

La curva de consigna, una herramienta útil para la esqueletización, sectorización y determinación de la capacidad de una red de suministro de agua

Setting curve, a useful tool to skeletonization, sectorization and determination of a network water supply capacity

Amilkar Ernesto Ilaya-Ayza**^o, Joaquín Izquierdo*, Rafael Pérez-García**, Carlos Martins*, David Ayala-Cabrera***

RESUMEN

La curva de consigna es una herramienta bastante utilizada en la optimización energética de los sistemas de agua potable que trabajan por bombeo. En el presente trabajo se analizan otras aplicaciones como la esqueletización, la sectorización, la determinación de la capacidad de la red y los procesos de incremento de la demanda debido al crecimiento urbano horizontal y/o vertical. Asimismo, se estudian sus características cuando existe la presencia de fugas, cambios de la presión mínima y cambios en la rugosidad de la red. Estas propiedades y aplicaciones potenciales convierten a la curva de consigna en una herramienta muy útil para la planificación, diseño, gestión y mantenimiento de las redes de suministro de agua.

ABSTRACT

Setting curve is a tool very used for energetic optimization of pumping water supply systems. In this research we analyze other applications such as skeletonization, sectorization, determining network capacity and demand increase process, result of urban population growth in horizontal and/or vertical. We also study its characteristics caused by leaks, changes in minimum pressure and changes in roughness of network pipes. Based on these properties and potential applications, setting curve becomes a very useful tool for planning, design, management and maintenance of water supply networks.

INTRODUCCIÓN

Un concepto bastante utilizado, principalmente en el dimensionamiento de sistemas de bombeo, es la curva característica del sistema, la cual describe la relación entre el caudal en una tubería y la pérdida de carga producida por la circulación de este caudal (Bosserman, 1999).

La curva característica en una red puede variar en función de los puntos de consumo; en horas valle, algunos usuarios no requieren agua, por lo que empiezan a cerrar las tomas de agua, se produce mayor pérdida de carga para reducir el caudal; en las horas punta, se abren las tomas reduciendo las pérdidas de carga esperando obtener un mayor caudal (Martínez, Vidal & Andrés, 2009; Shammas & Wang, 2015). Nótese que la reducción del consumo requiere generar mayor pérdida de carga en la red; en estas condiciones se tendrán presiones en los puntos de consumo superiores a la presión mínima.

Si en lugar de esperar que los usuarios de la red generen la pérdida de energía a través de su consumo y la manipulación de las tomas de agua, configurando diferentes curvas características para la red (Martínez *et al.*, 2009; Shammas & Wang, 2015), se regula la altura piezométrica o presión de ingreso en la fuente de suministro, con el fin de llegar a los puntos de consumo con la presión mínima necesaria, se lograría reducir esta pérdida

Recibido: 7 de octubre de 2015
Aceptado: 7 de octubre de 2016

Palabras clave:

Curva de consigna; esqueletización; sectorización; capacidad de la red; caudal máximo teórico; índice de presión disponible.

Keywords:

Setting curve; skeletonization; sectorization; network water supply capacity; theoretical maximum flow; available pressure index.

Cómo citar:

Ilaya-Ayza, A. E., Izquierdo, J., Pérez-García, R., Martins, C., & Ayala-Cabrera, D. (2016). La curva de consigna, una herramienta útil para la esqueletización, sectorización y determinación de la capacidad de una red de suministro de agua. *Acta Universitaria*, 26(NE-3), 54-63. doi: 10.15174/au.2016.1026

* Fiulng-IMM, Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n, Edificio 5C, Valencia, España, C.P. 46022. Correos electrónicos: jizquier@upv.es; carlos.martins.a@gmail.com

** Facultad Nacional de Ingeniería, Universidad Técnica de Oruro, Ciudad Universitaria s/n, Oruro, Bolivia. Correo electrónico: amilay@upv.es

*** Irstea, UR ETBX, Dept. of Water, Bordeaux, France. Correo electrónico: david.ayala@irstea.fr

^o Autor de correspondencia.

[^] In memoriam: Rafael Pérez García

de energía. De esta forma se obtendría no una altura piezométrica o presión de consigna, sino una *curva de consigna* que asegure en cada estado de carga de la red la presión mínima estrictamente necesaria en los puntos de consumo (figura 1) (Martínez *et al.*, 2009).

Cuando una red que consume o demanda un determinado caudal (Q_{cons}) y logra valores de presión mínima (P_{min}) en los nodos más desfavorables, configura una gradiente hidráulica que define una altura piezométrica y un caudal inyectado a la red (Q_{iny}) desde la fuente de suministro, una fuente ficticia que garantizaría estas condiciones de servicio (figura 2). Si este proceso es repetido para diferentes demandas o estados de carga, manteniendo la presión mínima de servicio, con la altura piezométrica en cabecera y el caudal inyectado a la red, es posible configurar la curva de consigna (figura 3).

La curva de consigna es utilizada para regulación de sistemas de bombeo (Martínez *et al.*, 2009) y en la optimización energética de sistemas de suministro de agua (Oyarzún, 2011; Planells, Carrión, Ortega, Moreno & Tarjuelo, 2005; Planells, Tarjuelo & Ortega, 2001). Asimismo, una aproximación a la curva de consigna es la utilizada como curva de modulación del flujo o curva de consigna para válvulas reductoras de presión (PRV), en la optimización de la operación de los DMA (Prescott, Ulanicki & Shipley, 2003; Ulanicki, AbdelMeguid, Bounds & Patel, 2008; Wright, Abraham, Parpas & Stoianov, 2015). Ilaya-Ayza, Campbell, Pérez-García & Izquierdo (2016) proponen la ampliación de una red con base el uso de la curva de consigna.

