datos brutos del comportamiento de la válvula 2 se recogen en la figura 4. Como puede verse, la relación de reducción de presión se recoge en el eje Y, y la velocidad del fluido se representa en el eje X. Se han obtenido las diferentes series de datos para los diferentes valores de la presión de entrada.

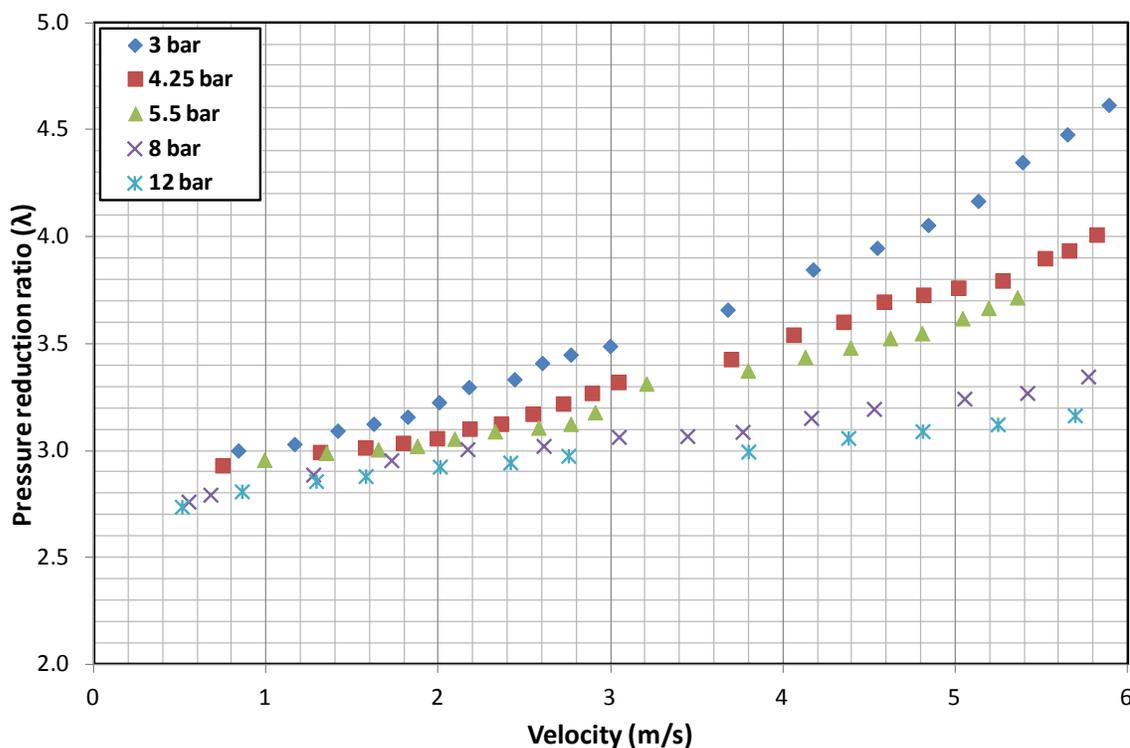


Figura 4. Resultados extraídos de las pruebas de la válvula 2

Una vez procesados y filtrados los datos, es posible determinar el comportamiento promedio de un modelo de válvula en las condiciones de prueba definidas. El análisis de todos los modelos permite extraer varias conclusiones claras. En primer lugar, la relación de reducción de presión λ no se mantiene constante en ninguna situación. Cualquier cambio en la presión de entrada o en la velocidad modifica el valor de λ . Sólo cuando las presiones de entrada son altas (Figura 5), la relación permanece constante, fundamentalmente para velocidades bajas. Por el contrario, para presiones de entrada moderadas (por debajo de 6-8 bares) son importantes las variaciones en las reducciones de presión.

