



MEJORA DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LA RED DE AGUA POTABLE DE LA CIUDAD DE VALENCIA MEDIANTE PURGAS PROGRAMADAS

Christiand Olortegui Artica ¹, F Javier Martínez Solano ²,
Carmen Sánchez Briones ³

^{1,2} Universitat Politècnica de València (España)

³ Global Omnium, Valencia (España)

² jmsolano@upv.es (Autor para correspondencia)

RESUMEN

El acceso al agua potable en cantidad y calidad aceptable es uno de los derechos reconocidos por la ONU y la OMS. De hecho, está explícitamente recogido en el Objetivo de Desarrollo Sostenible ODS 6, Agua Limpia y Saneamiento.

Si bien en la Unión Europea este objetivo se considera alcanzado, en algunos casos ha habido problemas relacionados con la calidad del agua. La implantación de sistema de control de fugas mediante la sectorización trae como consecuencia la aparición de ramales sin salida en los que el agua puede permanecer largo tiempo sin apenas movimiento. Los altos tiempos de residencia del agua en estas zonas favorece la desaparición del desinfectante, la formación de subproductos de la desinfección y el crecimiento de biopelícula. En estas condiciones, los ramales son más susceptible al incumplimiento en los monitoreos de calidad de agua. Aparte de los tratamientos de desinfección aplicados en las plantas, hay otras estrategias que permiten mejorar la calidad del agua potable en los puntos de consumo, las cuales se van a estudiar en el presente trabajo.

Palabras clave

Purgas, calidad de agua, modelo hidráulico, modelo de calidad

1. INTRODUCCIÓN

Las empresas que se dedican a dar el servicio de agua potable tienen que cumplir con las regulaciones de calidad. Los parámetros que regulan la calidad del agua dentro de la Unión Europea se establecieron en la Directiva 98/83/CE del Consejo Europeo. En el caso de España está regulado por el Real Decreto 140/2003 [1]. Las normas buscan garantizar la calidad del agua para el consumidor, para ello, frecuentemente, se mantiene una dosis residual del desinfectante en la red de distribución de agua; sin embargo, a medida que el agua fluye en la red, la calidad de esta se va deteriorando. Por esta razón, las zonas terminales del sistema son conocidas por su baja calidad.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Los ramales sin salida tienen altos tiempos de residencia del agua, lo que favorece a la desaparición del desinfectante, formación de subproductos de la desinfección y acumulación de biopelícula [2]. En estas condiciones, los ramales son más susceptibles al incumplimiento en los monitoreos de calidad de agua. Existen diferentes medidas para aumentar las concentraciones de los desinfectantes. Cada una con ventajas y desventajas. Los enfoques actuales mencionan la instalación de desinfectantes de refuerzo, realizar purgas manuales o automáticas, purgas con aire, cambiar el desinfectante e incrementar la demanda [3].

En Valencia, la empresa Global Omnium, se encarga de gestionar la distribución de agua potable en la ciudad. El departamento de mantenimiento interviene para solucionar los eventos de bajo cloro residual en los ramales sin salida. Las causas que provocan estos eventos son principalmente dos: los bajos consumos en los terminales de red y el cierre de las tuberías con fines de sectorización. Actualmente, la alternativa operativa es purgar del hidrante más próximo de la tubería problemática o realizar el desagüe hacia la red de alcantarillado. Con el fin de proponer una mejora de las operaciones se analizaron las alternativas para mejorar los residuos bajos del desinfectante.

Para analizar la calidad del agua se emplearon modelos hidráulicos de simulación (EPANET, [4]) y el monitoreo de la calidad del agua. Estos modelos hidráulicos y de calidad de agua son una buena herramienta para valorar las alternativas a los problemas de calidad [5]. Las alternativas a analizar se enfocaron en las estrategias de lavado, ya que, según muchos investigadores, las buenas prácticas de lavado pueden recuperar o mantener los residuos de desinfectante al extraer agua estancada y sustituirla por agua fresca, por medio de los hidrantes [6]. El objetivo principal de este trabajo es la revisión de las alternativas de operación para mejorar los residuos de desinfectante. Para ello, se han de alcanzar algunos objetivos específicos:

- Realizar un modelo matemático y de calidad de la red que permite reproducir el comportamiento del cloro a lo largo del día.
- Realizar el modelo de tiempos de permanencia equivalente, ya que será este parámetro el utilizado como variable de decisión.
- Identificar y modelar los posibles puntos de purga.
- Determinar la intensidad, duración y frecuencia de las purgas de forma que se mejore la calidad hasta parámetros aceptables sin malgastar los recursos hidráulicos disponibles.