En este artículo, con base en el caso de estudio 1, se analizan las propiedades de la curva de consigna relacionadas con la reducción de la presión mínima, la presencia de fugas en la red y la influencia del crecimiento de la demanda debida al incremento de la población, también se plantea la medición de la capacidad de la red a través del *caudal máximo teórico*. Asimismo, en el caso de estudio 2 se propone un procedimiento para la esqueletización de la red; y con el caso de estudio 3 se plantea el uso del *índice de presión disponible* como herramienta para la selección de los nudos que permitirán la alimentación de un sector.

METODOLOGÍA

A continuación, se describen las herramientas utilizadas para el análisis de las propiedades de la curva de consigna y el planteamiento de aplicaciones potenciales.

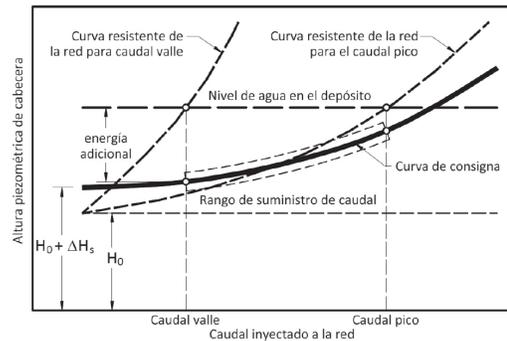


Figura 1. Representación de las curvas resistentes de la red y la curva de consigna. Fuente: Elaboración propia.

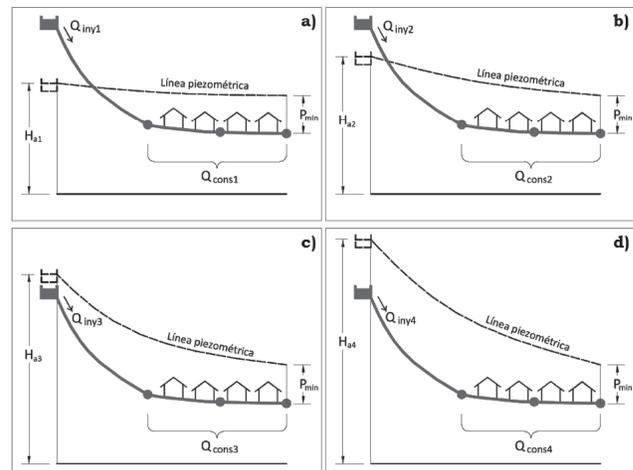


Figura 2. Cálculo de la altura piezométrica en cabecera y el caudal inyectado para diferentes estados de carga. $Q_{cons1} < Q_{cons2} < Q_{cons3} < Q_{cons4}$. Fuente: Elaboración propia.

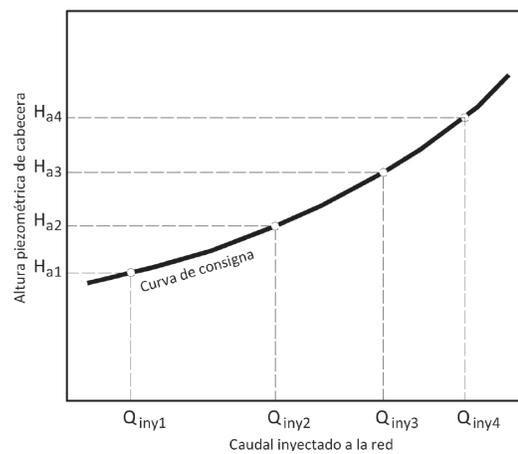


Figura 3. Curva de consigna. Fuente: Elaboración propia.

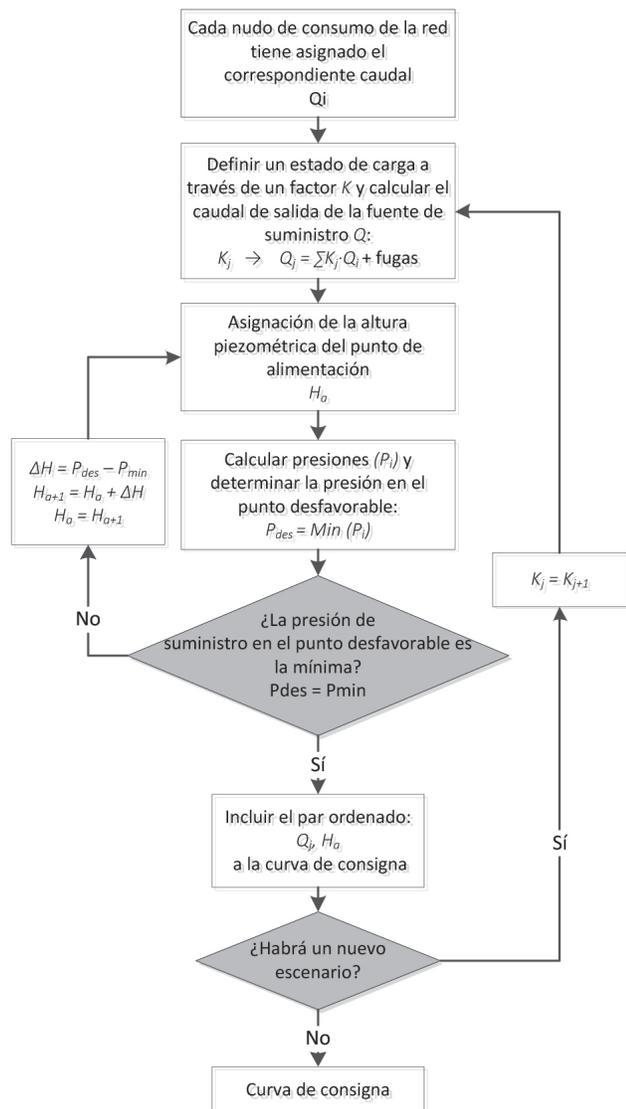


Figura 4. Diagrama de flujo para la determinación de la curva de consigna. Fuente: Elaboración propia.