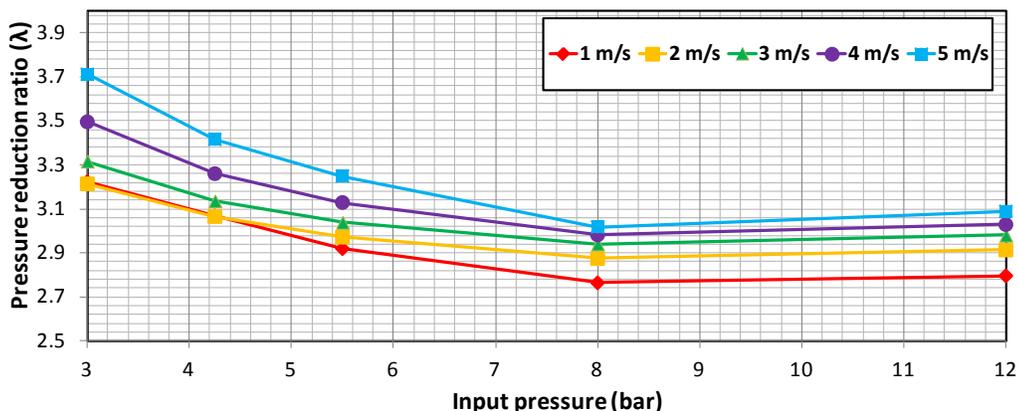


Figura 5. Comportamiento medio de la válvula 1. Influencia de la presión de entrada

Por otra parte, también se detecta cierta influencia del flujo o velocidad sobre el funcionamiento de las VRPPs (Figura 6). Es decir, cuanto mayor sea la velocidad del agua, mayor será el valor de la relación de reducción.

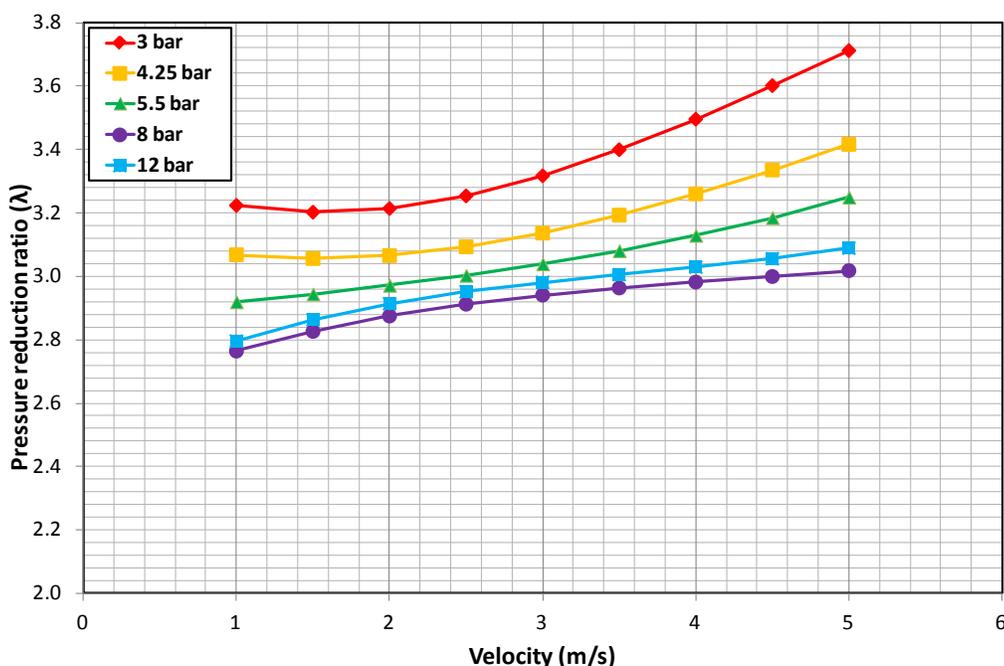


Figura 6. Comportamiento medio de la válvula 1. Influencia de la velocidad del fluido

Estas dos conclusiones, sin duda, contradicen los enfoques definidos en el modelo representado por la expresión (4). Por lo tanto, se desarrollará un modelo alternativo para justificar los comportamientos descritos en la Figura 5 y en la Figura 6.

MODELO VRPP PROPUESTO

Después de analizar la variación de la relación de reducción de presión λ , es necesario encontrar un modelo que justifique tanto la variación con el caudal como la variación con la presión de entrada. Para este propósito, se utilizan las presiones definidas en la figura 2 como punto de partida. En esta figura, las presiones que actúan sobre el asiento de válvula son las presiones p_1 y p_2 que existen aguas arriba y aguas abajo de la válvula. Sin embargo, dependiendo de la configuración de la válvula, estas presiones pueden ser ligeramente diferentes.

