

Validación de la curva de demanda en el abastecimiento de agua en sectores de ciudades de Guanajuato y su relación con la eficiencia física de la red

Fabiola Rodríguez García (1), José de Jesús Mora Rodríguez (2)

1 [Lic. Ingeniería Hidráulica, Universidad de Guanajuato] | [f.ro.ga.29305@gmail.com]

2 [Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica, División de ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato] | [jesusmora@ugto.mx]

Resumen

Las curvas de demanda en los sistemas de abastecimiento de agua se toman en cuenta para los diseños de tanques de regulación y son utilizados como herramienta para verificar los caudales mínimos nocturnos en relación con la eficiencia física de la red. Mediante modelado físico en la red experimental de distribución de agua del Laboratorio de Ingeniería Hidráulica: “La Perlita”, y modelado numérico en EPANET, se representará una curva de demanda de sectores de Guanajuato para población de nivel económico medio bajo y una eficiencia física baja de la región del COTAS Silao-Romita. Se simulará durante 24 horas para identificar la eficiencia física en cada hora de consumo. Finalmente se propondrá la técnica de la gestión de la presión para mejora de la eficiencia física de la red, se validará la relación que se pueda presentar entre las características de consumo de una población a lo largo del día y el nivel de fugas que se presenta en la infraestructura. Como resultados se obtendrán escenarios de gestión en la operación del abastecimiento y se mostrará el aumento de la eficiencia física a lo largo del día como propuesta de mejora en la operación de la red de distribución.

Abstract

Demand curves in water supply systems are used to design storage reservoirs. They work as tool to verify the minimum night flow and help to estimate physical network efficiency. Using the physical model in the experimental water distribution network of the Engineering Hydraulics Laboratory: “La Perlita”, and the numerical model on EPANET, it will be represented a demand curve of Guanajuato sectors for low-income people and low physical efficiency for the COTAS Silao-Romita region. The numerical model will simulate 24 hours in order to identify the physical efficiency during every hour of consumption. Finally, it is going to be proposed the technic pressure management to improve the physical efficiency of the network. It will validate the relationship that could be presented between the consume characteristics of population during the day and the leakage level on the infrastructure. As a result it will be obtained some scenarios for supply system management and it will be shown an increase of physical efficiency during the simulation period as a proposal to improve water distribution system operation.

Palabras Clave

Curva de Consumo; Fugas; EPANET; Gestión de la Presión; Red experimental.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, los organismos operadores de agua han mostrado la obligación de desarrollar planes de gestión eficiente para las redes de distribución de agua potable (RDAP), enfocados a la optimización de su operación y reducción de fugas. [1]

La eficiencia de un sistema de abastecimiento de agua potable (SAAP) en una ciudad se asocia con el proceso de captar, conducir, regularizar, potabilizar y distribuir el agua, desde la fuente natural hasta los consumidores, con un servicio de calidad total [2]. De esta forma, mediante la eficiencia se refleja la calidad en la entrega del agua a los consumidores del servicio. En el caso de la eficiencia física de la RDAP la confiabilidad de este indicador recae en las buenas prácticas de medición de volúmenes producidos y consumidos. Este indicador lleva implícitas las pérdidas comerciales debidas a las deficiencias en las mediciones de consumos y a la existencia de tomas clandestinas, así como las pérdidas físicas, referentes a las fugas de agua. En la región del Consejo Técnico de Aguas Subterránea (COTAS) Silao-Romita, donde se ubica las ciudades de Guanajuato, Silao y Romita, la eficiencia física más baja para 2013, se presenta en el Abastecimiento de Agua Potable de Romita (SAPAR), con un 55% [3]. Por lo tanto, en dicho sistema el 45% del agua potabilizada, se convierte en agua no contabilizada.

Un modelo de simulación hidráulica representa una red de distribución en servicio, el modelo óptimo dependerá del ajuste que se realice de los parámetros de cada uno de los elementos. Los parámetros que tienen mayor importancia dentro de una simulación son tres:

- Diámetro de las tuberías
- Rugosidad de las tuberías
- Demanda de los nodos de consumo

El valor del diámetro de las tuberías instaladas depende principalmente del nivel de información que se tenga en cada SAAP, mientras que la rugosidad es un parámetro con mayor incertidumbre, por diversos factores como la antigüedad de la red, la topología y la composición

química del agua. Sin embargo, la demanda en los nodos de consumo es, la variable que más incidencia tiene en el comportamiento del modelo [4].