Curva de consigna

El cálculo de la curva de consigna requiere de un modelo matemático fiable de la red, con el cual es posible evaluar la altura piezométrica en la fuente de suministro que permitirá satisfacer la demanda de la red con una presión de servicio mínima. El seguimiento de la curva de consigna asegura un ahorro energético en el suministro; asimismo, minimiza las fluctuaciones de las presiones en la red, reduciendo las implicancias negativas de estas variaciones en la vida útil de la red (Martínez *et al.*, 2009).

La curva de consigna se calcula bajo un análisis dependiente de la demanda DDA (*Demand Driven Analysis*). Por otra parte, depende del grado de demanda entre los nudos de consumo, por lo que podría existir más de un nudo crítico en función del estado de carga que se analice. Su uso se dificulta cuando se tienen sectores con patrones de consumo diferenciados. A pesar de este tipo de inconvenientes, sigue siendo una herramienta muy útil, principalmente para el análisis energético de la red.

En el diagrama de flujo expuesto en la figura 4 se resumen los pasos seguidos para la determinación de la curva de consigna cuando se tiene solo un punto de alimentación. Una vez que se cuenta con el modelo matemático de la red, es necesario establecer la presión mínima de servicio en los nudos (P_{min}), pues este valor definirá el grado de servicio que se quiere alcanzar; posteriormente, se deberán generar escenarios con un determinado estado de carga, el cual requerirá de una altura piezométrica en la cabecera (H_a) que garantice la presión mínima en el nudo más desfavorable, esta altura es calculada por un proceso iterativo; finalmente, cada uno de los pares ordenados (caudal inyectado ($K_j \cdot Q$), altura piezométrica de cabecera (H_a)) configura un punto en la curva de consigna.

Curva de consigna con más de una fuente de suministro

Cuando se cuenta con más de un punto de suministro o alimentación (figura 5), se debe definir una curva de consigna propia para cada punto de inyección. Para este fin, se deben fijar los niveles de aporte deseados en cada uno de los puntos de suministro (Martínez *et al.*, 2009), pueden usarse porcentajes que deben ajustarse en el cálculo de cada uno de los estados de carga.

Debe fijarse la cota piezométrica de una de las fuentes de suministro; la otra fuente debe ser definida como un nudo que inyecta un caudal conocido a la red, un porcentaje de consumo fijo; de esta forma se asegura que el porcentaje restante sea inyectado por la primera fuente. Al configurar la segunda fuente como un nudo en el cual se inyecta agua a la red, es posible calcular su altura piezométrica. Bajo estas condiciones, se pueden calcular las cotas piezométricas de cada una de las fuentes de suministro y la presión mínima en la red, la cual debe ser igual a la presión mínima de referencia; el ajuste de las cotas piezométricas en las fuentes se realiza con la adición de la diferencia entre la presión mínima calculada y la presión mínima de referencia (Martínez *et al.*, 2009). Al igual que en

las curvas de consigna para una sola fuente de suministro, se deben construir las curvas de consigna con las alturas piezométricas en cada fuente y los caudales inyectados respectivos.

Caudal máximo teórico

La curva de consigna también puede ser utilizada para establecer la capacidad de la red o caudal máximo teórico (Q_{max}), para un nivel de servicio determinado; es decir, asegurando una presión mínima en el nudo más desfavorable (P_{min}) se podrá configurar la curva de consigna (H) que garantice esta presión; como se conoce la curva motriz de la fuente de suministro (H_s), ya sea el nivel de agua en un depósito o la curva de bombeo, la intersección de ambas curvas permitirá establecer dicha capacidad. La figura 6 ilustra la determinación del caudal máximo teórico cuando el sistema presenta un depósito que alimenta a la red.

La modificación en el factor de demanda (k_i) en el modelo, para un determinado estado de carga (j), permite que los caudales demandados (Q_i) en los nudos (i) adopten nuevos valores. En consecuencia, el comportamiento hidráulico de la red responde a este nuevo estado de carga, para el cual se calcula la altura piezométrica de cabecera (H_j) y la altura piezométrica del punto de suministro (H_{s_j}).

$$k_j \rightarrow Q_j = k_j \cdot Q = \sum k_j \cdot Q_i \rightarrow H_j, H_{s_j}. \quad (1)$$

El cálculo de la altura piezométrica en cabecera es resultado de adoptar un estado de carga en los nudos de consumo, por lo que se parte de un caudal conocido. Realizar el cálculo inverso, es decir, calcular el caudal a partir de la altura piezométrica es una tarea más complicada, por lo que se recurre a un proceso iterativo cuyo objetivo es encontrar el caudal máximo teórico.

La curva motriz de suministro (H_s) estará definida por la recta que define el nivel de agua mínimo del depósito o la curva motriz de la bomba; esta última permite generalizar el procedimiento, además implica usar una altura piezométrica de suministro no estática.

$$H_s = A - B \cdot Q_n^2. \quad (2)$$

Iterando a partir de dos puntos iniciales (Q_{n-1} , H_{n-1} y Q_n , H_n), es posible determinar la intersección de ambas curvas, obteniéndose de esta forma el caudal máximo teórico. Como se busca que la altura en la curva de consigna coincida con la curva de suministro (H_s), entonces se usará:

$$Q_{n+1} = \left(\frac{Q_n - Q_{n-1}}{H_n - H_{n-1}} \right) \left(\frac{H_{s_n} + H_{s_{n-1}} - H_n}{2} \right) + Q_n. \quad (3)$$

Este nuevo caudal (Q_{n+1}), con el caudal medio inyectado a la red (Q), son utilizados para el cálculo del nuevo factor de demanda (k_{n+1}), de este modo se define un nuevo estado de carga, que establece a su vez los caudales en los nudos ($k_{n+1} \cdot Q_i$) y los nuevos valores de altura piezométrica en cabecera (H_{n+1}) y en la fuente de suministro ($H_{s_{n+1}}$).