Por lo tanto, se propone un nuevo modelo considerando esta diferencia. Es decir, las presiones que actúan sobre el asiento no son exactamente las que existen en los extremos de la válvula. En definitiva, es necesario definir dos nuevas presiones: las presiones sobre el frente y el respaldo del asiento. Estas presiones son las definidas como p_{1o} y p_{2o} en la figura 7.

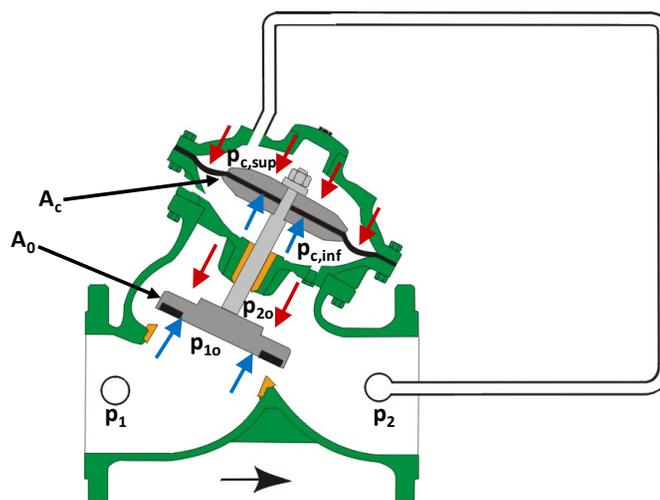


Figura 7. Nueva definición de presiones para el balance de fuerzas en una VRPP

Pero la definición de estas nuevas presiones tiene otras implicaciones en el comportamiento de la válvula. La primera es que la ecuación (2) o (3) que define el equilibrio de la válvula son ahora diferentes. En estas ecuaciones debe utilizarse la presión p_{1o} y p_{2o} en lugar de las presiones p_1 y p_2 . Por otra parte, hasta ahora se ha considerado que la pérdida de carga total en la válvula viene dada por la expresión:

$$p_1 - p_2 = R_v(\theta) \cdot Q^2 \quad (5)$$

Donde R_v es la resistencia de la válvula para una cierta abertura θ . Es decir, todas las pérdidas están representadas por un solo coeficiente de resistencia R_v .

Sin embargo, con la definición de las presiones de la Figura 7, esta resistencia se puede descomponer en tres partes claramente diferenciadas. La primera representaría las pérdidas en la sección entre la entrada de la válvula y la cara frontal del asiento de la válvula. La segunda representaría las pérdidas en el obturador de la válvula y la tercera serían las pérdidas entre la parte posterior del asiento de la válvula y la salida. Por lo tanto, se definen tres nuevos coeficientes de resistencia para cada sección.

$$R_{v,1} = \frac{p_1 - p_{1o}}{Q^2} \quad (6)$$

$$R_{v,2} = \frac{p_{2o} - p_2}{Q^2} \quad (7)$$

$$R_s(\theta) = \frac{p_{1o} - p_{2o}}{Q^2} \quad (8)$$

Lógicamente, la suma de estas tres nuevas resistencias ($R_{v,1}$, $R_{v,2}$ y R_s) es la resistencia total de la válvula R_v definida en (5). Sin embargo, hay una ligera diferencia entre estas resistencias. Mientras que $R_{v,1}$ y $R_{v,2}$ son valores constantes para un mismo caudal, la resistencia relacionada con el obturador R_s varía significativamente con el grado de apertura θ de la válvula. Es decir, una parte de la resistencia de la válvula puede considerarse constante y otra parte es variable. Las pérdidas de carga son constantes en las partes de la válvula sin elementos que se desplacen. Por el contrario, el asiento en movimiento genera una pérdida de carga variable con su posición.