2. METODOLOGÍA

2.1 PLANTEAMIENTO GENERAL

En el caso de la ciudad de Valencia, se cuenta con un precedente en el sector Safranar. En un trabajo anterior, en este sector se ha realizado un estudio reciente para mejorar las propiedades organolépticas del agua potable. El estudio emplea un modelo de calidad para predecir el comportamiento del cloro y trihalometanos en la red. Este antecedente se utilizará como base para calibrar un modelo de calidad basado en tiempos de permanencia para el análisis de la calidad del agua.

Por otra parte, se dispone de abundante información para la confección de los modelos tanto hidráulico como de calidad del agua. En concreto, gracias al trabajo de sectorización realizado en la red, se dispone de información tanto de caudal inyectado en cada sector como

de caudales facturados. En este último caso, la implantación de sistemas de micromedición inteligente permite disponer de información con una resolución temporal horaria, lo cual permitirá discriminar la evolución de la demanda tanto a nivel diario como estacional.

Para analizar las estrategias de mejora, seguirás las siguientes etapas:

- En una primera instancia se elaborará el modelo hidráulico calibrado y posteriormente el modelo de calidad. En esta fase se abordará la problemática de la asignación de los consumos y su repercusión en el modelo de calidad.
- Luego se determinarán los puntos potenciales para mejorar la calidad mediante purgas de agua programadas incluyendo la modelación de dichas purgas. Se acepta que los posibles puntos de purga deberían ser los hidrantes presentes en el sector objeto de estudio.
- Por último, mediante optimización, se determinará dónde y cuándo provocar las purgas para garantizar una cierta calidad del agua en los nudos de consumo de la red.

Para la optimización se han planteado varias alternativas, las cuales se van a comparar en este documento y se describen a continuación.

2.2 BÚSQUEDA EXHAUSTIVA

El algoritmo de búsqueda exhaustiva (también conocido como búsqueda secuencial o fuerza bruta) es un método que itera en todas las posibles soluciones de un problema. Este algoritmo puede ser empleado para comparar resultados con algún otro método empleado para la búsqueda de la solución. Quintiliani et al. [7] emplearon este método como punto de comparación a diferentes formulaciones de optimización de gestión de válvulas para la mejora de la calidad del agua en redes de distribución. A pesar de ser un método sencillo tiene la desventaja del costo computacional requerido; a medida que el campo de soluciones se incrementa, el coste computacional se incrementará de forma exponencial. Por ello, para esta aplicación se ha planteado una estrategia de reducción del espacio de soluciones, esto es, del número de escenarios a calcular.

Se ha partido de la hipótesis de que la calidad del agua se puede gestionar con la apertura y cierre en los potenciales puntos de purga, es decir, en los hidrantes. En este sentido, el modo de operación de una purga se define como abierta o cerrada en un horizonte de simulación T (por ejemplo, 24 horas). El problema se puede discretizar en duraciones de Δt , por lo que en un día se tendrán:

$$N = 2^{\left(\frac{\Delta t}{T} \cdot n\right)} \quad (1)$$

En esta ecuación, N es el número de posibles soluciones, Δt es la duración de una apertura del hidrante, T es la duración el horizonte temporal y n es el número de hidrantes. Por ello, se ha realizado un análisis de sensibilidad para seleccionar qué hidrantes provocan mejoras significativas en la calidad de la red. Además, considerando que se espera que los problemas de calidad sucedan en las horas de menor consumo, se puede limitar el horizonte temporal a las horas de menor consumo de la red.