$$k_{n+1} = \frac{Q_{n+1}}{Q} \rightarrow Q_{n+1} = \sum k_{n+1} \cdot Q_i \rightarrow H_{n+1}, H_{s_{n+1}}. \quad (4)$$

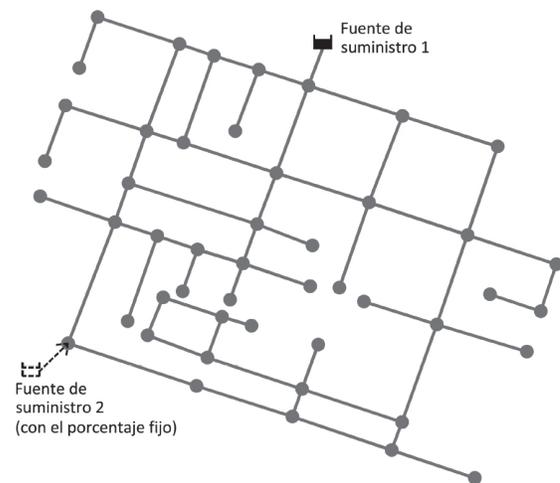


Figura 5. Red con dos puntos de inyección o fuentes de suministro. Fuente: Elaboración propia.

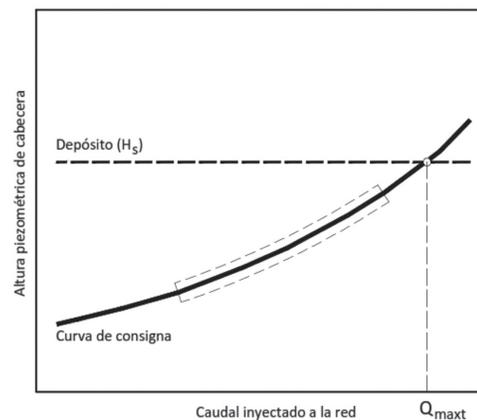


Figura 6. Caudal máximo teórico para una red alimentada por un depósito. Fuente: Elaboración propia.

El factor de demanda se va modificando hasta que las alturas piezométricas en cabecera y de suministro sean iguales. El diagrama de flujo para calcular el caudal máximo teórico es mostrado en la figura 7.

Caudal máximo teórico con más de una fuente de suministro

Al igual que en las redes con una sola fuente de suministro, en una red con varias fuentes es posible obtener el caudal máximo teórico que es capaz de suministrar cada uno de los puntos de inyección. El caudal máximo teórico de toda la red es el resultado de la suma de los caudales máximos teóricos calculados en cada fuente de suministro (figura 8).

$$Q_{maxt} = \sum_{s=1}^{ts} Q_{maxt, s'} \quad (5)$$

donde:

$Q_{maxt, s}$ = caudal máximo teórico de la fuente de suministro s .

ts = número total de fuentes de suministro.

Índice de disponibilidad de presión

La versatilidad de la curva de consigna para mejorar la gestión del sistema puede ser aprovechada para lograr una mejor sectorización. Uno de los problemas en este proceso es la selección del mejor punto de ingreso al sector. Para medir las posibilidades potenciales de cada nudo candidato a la alimentación del sector, se propone el índice de disponibilidad de presión (i_p):

$$i_p = \frac{H_i}{H_a} \quad (6)$$

Este índice depende de la altura piezométrica (H_i) en el nudo i que alimenta al sector y la altura piezométrica de cabecera requerida en el nudo i (H_a), valor definido en la curva de consigna; esta última altura garantiza la presión mínima en el nudo más desfavorable con base en la demanda del conjunto de nudos o sector.

Los valores de i_p menores a 1 indican que el sector no puede ser suministrado por el nudo, pues este ingreso no permite cumplir con el caudal ni con las presiones establecidas como mínimas. Asimismo, cuando el índice adopta el valor de 1, se tiene el caudal máximo teórico del sector alimentado desde el nudo

de referencia. En todo caso, el mejor nudo de ingreso a la red será el que mayor índice i_p logre a un determinado caudal o en su caso el que logre el mayor caudal.

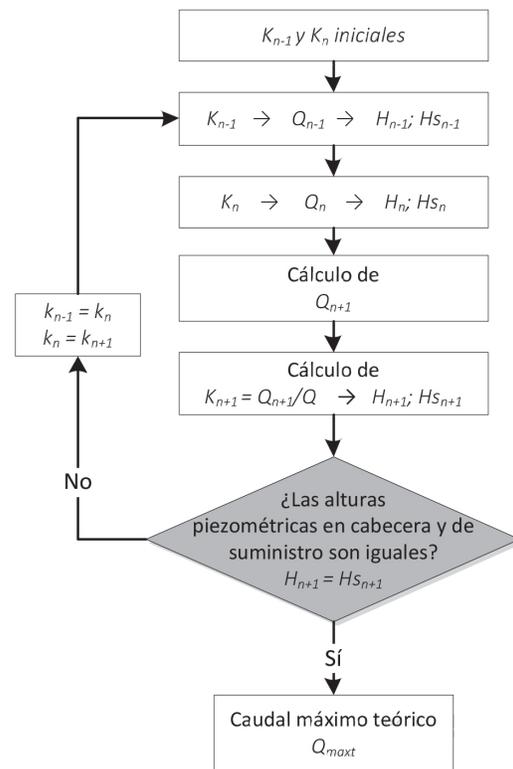


Figura 7. Diagrama de flujo para la determinación del caudal máximo teórico de la red.

Fuente: Elaboración propia.

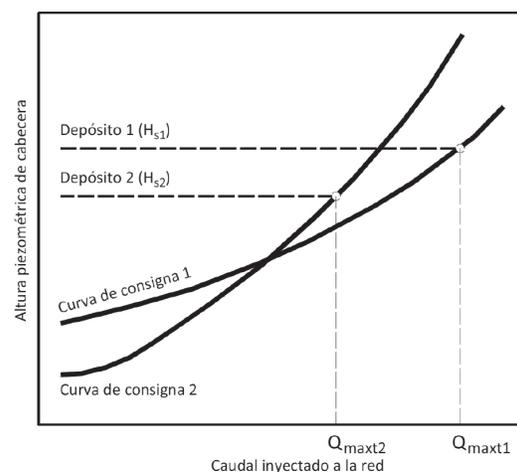


Figura 8. Curvas de consigna y caudal máximo teórico de cada fuente de suministro.