El tiempo es una variable fundamental en el modelado de RDAP. Existen dos tipos de modelado en función del tiempo: Simulación estática, en este tipo de modelos se supone que los caudales demandados e inyectados permanecen constantes, se emplean para analizar el comportamiento de la red con los caudales máximos horarios, y así verificar que la red opera en las condiciones más desfavorables. Simulación dinámica, permite la variación temporal de caudales demandados [4].

La simulación en periodo extendido permite modelar la variación de la demanda en los puntos de consumo a partir de la obtención de las demandas que se reproduce a lo largo del día. Para lo cual, se debe realizar una medición temporal y continua de la demanda real en la RDAP. La curva de demanda será una serie de multiplicadores que relacionan la demanda media de los nodos con el consumo instantáneo.

La representación numérica de todos los elementos de la RDAP, tal cual como se tienen físicamente resulta un trabajo muy complejo y muchas veces inconveniente. Por lo anterior, es necesario depurar o simplificar los datos que se recopilan de la RDAP de manera que se tenga información útil para la simulación hidráulica.

La esqueletización consiste en una simplificación de la red de distribución, y una esquematización de los accesorios de la red. De forma general. La esqueletización debe cumplir con lo siguiente [4]:

- Unificar nodos próximos, donde debido a la corta longitud de las tuberías que los unen, tendrán un mismo valor de presión;
- Eliminar ramificaciones y demandas, sustituyéndolas por su consumo en el punto de conexión con la red;
- Eliminar tuberías de diámetro pequeño

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el estudio de la validación de curva de demanda y su relación con la eficiencia física de

la red, se trabajó con el modelo experimental de redes de distribución de agua del Laboratorio La perлита. Se utilizó un modelo hidráulico calibrado en EPANET y se realizó un análisis que representará las mismas condiciones de operación, pero de manera simplificada, ya que el modelo original contiene un gran número de elementos (tuberías y nodos). Para ello se implementaron técnicas de esqueletización en la red, mediante diversos procedimientos que permitieron reducirla. El modelo simplificado, mantiene todas las características hidráulicas de la red original, así como todos los elementos, para llevar a cabo las simulaciones sin que se vean afectadas.

La red experimental cuenta con 2 circuitos, A y B; cada circuito tiene una red primaria y secundaria. En la red secundaria se encuentran los nodos que simulan las fugas y las tomas domiciliarias; así como también la derivación dos caudales de agua, que representan la demanda de un fraccionamiento o el de alguna industria. Para la realización de las simulaciones, se trabajó con el circuito B, el cual cuenta una longitud de tubería de 141 m, siendo 47% de Fierro galvanizado (FoGo) y 53% de Poli-cloruro de Vinilo (PVC).

La red está compuesta por:

1. **Sistema de Alimentación a la red (tren de descarga o de bombeo):** Cisterna de 100 m³, equipo de bombeo ($Q_{operación} = 30$ l/s a 27 mca), tren de descarga, válvula check.
2. **Línea de conducción:** Tubería de FoGo de 4".
3. **Red de distribución:** Red primaria de FoGo de 4" y secundaria de PVC de 3" y 2", orificios que simulan fugas en tuberías de 3", válvulas de seccionamiento y 5 conexiones con tuberías de 1/2" con sus respectivos medidores, a fin de simular demandas en las tuberías de 3" y 2".
4. **Sistema de recirculación:** Canal rectangular hacia cisterna.

El circuito B (Imagen 1) demanda **28.86 l/s** el presente dato se toma de un macromedidor que se encuentra en la línea de conducción. De la presente demanda, se abastecen 8 tomas de 0.30 l/s cada una. 1 toma a un fraccionamiento de 13.3 l/s. haciendo un total de consumo 15.72 l/s. el

caudal restante se pierde por fugas. De ante mano se conoce el número de fugas y su ubicación, sumando un caudal perdido se 13.14 l/s. Representando de esta manera una eficiencia de 55%.