El modelo de equilibrio basado en la ecuación (2) debe ahora ser escrito en términos de las nuevas presiones definidas.

$$p_{1o}A_0 + \rho \frac{Q^2}{A_0} = p_{2o}A_0 + p_2A_c \quad (9)$$

Para clarificar la formulación del modelo, se definen dos nuevos parámetros adimensionales. El primero es la relación entre las superficies que dieron lugar a la ecuación (4). Es decir, esta relación (σ) entre las secciones A_0 y A_c se expresa como

$$\sigma = \frac{A_0 + A_c}{A_0} = 1 + \frac{A_c}{A_0} \quad (10)$$

El segundo parámetro representa una propiedad característica de cada modelo de válvula. Es la relación entre la resistencia introducida por el asiento y la resistencia total de la válvula. En otras palabras, qué porcentaje de las pérdidas totales de válvulas se generan localmente en el obturador de la válvula. Esta relación varía con la posición del tapón de la válvula, pero puede determinarse fácilmente a partir de las pruebas de caracterización hidráulica de la válvula descrita anteriormente.

$$\delta(\theta) = \frac{R_s(\theta)}{R_v} \quad (11)$$

Este parámetro δ puede obtenerse fácilmente a partir de las pruebas experimentales. Sólo es necesario conocer la resistencia de la válvula $R_v(\theta)$ para cada grado de apertura θ . También se requiere considerar que la resistencia R_s del tapón de válvula para la válvula completamente abierta es cero. Con esta hipótesis y las pruebas realizadas previamente es posible determinar la proporción de pérdidas introducidas por el obturador. La figura 8 muestra los resultados del parámetro δ para los seis modelos ensayados. El análisis de esta figura muestra que las válvulas de asiento plano (1, 3, 4 y 5) tienen un comportamiento similar, mientras que aquellas con un dispositivo de cierre reducido para flujos bajos (2 y 6) también tienen una curva ligeramente similar.

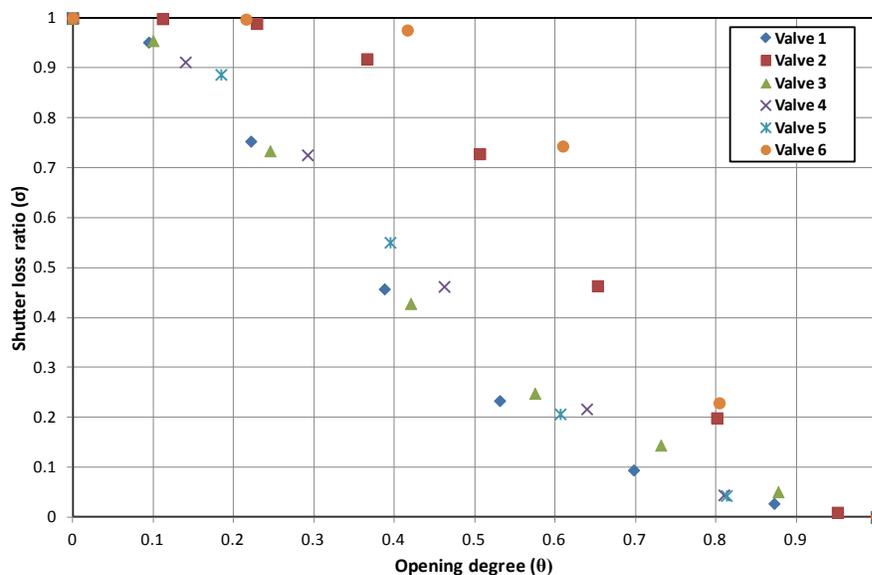


Figura 8. Valores del parámetro δ para las válvulas ensayadas.

La ecuación final que representa el comportamiento de la válvula se obtiene tomando la ecuación (9) y sustituyendo las definiciones de p_{1o} y p_{2o} obtenidas de (6) y (7).

$$p_1 = \sigma \cdot p_2 + (1 - \delta)(p_1 - p_2) - \rho \frac{Q^2}{A_0} \quad (12)$$

El análisis de los datos experimentales ha demostrado que el efecto del momento generado por el chorro de agua en el vástago de la válvula es insignificante con respecto al resto de las fuerzas. Por lo tanto, en las ecuaciones siguientes a la (12) este término se ha despreciado. Con esta simplificación, la relación de reducción de presión λ puede escribirse compactamente usando los parámetros adimensionales σ y δ :

$$\lambda = 1 + \frac{\sigma - 1}{\delta} \quad (13)$$

El modelo de equilibrio de la válvula (13) mantiene el mismo término que el del modelo original definido en (4). Es el parámetro σ que depende de una relación superficial característica de cada modelo de válvula, independientemente de las condiciones de flujo. Por otra parte, si todas las pérdidas se concentraran en el obturador de la válvula, entonces el parámetro δ adoptaría el valor 1 y la ecuación resultante sería el modelo descrito en (4). Por otra parte, los valores de este parámetro inferiores a 1 justifican la variación de la relación λ , tanto con la variación de presión, como con la del caudal.