Fuente: Elaboración propia.

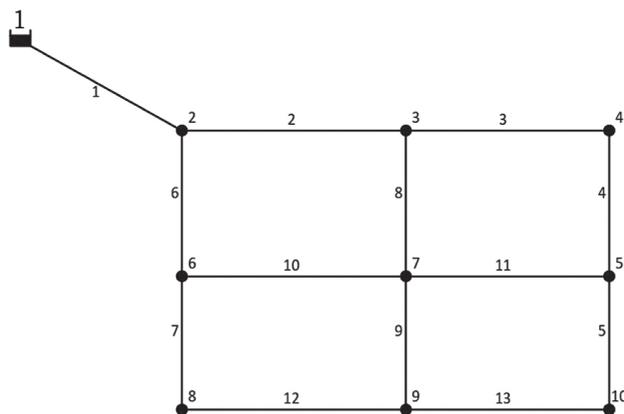


Figura 9. Red modelo caso de estudio 1.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1.
Características de los nudos de la red, caso de estudio 1.

Nudo	Cota (m)	Demanda (l/s)
1	80	-
2	15	25
3	15	32
4	8	30
5	0	25
6	10	25
7	5	25
8	7	21.5
9	3	22.5
10	0	20

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.
Características de las tuberías de la red, caso de estudio 1.

Tubería	Longitud (m)	Diámetro (mm)
1	432	300
2	220	300
3	250	200
4	210	200
5	189	150
6	203	200
7	188	200
8	205	200
9	195	150
10	300	250
11	320	250
12	201	200
13	200	150

Fuente: Elaboración propia.

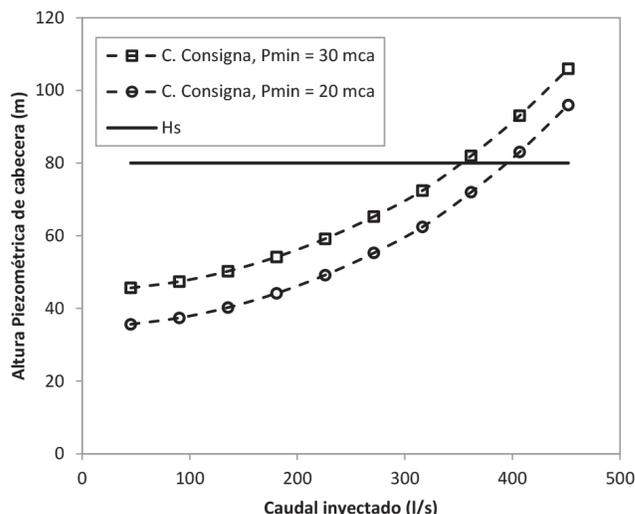


Figura 10. Curvas de consigna para diferentes valores de presión mínima de servicio.
Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caso de estudio 1: características de la curva de consigna

En esta primera parte se analizan las características de la curva de consigna basándose en el estudio de una red modelo (figura 9), en la cual todas las tuberías tienen una rugosidad de $\epsilon = 0.10$ mm, las características de los nudos y las tuberías se muestran en las tablas 1 y 2, respectivamente. Con esta red se analiza lo que sucede con la reducción de la presión mínima, la presencia de fugas y el incremento de caudal de demanda en los nudos 7 y 10.

a) Variación de la presión mínima en la curva de consigna

La presión mínima de servicio es uno de los elementos que define la curva de consigna, las variaciones de esta condicionan el nuevo trazado de la curva de consigna. Cuando los valores de la presión mínima se reducen, disminuyen los valores de la altura piezométrica de cabecera (figura 10), la curva de consigna se mueve en paralelo a menos de que el nudo más desfavorable cambie. Asimismo, el caudal máximo teórico se modifica.

La red actual demanda un caudal medio de 226 l/s. Usando $H_s = 80$ m, con $P_{min} = 30$ mca la red es capaz de transportar y distribuir un $Q_{maxT} = 351$ l/s; y con

$P_{min} = 20$ mca, con el mismo H_s la capacidad de la red se amplía a $Q_{max} = 393$ l/s. En consecuencia, la reducción de la presión mínima de servicio permite ampliar la capacidad de la red. Analizando desde otro punto de vista, cuando la red es exigida con demandas mayores, debido al crecimiento vertical u horizontal de las poblaciones, se produce una reducción de las presiones mínimas de servicio.

b) La presencia de fugas en la red y su relación con la curva de consigna

El modelo y el cálculo elaborados en *Epanet 2.0* (Rossman, 2000) permiten incluir emisores en los nodos que simulan la acción de las fugas en la red. De esta manera, adoptando diferentes valores del exponente de fugas α se configuran varias curvas de consigna con una presión mínima constante de $P_{min} = 20$ mca.

La presencia de fugas en los nodos modifica el caudal inyectado a la red, pues en estas condiciones la red debe cubrir el caudal demandado por los nodos y los caudales de fugas, que son dependientes de la presión. Los caudales de fuga hacen que los puntos que configuran la curva de consigna tiendan a moverse hacia la derecha, incrementando el caudal y requiriendo mayor presión en la fuente de suministro. Comparando las diferentes curvas de consigna de la red, tanto cuando esta se encuentra sin fugas y con la presencia de estas, se observa que la posición de las curvas de consigna que incluyen las fugas se superpongan a la curva de consigna sin fugas (figura 11).