IMAGEN 1: Red Experimental "La Perлита"

EPANET, es la herramienta que se utilizó para realizar el modelo numérico, así como las simulaciones y el cálculo hidráulico de cada escenario. En la imagen 2 se pueden observar los nodos de demanda representados con la letra D, los nodos de fuga, representados con la letra F y finalmente el consumo a un fraccionamiento (Notación S1) y una fuga de gran dimensión (Notación S2). La alimentación de la red primaria hacia la red secundaria se realiza por un solo punto y es el cruceo XC1.

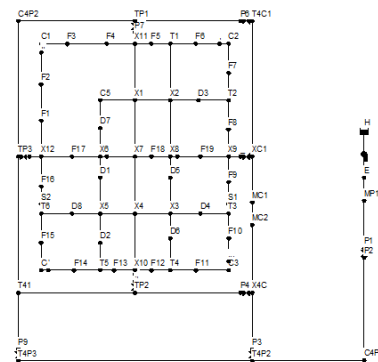


IMAGEN 2: Modelo Numérico de la Red

El gasto de diseño se obtuvo en base al suministro del equipo de bombeo de la red experimental. La

modelación se realizó en base al caudal máximo horario y para las simulaciones de los diferentes escenarios se tomaron en cuenta los coeficientes de rugosidad de las tuberías, siendo 0.0015 para el PVC y 0.15 para el FoGo. El gasto emisor en función de la presión, depende del valor del coeficiente emisor y del exponente emisor, el cual puede variar de 0.5 a 2.5.

La calibración de los escenarios se hizo mediante el ajuste de presiones, las cuales se igualaron haciendo una reasignación de los gastos y variando los coeficientes emisores. La variación de estos parámetros se hizo con el fin de disminuir las pérdidas en la red, porque muchas están relacionadas con la variación de la presión, siendo esta un factor importante ya que gran parte del agua se pierde debido a que no hay un buen control en las RDAP.

El primer escenario (Escenario 0), se simuló con los datos que se obtuvieron de las mediciones en campo (Tabla 1), para ver el comportamiento de la red y así poder hacer la comparación de la presión de los nodos de calibración, mediante los datos de los escenarios que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1: Carga de presión en los nodos (Escenario 0)

Nodo	Presión (mca)
D1	14.84
D2	14.82
D3	14.91
D4	14.86
D5	14.87
D6	14.86
D7	14.86
D8	14.81

Como se puede observar la presión que se obtiene en la simulación es en promedio de **14.85mca**, siendo muy similar en la mayoría de los nodos de demanda y con 4.85mca por encima de los 10mca mínimo permitidos, por lo que, se puede considerar disminuir la presión para mejorar la eficiencia de la red.

Se crearon los escenarios "A" en los que se consideró el caudal de fuga como demanda en los nodos (considerando que de forma normal no se conoce su ubicación, ni su caudal). Para la simulación de la esqueletización, aplicación de la curva de demanda y gestión de la presión para la

mejora de la eficiencia física se calibraron los 4 escenarios a través de las demandas y las rugosidades:

Escenario 1A: Simulación en la que se asignaron las fugas en los nodos de demandas más cercanas y se representaron como demandas.

Escenario 2A: Mismo escenario en periodo extendido. A este escenario se le asignó la curva de demanda que representa un sector en RDAP con nivel económico bajo en Guanajuato, con lo cual se podrá obtener la variación de la presión a lo largo de un día.

Escenario 3A: En este escenario, se propone una alternativa para mejora de la eficiencia física mediante la gestión de la presión, se realizó una reducción de la misma a la entrada de la red primaria. Se asigna una consigna de 85 % a la válvula reductora de presión (VRP), para disminuir la presión en la red secundaria.

Escenario 4A: Se simula el escenario de consigna del 85% en la VPR, en periodo extendido, con lo cual se obtiene el comportamiento de la red a cada hora y finalmente la posible mejora de la eficiencia física debida a la gestión de la presión, validando con ello su relación con la curva de demanda.

Se crearon los escenarios "B", en los que se consideró el caudal de fuga como emisor en los nodos de demanda. De igual forma se conformaron cuatro escenarios, los cuales se calibraron a través del coeficiente emisor y de las rugosidades:

Escenario 1B: se hizo una simulación en la que se simularon las fugas como emisores en los nodos de demanda y se hizo el ajuste del caudal fugado cambiando los valores del coeficiente y exponentes del emisor.