Durante la aplicación del método de la búsqueda exhaustiva solo se guardarán las soluciones que presenten una dominancia en dos objetivos. El primer objetivo es el tiempo de permanencia y el segundo es el volumen de purga. Una solución dominante y, por tanto,

válida es la que domina a la anterior en ambos objetivos. Con este filtrado de soluciones se construyó un frente de Pareto solo para la delimitación del campo de soluciones al problema. La finalidad de este método es entender la magnitud del problema y tener un punto de comparación con los demás métodos propuestos. En ese sentido, solo se formuló el algoritmo de fuerza bruta para la red de Safranar para mostrar las ventajas de otros métodos de optimización.

2.2 OPTIMIZACIÓN DE PURGAS INTERMITENTES MEDIANTE *SIMULATED ANNEALING* (RECOCIDO SIMULADO)

Xie et al. [6] propusieron un algoritmo de optimización para reducir el volumen de purga utilizando EPANET como simulador tanto hidráulico como de la calidad del agua. Este algoritmo se apoya en tres fases:

Fase I. Consiste en ubicar los puntos de purga más adecuados y se estima la capacidad de descarga de dichos puntos sin que ello afecte la presión mínima admisible para el sistema. En esta fase, las purgas se definen como emisores, es to es, como puntos con demandas dependientes de la presión. Esta primera fase produce soluciones no optimizadas al problema de la calidad del agua.

Fase II. Se aplican métodos basados en gradientes para reducir el espacio de soluciones. Para ello, partiendo de la solución obtenida en el paso anterior, por simplicidad se considera el caudal de purga como un caudal continuo las 24 horas del día y que se ha de ir reduciendo. Puesto que hay proporcionalidad entre los coeficientes de los emisores en EPANET y el caudal emitido por estos, se aplica la siguiente expresión:

$$Q_i^{k+1} = Q_i^k \cdot \left[1 - \frac{T_{p,max} - T_p^k}{x \cdot T_{p,max}} \right] \quad (2)$$

En esta ecuación, Q_i^{k+1} y Q_i^k son las descargas medias en las iteraciones actual ($k + 1$) y anterior (k), $T_{p,max}$ es el tiempo máximo de permanencia admisible, T_p^k es el tiempo de permanencia calculado para la iteración anterior, y x es un parámetro utilizado para controlar el salto del gradiente. Como resultado de esta segunda fase se tendrá un caudal de purga promedio que se podrá traducir en una duración de apertura de las purgas reales.

Fase III. Búsqueda intensiva de la mejor solución a través de los patrones de operación mediante el algoritmo heurístico *Simulated Annealing* (SA). Como paso previo a la aplicación del algoritmo SA se ha de realizar una matriz de sensibilidad de forma que, para cada nudo de consumo, se fijen qué hidrantes le afectan de manera significativa y cuáles no. Además, a cada hidrante se le asigna un patrón de consumos que tendrá como restricción la duración máxima de la purga calculada al finalizar la Fase II. Con estas modificaciones, se procede a la optimización utilizando como función objetivo el volumen total de purga y como restricción adicional el tiempo de permanencia máximo.

3. CASO DE ESTUDIO

Para realizar este estudio se ha seleccionado el sector de Safranar en la ciudad de Valencia. Para este sector se contaba con registros de cloro medidos en varios puntos de la red y por tanto se ha podido validar el modelo de calidad de cloro empleando los parámetros de reacción de un trabajo previo en la red. De este se ha obtenido que el coeficiente de reacción de cloro en el flujo del fluido (K) es de $0,54168 \text{ día}^{-1}$. Además, se ha medido la concentración de cloro a la entrada del sector, la cual se admitirá prácticamente constante e igual a $0,72$

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

mg/l. Con estos datos, se construyó el modelo de calidad de cloro y tiempos de permanencia que sirve de base para este estudio.