Con base en los valores encontrados, graficando los caudales demandados y caudales suministrados, para los diferentes exponentes de fugas, se observan rectas que tienen la misma pendiente (figura 12). Esta situación implica que si una red trabaja ajustándose estrictamente a la curva de consigna, asumiendo α constante para toda la red, se tiene un caudal total de fugas teórico constante, independiente del caudal demandado.

c) El incremento del caudal demandado y su influencia en la curva de consigna

El crecimiento de las ciudades se produce horizontal y/o verticalmente, como resultado de la construcción de nuevas viviendas (Neelakantan, Rammurthy, Smith & Suribabu, 2014). Esta situación incrementa la demanda en diferentes ubicaciones en la red; el crecimiento vertical incrementará la demanda en los nodos existentes y el crecimiento vertical puede modelarse con el incremento de caudal en los nodos extremos de la red.

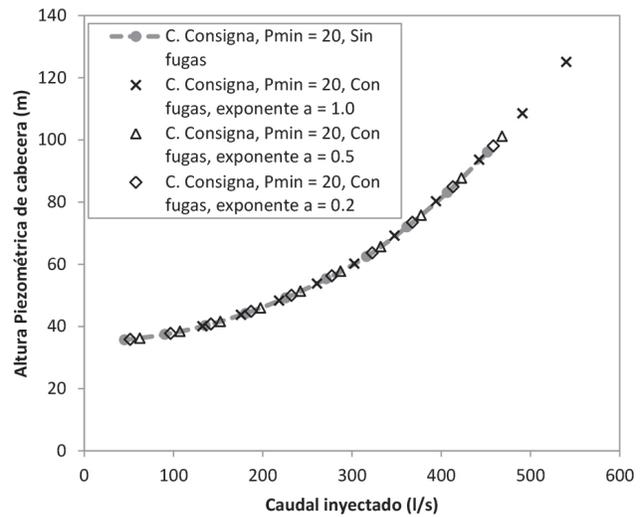


Figura 11. Curvas de consigna para diferentes valores de exponente de fugas. Fuente: Elaboración propia.

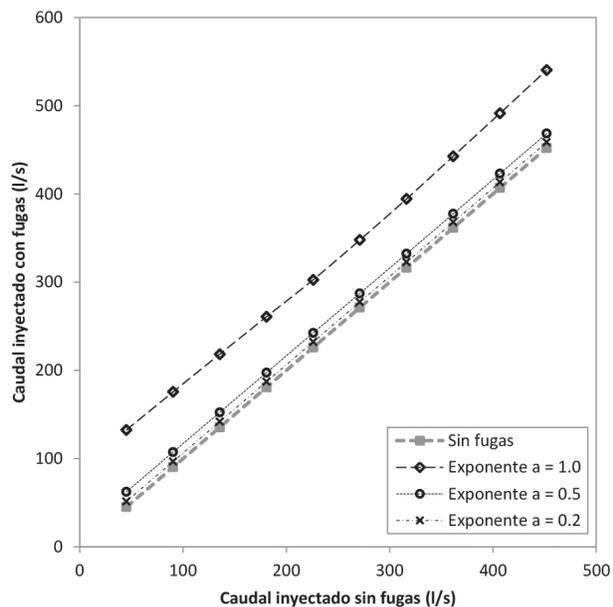


Figura 12. Relación entre el caudal inyectado sin fugas y el caudal inyectado con fugas. Fuente: Elaboración propia.

Con el fin de evaluar ambos tipos de crecimiento, se realiza el incremento del caudal en dos nodos. Se incrementa el caudal en el nudo 7, nudo central de la red que representa al crecimiento vertical de la ciudad, con una demanda media adicional de 50 l/s y

75 l/s; y se incrementa caudal en el nudo 10 con los mismos valores, esta adición de caudales representa al crecimiento horizontal.

Como se observa en la figura 13, el incremento de caudal en el nudo central (nudo 7) genera una curva de consigna que se superpone a la curva de consigna original de la red; mientras que la curva de consigna calculada con base en el incremento de la demanda del nudo 10 (nudo extremo) ya no se ajusta a la curva de consigna de la red. Se evidencia una mayor influencia del incremento del caudal en los puntos extremos, crecimiento horizontal de la ciudad, donde los diámetros son menores; en consecuencia, se tiene mayor pérdida de carga, también porque un caudal grande debe recorrer mayor longitud de tubería; el crecimiento vertical puede ser llevadero hasta cierto nivel. Debe tomarse en cuenta también que el incremento de caudal de demanda en el nudo 10 reduce la capacidad de la red.

Caso de estudio 2: esqueletización en base a la curva de consigna

La curva de consigna también puede ser útil para procesos de esqueletización de redes de suministro de agua (Oyarzún, 2011). En la construcción de un modelo de red se deben elegir las tuberías que se incluirán al mismo, al proceso de representar a las tuberías seleccionadas de un modelo se llama esqueletización (Rossman, 1999) (figura 14).

Con base en la red del caso de estudio 1, se van eliminando aquellos tramos que pueden resultar redundantes, tratando de que la red resultante sea representativa del modelo completo. En este caso, se busca mantener la malla o circuito perimetral, por lo que se van quitando las tuberías internas. En cada uno de los escenarios se evalúa la nueva curva de consigna y la capacidad de la red.

En la figura 15 se observa que tras eliminar la tubería 10 la curva de consigna de la red se mantiene sobre la original y la capacidad de la red se mantiene; después, la modificación es pequeña cuando se elimina la tubería 11, por lo que la red de suministro trabajaría casi igual sin ambas tuberías, estableciendo que estas tuberías son redundantes en la red. Cuando se elimina la tubería 8, la curva de consigna se modifica bastante, reduciéndose drásticamente la capacidad de la red, por lo que esta tubería es un elemento principal de la red y no resulta adecuado eliminarla.