El modelo propuesto permite, no sólo representar el modelo clásico definido en la ecuación (4), sino también explicar las variaciones observadas en la relación de reducción de presión. Primero, considérese un sistema siempre operando con la misma presión de entrada. Para permitir un aumento del flujo mientras se mantiene esta presión de entrada, es necesario hacer funcionar la válvula incrementando su sección transversal. En este caso, el parámetro δ disminuye de acuerdo con los resultados de la Figura 8 y, por lo tanto, considerando la ecuación (13), la relación de reducción λ debería aumentar. Lo contrario ocurriría si el flujo disminuye. En ese caso, la válvula debe cerrarse, el parámetro δ aumenta y, en consecuencia, la relación λ disminuye. Es decir, se explica perfectamente cómo las variaciones de flujo afectan la relación de reducción de presión.

Por otro lado, considérese un sistema donde el flujo es siempre constante. Si se desea un aumento de la presión de entrada, entonces es necesario que el tapón de válvula se mueva reduciendo la sección transversal (cierre de válvula). En este caso, el parámetro δ aumenta y por lo tanto disminuye la relación de reducción de presión λ . Es decir, el modelo también explica el efecto de las variaciones de presión de entrada sobre la reducción de presión.

CONCLUSIÓN

El análisis experimental del comportamiento de las VRPPs ha permitido profundizar en el conocimiento de este tipo de elementos. Algunas de las principales conclusiones del estudio son:

- La reducción de presión en este tipo de válvulas puede considerarse constante en muchos casos. Como se ha comprobado, tanto la presión de entrada como el caudal afectan a la relación de reducción de presión λ .
- En todos los casos, cuanto mayor sea el caudal, mayor será la relación de reducción de presión. Este aumento también es mayor a medida que crece la presión de entrada. También en todos los casos, un aumento en la presión de entrada está directamente relacionado con una reducción en la relación de presión.
- Los modelos clásicos de este tipo de válvulas no permiten explicar los fenómenos analizados experimentalmente. En este sentido, el nuevo modelo propuesto explica las relaciones variables de reducción de presión. Asimismo, propone una nueva forma de caracterizar el comportamiento de estas válvulas basándose en una nueva característica de la válvula: la proporción de pérdidas generadas por el obturador. Este parámetro no sólo es fundamental para explicar el funcionamiento interno de las válvulas, sino que también ha sido extremadamente fácil de obtener a partir de pruebas hidráulicas sencillas.

Por último, cabe señalar que el análisis se ha realizado para las VRPPs, aunque el modelo propuesto es válido para cualquier tipo de válvula hidráulica. Las diferencias entre una válvula de control de flujo y otra se basan solamente en las conexiones hechas a las cámaras de la válvula. Por lo tanto, este trabajo puede ser el origen del modelado de diferentes tipos de válvulas hidráulicas automáticas.

REFERENCIAS

- Dvir Y (1997) Flow control devices. Lehavot Habastan (Israel)
- Prescott S, Ulanicki B (2008) Improved control of pressure reducing valves in water distribution. *J Hydraul Eng* 134:56–65.
- Prescott SL, Ulanicki B (2003) Dynamic modeling of pressure reducing valves. *J Hydraul Eng* 129:804–812. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:10(804)
- Ulanicki B, Picinali L, Janus T (2015) Measurements and analysis of cavitation in a pressure reducing valve during operation a case study. *Procedia Eng* 119:270–279. doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.886
- Ulanicki B, Skworcow P (2014) Why PRVs tends to oscillate at low flows. *Procedia Eng* 89:378–385. doi: 10.1016/j.proeng.2014.11.202