Se fijó como criterio una concentración mínima de cloro de 0,32 mg/l por lo que el tiempo máximo de permanencia en nudos de consumo no debería exceder las 36 horas:

$$c(t) = c_0 \cdot e^{-K \cdot t} \Rightarrow t = \frac{1}{K} \cdot \ln \frac{c_0}{c(t)} = \frac{1}{0,54168} \cdot \ln \left(\frac{0,72}{0,32} \right) = 1,5 \text{ días} = 36 \text{ h}$$

El sector de abastecimiento de Safranar se ubica al suroeste de Valencia en el distrito de Patraix y es abastecida por la E.T.A.P. El Realón. La red que está compuesta por una válvula hidráulica que regula la presión en la entrada, 393 tuberías, 74 acometidas, 21 hidrantes y 13 puntos de desagüe hacia el alcantarillado. De las 74 acometidos, 3 son empleadas como fuentes bebedero que además se usan para medir la concentración de cloro residual. En la Figura se observa una representación esquemática obtenida de la base de datos corporativa SIG de la empresa. En esta se observa la ubicación del punto de entrada del agua al sector. En esta figura también se han marcado los hidrantes (cuadrados rojos) que se tomarán como posibles puntos de purga de la red.

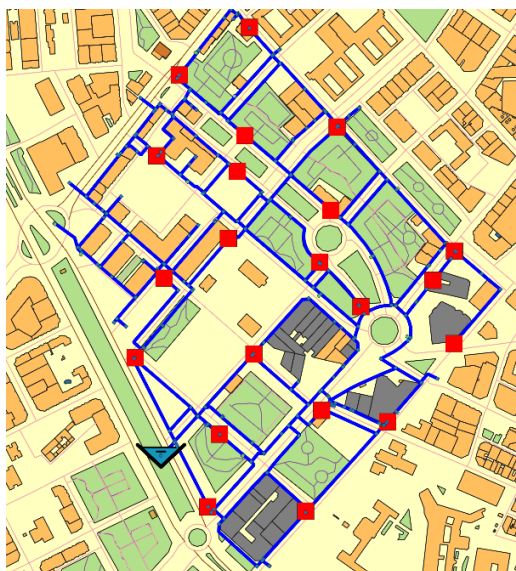


Figura 1. Esquema de la red del sector de Safranar (Valencia).

4. RESULTADOS

4.1 MODELO DE BÚSQUEDA EXHAUSTIVA

Para el caso de estudio expuesto, tras realizar el análisis de sensibilidad de los hidrantes de la red se seleccionaron 3 hidrantes de los 21 existentes ($n = 3$). Además, como consecuencia de este mismo análisis de sensibilidad se concluyó que las purgas se pueden concentrar en las 6 primeras horas del día ($T = 6 \text{ h}$) y la duración de una purga se ha fijado en 1 hora ($\Delta t = 1 \text{ h}$). Con estos parámetros, el campo de soluciones es de $N = 2^{6 \cdot 3} = 262.144$ posibilidades. Además, es posible fijar el primer punto de la frontera de Pareto cuando no hay ninguna purga (situación inicial) siendo en este caso el tiempo de permanencia máximo en los nudos de consumo de 45,97 h. A partir de ese punto se construyen las soluciones válidas. Los

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

resultados para el sector de Safranar se muestran en la Figura 2. Los resultados muestran que con los 3 hidrantes y 6 horas al día es posible reducir el tiempo máximo de permanencia hasta 35,5 h empleando para este caso un volumen mínimo de purga de 74,9 m³/día. Para el criterio de tiempo máximo de permanencia de 36 horas, este volumen se reduce hasta los 60 m³. En total se obtuvieron 95 modos de funcionamiento que mejoraban la calidad del agua. Las simulaciones para llegar hasta estos resultados se han prolongado durante una semana aproximadamente. Si se aplicase este algoritmo a todos los hidrantes y a las 24 horas del día la simulación se volvería inviable.