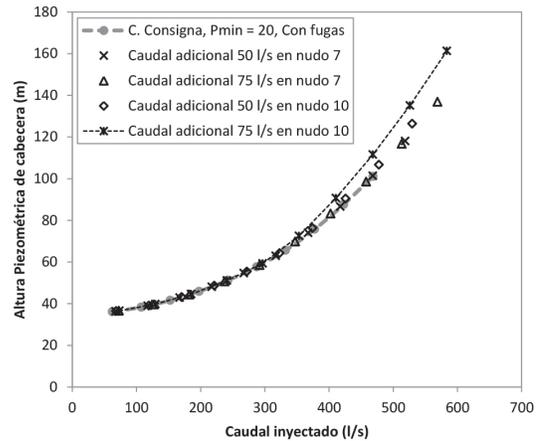


Figura 13. Curvas de consigna con caudales adicionales en el nudo 7. Fuente: Elaboración propia.

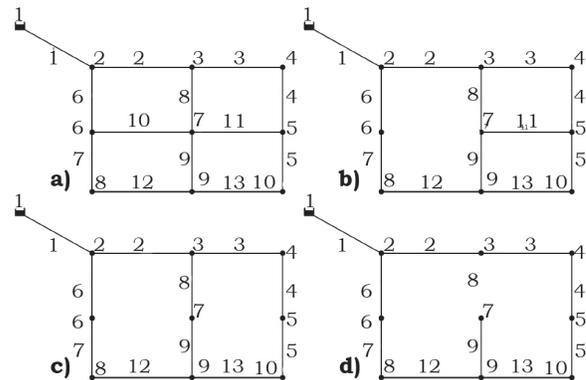


Figura 14. Red modelo para la esqueletización, a) red con todas las tuberías, b) red sin la tubería 10, c) red sin las tuberías 10 y 11, d) red sin las tuberías 10, 11 y 8. Fuente: Elaboración propia.

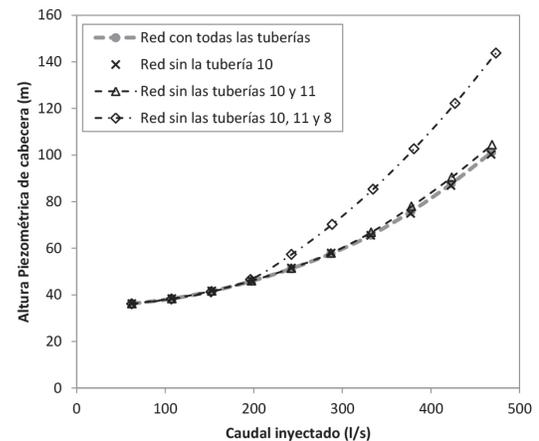


Figura 15. Curvas de consigna tras eliminar tuberías de la red. Fuente: Elaboración propia.

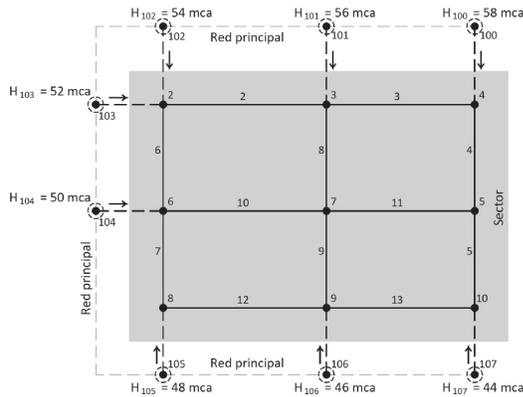


Figura 16. Sector modelo que debe ser alimentado por un nudo.
Fuente: Elaboración propia.

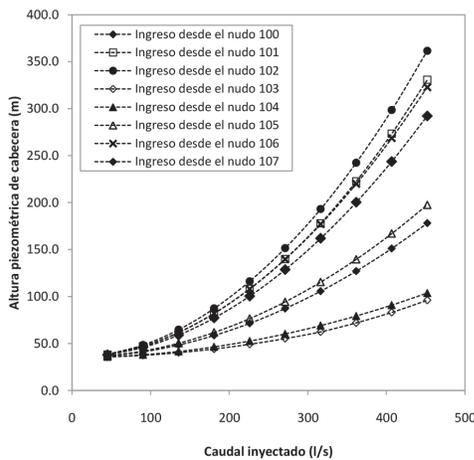


Figura 17. Curvas de consigna para cada ingreso al sector.
Fuente: Elaboración propia.

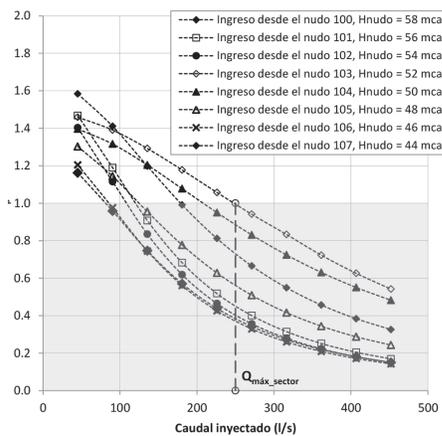


Figura 18. Índice de presión disponible de cada nudo de ingreso.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.
Características de las tuberías de ingreso al sector.

Ingreso desde	Longitud (m)	Diámetro (mm)
100	360	250
101	320	200
102	350	200
103	432	300
104	500	300
105	400	250
106	260	200

Fuente: Elaboración propia.

Caso de estudio 3: sectorización en base a la curva de consigna

Este caso de estudio plantea la posibilidad de aislar un sector (figura 16) (misma red usada en el caso de estudio 1) y se quiere conocer aquella tubería y nudo que debe alimentarlo (tabla 3). Para este fin se analiza la curva de consigna producida por cada uno de los ingresos y se compara con el valor de la presión disponible en el nudo de alimentación; posteriormente, se usa el índice de presión disponible.