Escenario 2B: mismo escenario que el anterior, pero simulado en periodo extendido, por lo cual se le asignó la curva de demanda. Para observar el comportamiento de las presiones a lo largo de un día.

Escenario 3B: Se realizó la gestión de la presión, haciendo una reducción, asignándole una consigna del 85% a la VPR a la red primaria, para disminuir la presión en la red.

Escenario 4B: mismo escenario que el anterior, con la consigna del 85% en la VRP agregándole la curva de demanda para observar el comportamiento de la red en periodo extendido.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se muestran los resultados numéricos de las simulaciones antes planteadas y los ajustes calibrados obtenidos.

En la Tabla 2 se muestra el resultado de la calibración del escenario de partida 0, en el cual se simulan las fugas en el sitio en el que están ubicadas en la red experimental. Al realizar la simulación en periodo estático, los resultados muestran una calibración de 0.003% en promedio. Al momento de realizar la simulación en periodo extendido, el error promedio asciende a 3.83%, debido a que en el periodo estático solamente se hace el ajuste a una hora del día, y ahora se simulan las 24 horas.

Tabla 2: Presión en los nodos (Escenario 0)

Escenario 0 (Periodo estático)		Escenario 0 (Periodo extendido)		
Estadísticas de calibración para la presión				
Nodo	Presión observada	Error	Presión Calculada	Error
D1	14.84	0	18.65	3.809
D2	14.82	0.003	18.62	3.802
D3	14.91	0.003	18.74	3.834
D4	14.86	0.004	18.75	3.886
D5	14.87	0.003	18.72	3.854
D6	14.86	0.002	18.72	3.858
D7	14.86	0.004	18.68	3.823
D8	14.81	0.001	18.59	3.781
Red	14.85	0.003	18.68	3.831

En la Tabla 3 se observa el resultado de la calibración de los escenarios "A", en el cual se simulan las fugas como demandas. Al realizar la simulación en periodo estático, los resultados muestran una calibración de 0.013% en promedio, mientras que en la simulación de periodo extendido el error es de 22.145%; estos se realizaron sin consigna en la válvula. Al realizar la simulación con una consigna del 85% en la válvula, el error promedio asciende a 1.947%, en el periodo estático y en el periodo extendido disminuye a 0.931%.

Tabla 3: Presión en los nodos (Calibración mediante gastos)

Nodo	Escenario 1A (Periodo estático)		Escenario 2A (Periodo extendido)		Escenario 3A (Periodo estático)		Escenario 4A (Periodo extendido)	
	sin consigna				Consigna 85%			
	Presión Calculada	Error	Presión Calculada	Error	Presión Calculada	Error	Presión Calculada	Error
D1	14.84	0.005	36.99	22.154	12.9	1.942	13.91	0.93
D2	14.82	0.004	36.99	22.172	12.89	1.934	13.9	0.92
D3	14.91	0.001	37.01	22.099	12.95	1.962	13.95	0.961
D4	14.86	0.004	37	22.139	12.91	1.954	13.94	0.92
D5	14.87	0.001	37	22.131	12.92	1.952	13.94	0.933
D6	14.87	0.005	37	22.14	12.91	1.952	13.93	0.927
D7	14.87	0.011	37	22.141	12.92	1.944	13.92	0.936
D8	14.83	0.018	36.99	22.183	12.88	1.933	13.89	0.922
Red	14.88	0.013	37	22.145	12.91	1.947	13.92	0.931

En la Tabla 4 se observa el resultado de la calibración de los escenarios "B", en el cual se simulan las fugas como emisores. Al realizar la simulación en periodo estático, los resultados muestran una calibración de 0.011% en promedio, mientras que en la simulación de periodo extendido el error es de 3.77%; estos se realizaron sin consigna en la válvula. Al realizar la simulación con una consigna del 85% en la válvula, el error promedio se mantiene en 0.011% en el periodo

estático y en el periodo extendido el error es de 1.263%.