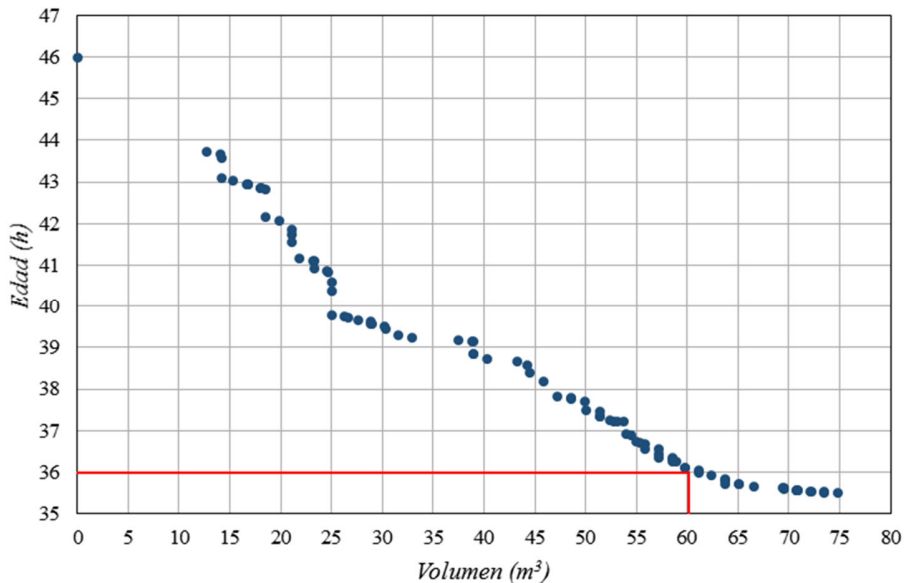


Figura 2. Frente de Pareto obtenido para Safranar utilizando 3 hidrantes como puntos de purga y un rango de apertura de 0:00 a 06:00 horas.

4.2 OPTIMIZACIÓN HEURÍSTICA MEDIANTE SA.

Para la aplicación de este método se optó de nuevo por fijar el tiempo de permanencia máximo en 39 horas. Además, durante la Fase I se observó que, debido al sobredimensionamiento de la red, apenas hay problemas de presión en la misma lo que suponen menos restricciones en la optimización. Los resultados de la fase I dejan un total de 5 hidrantes como posibles ubicaciones para las purgas, un tiempo de permanencia de 21,37 horas y un volumen diario de purga de 432 m³. La Fase II aplicó el método de reducción del volumen para ajustar mejor los volúmenes. Se mostraron distintas combinaciones para la aplicación del método del gradiente y los resultados se muestran en Figura 3. La combinación que dio mejores resultados fue la de fijar el tiempo de permanencia máximo en 35 horas y un denominador $\alpha \cdot T_{p,max}$ de 37 horas. Para esta combinación, se llegó a 124 m³/día y un tiempo de permanencia de 28 horas. Este valor ha sido seleccionado por proximidad al óptimo global que supondría un tiempo de permanencia nulo y un volumen de purga también nulo, es decir, por proximidad al origen de coordenadas del gráfico mostrado en la Figura 3.

A partir de estas soluciones, se aplicó el método SA para ajustar los patrones de purga. Al tratarse de un método heurístico, se realizaron varias simulaciones, de forma que se pudiese comprobar hasta qué punto los resultados son consistentes.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