Las curvas de consigna calculadas para cada uno de los ingresos (figura 17) muestran que el sector trabajará mejor cuando el agua ingrese desde el nudo 103, porque es el que tiene menor necesidad de producción energética en la cabecera, lo cual puede ser beneficioso para futuras ampliaciones del sector; por el contrario, el ingreso desde el nudo 102 exige mayor altura piezométrica en la cabecera. Este análisis no es suficiente para la selección del nudo que alimentará al sector, pues las presiones disponibles en la red son diferentes y deben ser tomadas en cuenta, por lo que se usa el índice de presión disponible (i_p).

Con base en el uso del indicador de presión disponible, se observa que con caudales pequeños se puede trabajar inyectando caudal desde el nudo 100, pero cuando el sector empieza a demandar mayor caudal no es recomendable; finalmente se consolida con mejores valores el nudo 103. Este nudo define una capacidad máxima del sector de 250 l/s (figura 18). El ingreso por los otros nudos reduce la capacidad del sector.

Si el sector requiere tener mayor capacidad, si esta no es alcanzada por un solo punto de alimentación, debe elegirse adicionalmente el nudo siguiente en tener el mayor valor del índice de disponibilidad de presión, en este caso el ingreso desde el nudo 104.

CONCLUSIONES

Dependiendo de la configuración de la red, la reducción de la presión mínima en los nudos crea curvas de consigna paralelas, a una distancia igual a la diferencia de presiones mínimas. Además, el caudal máximo teórico cambia en función de la presión mínima adoptada: cuando la presión mínima se reduce, entonces la capacidad de la red se incrementa. Esta situación exige a que el cálculo y el valor del caudal máximo teórico deban ir acompañados de la presión mínima utilizada.

A niveles bajos y uniformes de fugas, las curvas de consigna con fugas se superponen a la curvas de consigna calculada sin fugas. Esta propiedad puede resultar útil cuando se requiere determinar la capacidad de una red en la cual se dificulta incluir en el modelo la presencia de fugas.

Asimismo, independientemente del caudal suministrado, cuando una red trabaja estrictamente ajustada a la curva de consigna, se puede lograr un nivel de fuga constante, considerando un exponente de fugas constante.

Por otra parte, se evidenció que la curva de consigna permite evaluar los efectos del incremento de la demanda causado por el crecimiento de la población. Esta herramienta permitirá a las empresas de agua prever futuros descensos en el nivel de servicio. En nuestro caso de estudio, la red soporta mejor el crecimiento urbano vertical en zonas centrales que el crecimiento horizontal en los extremos.

En lo que respecta al proceso de esqueletización, con la curva de consigna y el caudal máximo teórico es posible evaluar la importancia de cada tubería de la red y su implicancia en la reducción de la capacidad de la red, de esta forma se pueden encontrar los tramos principales y establecer un proceso de esqueletización que favorezca representar mejor al modelo completo.

El índice de presión disponible resulta de mucha utilidad en procesos de sectorización, en la selección de los nudos y tuberías que deben alimentar a los sectores de la red. La posibilidad de generar curvas que representen la evolución de este índice con relación al caudal inyectado a la red permite tener una visión global para la toma de decisiones.

El caudal máximo teórico propuesto otorga una dimensión cuantitativa a la capacidad de la red, lo cual

la convierte en una herramienta muy útil para una mejor planificación, gestión y diseño de los sistemas de suministro de agua potable.

REFERENCIAS

- Bosserman, B. E. (1999). Pump system hydraulic design. En L. W. Mays, *Water distribution systems handbook*. McGraw-Hill Professional Publishing.
- Ilaya-Ayza, A. E., Campbell, E., Pérez-García, R., & Izquierdo, J. (2016). Network capacity assessment and increase in systems with intermittent water supply. *Water*, 8(4), 126. doi: 10.3390/w8040126
- Martínez, F., Vidal, R., & Andrés, M. (2009). La regulación de los sistemas hidráulicos. En E. Cabrera, V. Espert, J. García-Serra & F. Martínez, *Ingeniería hidráulica aplicada a los sistemas de distribución de agua* (3ª ed., vol. II). Valencia, España: ITA-UPV.
- Neelakantan, T., Rammurthy, D., Smith, S. T., & Suribabu, C. (2014). Expansion and Upgradation of Intermittent Water Supply System. *Asian Journal of Applied Sciences*, 7(6), 470-485.
- Oyarzún, S. A. (2011). *Optimización energética de las redes de abastecimiento de Murcia* (tesis de maestría). Universitat Politècnica de València: Valencia, España.
- Planells, P., Carrión, P., Ortega, J., Moreno, M., & Tarjuelo, J. (2005). Pumping Selection and Regulation for Water-Distribution Networks. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(3), 273-281.
- Planells, P., Tarjuelo, J., & Ortega, J. (2001). Optimización de estaciones de bombeo en riego a la demanda. *Ingeniería del agua*, 8(1), 39-51.
- Prescott, S. L., Ulanicki, B., & Shipley, N. (2003). Analysis of district metered area (DMA) performance. In *Advances in water supply management: Proceedings of the International Conference on Computing and Control for the Water Industry* (pp. 59-67). Taylor & Francis.
- Rossman, L. (1999). Computer models/EPANET. In *Water distribution systems handbook*. New York: McGraw-Hill Professional Publishing.
- Rossman, L. (2000). *Epanet 2 - Users Manual*. Cincinnati, USA: EPA.
- Shammas, N. K., & Wang, L. K. (2015). *Water Engineering: Hydraulics, Distribution and Treatment*. New Jersey, USA: John Wiley & Sons.
- Ulanicki, B., AbdelMeguid, H., Bounds, P., & Patel, R. (Agosto, 2008). Pressure control in district metering areas with boundary and internal pressure reducing valves. In *the 10th International Water Distribution System Analysis Conference WDSA2008* (pp. 691-703). Kruger National Park, South Africa.
- Wright, R., Abraham, E., Pappas, P., & Stoianov, I. (2015). Control of water distribution networks with dynamic DMA topology using strictly feasible sequential convex programming. *Water Resources Research*, 51(12), 9925-9941.