Tabla 4: Presión en los nodos (Calibración con emisores)

Nodo	Escenario 1B (Periodo estático)		Escenario 2B (Periodo extendido)		Escenario 3B (Periodo estático)		Escenario 4B (Periodo extendido)	
	sin consigna				Consigna 85%			
	Presión Calculada	Error	Presión Calculada	Error	Presión Calculada	Error	Presión Calculada	Error
D 1	14.84	0.002	18.6	3.756	14.84	0.002	16.1	1.256
D 2	14.83	0.012	18.59	3.768	14.83	0.012	16.09	1.271
D 3	14.9	0.01	18.68	3.774	14.9	0.01	16.15	1.241
D 4	14.85	0.007	18.65	3.791	14.85	0.007	16.13	1.267
D 5	14.86	0.014	18.65	3.776	14.86	0.014	16.13	1.255
D 6	14.85	0.008	18.64	3.78	14.85	0.008	16.12	1.261
D 7	14.87	0.012	18.65	3.79	14.87	0.012	16.13	1.269
D 8	14.84	0.026	18.59	3.782	14.84	0.026	16.09	1.284
Red	14.85	0.011	18.63	3.777	14.85	0.011	16.12	1.263

En la gráfica que se muestra a continuación (Imagen 3) se ve la disminución de la presión entre un escenario sin consigna (1A) y uno con una consigna del 85% (3A), teniendo en el eje vertical la presión y en el horizontal los nodos de demanda. Con la disminución de la presión, mediante la consigna, la eficiencia física de la red alcanza 60%.

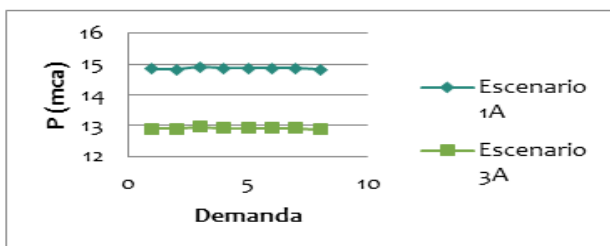


IMAGEN 3: Grafica de Presión

En la siguiente grafica (Imagen 4) se ve como varían las demandas de acuerdo a las calibraciones.

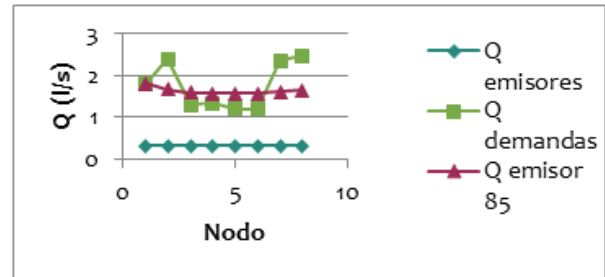


IMAGEN 4: Grafica de Demandas

CONCLUSIONES

En la primera técnica de calibración se propuso usar la rugosidad de la tubería, pero debido a la corta distancia de los tramos no fue posible modificar los coeficientes de rugosidad para el ajuste de las presiones.

Se observó que la calibración realizada considerando a las fugas como demandas genera mayor error debido a que al variar el consumo a lo largo de las 24 horas, la fuga que se simula como demanda se mantiene igual.

Así mismo, mediante los resultados obtenidos en los escenarios, se observa que la calibración mediante los coeficientes emisores es el mejor ajuste ya que el error es menor, debido a que el caudal de fuga se calcula a cada hora con la variación de la presión.

Mediante la gestión de la presión se puede observar, que la eficiencia física se incrementa con la consigna de la reducción de la presión. Al tomar en cuenta la curva de demanda, se puede observar la disminución del caudal fugado a lo largo de las 24 horas, cuando las fugas se simulan como emisores, ya que la presión en las tuberías varía a lo largo del día ocasionando que la eficiencia física mejore en un 5%.

REFERENCIAS

[1] Juan Escobar (2011), Método de los caudales mínimos nocturnos: revisión de sus bases científicas, evaluación de errores potenciales y propuestas para su mejora. (Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Valencia).

[2] Comisión Nacional del Agua (2012). Manual de Incremento de Eficiencia Física, Hidráulica y Energética en Sistemas de Agua Potable. México, D.F: Gobierno Federal.

[3] Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG) (2014). Diagnóstico Sectorial de Agua Potable y Saneamiento del Estado de Guanajuato. Guanajuato: Gobierno del Estado de Guanajuato.

[4] Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2007). MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO. México, D.F: Gobierno Federal.