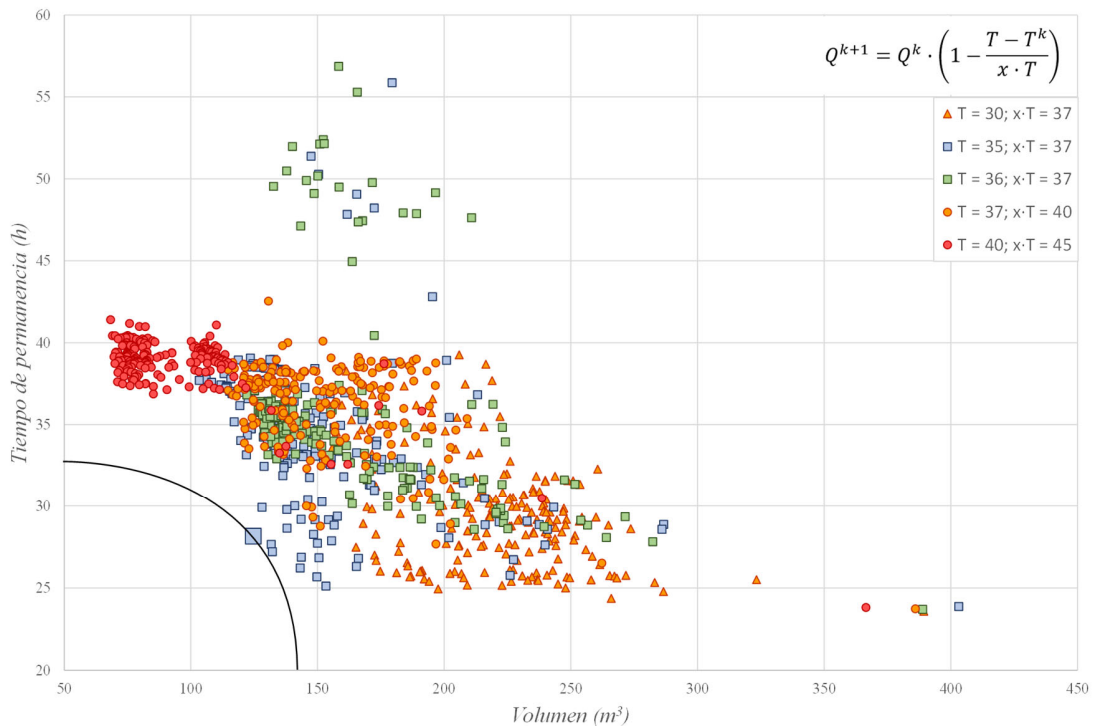


Figura 3. Resultados de aplicar el gradiente reducido durante la fase 2 del método de las purgas intermitentes.

Los resultados obtenidos fueron los mostrados en la Tabla 1. Se observa que los resultados mejoran ostensiblemente los obtenidos mediante la búsqueda exhaustiva, llegando a valores de tiempos de permanencia inferiores a 35 horas con volúmenes en el entorno de los 50 m³.

Tabla 1. Resultados para varias simulaciones realizadas mediante SA.

V (m ³)	T _p (h)
68,40	34,38
78,90	32,79
63,90	34,90
54,00	32,19
43,20	35,00
50,40	33,64
50,40	32,49
50,10	34,90

5. CONCLUSIONES

Se han comparado dos métodos para la reducción del volumen de purga de forma que el tiempo de permanencia máximo del agua en los puntos de consumo esté acotado. Los resultados obtenidos indican que hay una fuerte relación entre el volumen de purga y el

tiempo máximo de permanencia en la red si se realiza una adecuada selección de los puntos de purga. Por el contrario, si no se realiza esta selección, la relación entre tiempo de permanencia y volumen de purga que muy desdibujada, como muestra la nube de puntos obtenida al aplicar la reducción de volúmenes mediante el método del gradiente y mostrada en la Figura 3.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en el marco de una práctica en la empresa Global Omnium financiada por la Cátedra Aguas de Valencia y realizada en la Universidad Politécnica de Valencia.

REFERENCIAS

- [1] BOE, “Real Decreto 140/2003 por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano,” Feb. 2003.
- [2] A. A. Abokifa, K. Haddad, C. S. Lo, and P. Biswas, “Detection of Cyber Physical Attacks on Water Distribution Systems via Principal Component Analysis and Artificial Neural Networks,” in *World Environmental and Water Resources Congress 2017*, Sacramento, 2017, pp. 676–691.
- [3] S. Avvedimento, S. Todeschini, C. Giudicianni, A. Di Nardo, T. Walski, and E. Creaco, “Modulating Nodal Outflows to Guarantee Sufficient Disinfectant Residuals in Water Distribution Networks,” *J Water Resour Plan Manag*, vol. 146, no. 8, Aug. 2020, doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001254.
- [4] L. A. Rossman, “Epanet 2 Users Manual,” Cincinnati, OH, 2000. doi: 10.1177/0306312708089715.
- [5] T. Walski, “Providing Reliability in Water Distribution Systems,” *J Water Resour Plan Manag*, vol. 146, no. 2, p. 02519004, Feb. 2020, doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001168.
- [6] X. Xie, M. Nachabe, and B. Zeng, “Optimal Scheduling of Automatic Flushing Devices in Water Distribution System,” *J Water Resour Plan Manag*, vol. 141, no. 6, Jun. 2015, doi: 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000477.
- [7] C. Quintiliani *et al.*, “Multiobjective Valve Management Optimization Formulations for Water Quality Enhancement in Water Distribution Networks,” *J Water Resour Plan Manag*, vol. 145, no. 12, Dec. 2019, doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001133.