

Search for leaks in water networks with genetic algorithms, experimental validation and applications

Búsqueda de fugas en redes de agua con algoritmos genéticos, validación experimental y aplicaciones

Reyna Clarissa Vázquez Chagoya¹

Sonia de la Luz Frias Torres¹

Xitlali Virginia Delgado Galván²

José de Jesús Mora Rodríguez²

¹Estudiante de Ingeniería Hidráulica de la División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato; rc.vazquezchagoya@ugto.mx, sdll.friastorres@ugto.mx ²Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica de la División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato; xdelgado@ugto.mx, jesusmora@ugto.mx

Resumen:

Los Sistemas de Abastecimiento de Agua son los encargados de la correcta distribución de este recurso vital para el ser humano, por lo que la gestión de fugas es un aspecto importante de dichas empresas y el conocer la cantidad o ubicación exacta de las mismas en una red es una tarea prácticamente imposible por los distintos factores que intervienen, por ello mejorar al máximo la eficiencia física en la distribución, impacta en todos los aspectos: social, ambiental y económico. En este trabajo se presenta la simulación de una red de distribución de agua experimental de la Universidad de Guanajuato, se representa y calibra numéricamente con el programa Epanet 2.2, para simular los consumos y las fugas. Posteriormente, se valida la herramienta *Darwin Calibrator* del programa WaterGEMS de Bentley, para la búsqueda de fugas con Algoritmos Genéticos, utilizando los datos experimentales del caudal suministrado, consumos y presiones obtenidos del modelo físico. En el modelo experimental se obtuvieron diferentes escenarios de consumo, representando la variación de la demanda a lo largo del día de una población, se obtuvo una eficiencia física del 60%. Al realizar la validación de la herramienta para la búsqueda de fugas, de acuerdo con la repetibilidad de los resultados, y con la localización exacta de las fugas, en la mejor de las condiciones se podría mejorar en un 78% la eficiencia física y se podría recuperar un caudal de 3.20 l/s, con todo lo que implica en lo social, ambiental y económico, dicha cantidad de agua. Por lo que se obtuvo una validación adecuada de *Darwin Calibrator*.

Palabras clave: WaterGems; Darwin Calibrator; Epanet; Exponente Emisor, fugas; modelo experimental.

1. Introducción

Los Sistemas de Abastecimiento de Agua (SAA) tienen el objetivo de entregar agua en buena cantidad y calidad a los usuarios, parte de la cantidad de agua que producen, se pierde por fugas en las Redes de Distribución de Agua (RDA). Una manera indirecta de medir las fugas es mediante la Eficiencia Física (EF o EE), que relaciona el volumen de agua facturado con el producido. A nivel nacional la EF es del 55%, por lo que se pierde 44% del volumen producido, cuando el nivel aceptable es del 15% (CONAGUA 2011). Una forma de búsqueda de fugas es simulando modelos numéricos del comportamiento hidráulico de la RDA con el objetivo de representar el registro de presiones, caudales consumidos y producidos. El programa de cómputo comercial WaterGEMS de Bentley (con licencia académica), tiene una herramienta de búsqueda de fugas mediante algoritmos genéticos, la cual se validará con la RDA experimental ubicada en el Laboratorio de la Sede San Luisito de la División de Ingenierías del Campus Guanajuato, donde se modelarán fugas y se verificará la efectividad del programa para la ubicación de donde ocurren. Con ello, se respaldará su aplicación en RDA reales, buscando aportar en la mejora de la EF de los SAA.

El agua es un recurso vital para la vida, por ello desde la antigüedad el hombre, en muchos casos ha buscado para su establecimiento los lugares que le ofrecen mayores comodidades y facilidades para el desarrollo de sus múltiples actividades, procurando tener cerca una fuente de abastecimiento de agua, no siempre ha podido conseguirlo por razones diversas teniendo que establecerse en sitios que quizá no fueron los mejores para su desenvolvimiento. Así surgió la necesidad de conducir el agua a lugares apartados, pero las grandes

ventajas de tener agua donde se necesita justifican los trabajos para captarla y conducirla. El conjunto de las diversas obras que tienen por objeto suministrar agua a una población en cantidad suficiente, calidad adecuada, presión necesaria y en forma continua constituye un SAA. En las diversas etapas, desde la fuente hasta los consumidores se presentan pérdidas de agua, a las cuales se llaman pérdidas físicas o reales y estas pueden ser estimados mediante indicadores de gestión que reportan los SAA (Valdez, 1990).

2. Objetivo

Consiste en validar la herramienta de búsqueda de fugas del programa WaterGEMS que tiene base de optimización con la técnica heurística de algoritmos genéticos. La validación se realizará en base a escenarios simulados de una red experimental con datos reales medidos en laboratorio.

Se busca tener diversas alternativas de solución que proporciona el programa WaterGEMS, para realizar un análisis mediante los escenarios resultantes que se plantean en la siguiente investigación y con ello determinar la mejora de la EF de la red. Con lo que se describirán las diferentes actividades en un manual.

Los resultados obtenidos se difundirán a la sociedad a través del Sistema Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Guanajuato, diseñando un cartel con la explicación del método y los resultados principales para la concientización de la empresa para dar prioridad a este tipo de proyectos para la recuperación de agua.

3. Antecedentes

Las pérdidas de agua son atribuidas a errores de medición, robo del agua y principalmente a las fugas (Burn et al., 1999). Una fuga es una salida de agua no controlada en cualquiera de los componentes del sistema. Las fugas pueden dañar la infraestructura y causar afectaciones a terceros, ocasionar pérdidas financieras, energéticas, problemas ambientales y riesgos para la salud a causa de la intrusión patógena (Delgado et al., 2010; Ahn et al., 2012; Shanks et al., 2013; Mora et al., 2015). Los métodos de detección de fugas son de observación directa y de inferencia (Aksela et al., 2009). Los métodos de inferencia se basan en el monitoreo de los parámetros de la tubería interna, es decir, presión, flujo y temperatura; y la aplicación de un modelo matemático que, a partir de los valores obtenidos, realiza la detección, con este enfoque se realiza el presente proyecto.

Uno de los indicadores relacionados a estas pérdidas es la EE, el cual es la relación ente el volumen de agua facturado y el volumen de agua producida. A nivel nacional, la EE es llamada EE2 y fue de 55.4% (Figura 1: Hansen y Rodríguez, 2019) reportado por 367 SAA, figura 1. En el estado de Guanajuato, la EE fue de 56% (CEAG, 2019), dato reportado en promedio por los 46 municipios del estado, cabe mencionar que dicha información no ha sido actualizada ni por CONAGUA, el IMTA o la CEA desde dicha fecha. Por otro lado, a nivel nacional se cuantifica una Eficiencia Física 1 (EE1) que relaciona el volumen de agua consumido entre el volumen de agua producido. En promedio, se reportó un valor de EE1 de 57% (Hansen y Rodríguez, 2019) dato obtenido de 299 SAA. Sin embargo, se puede observar en el registro de la información que solo 11 SAA reportan de manera coherente estas dos eficiencias, en promedio se tiene un 23.7% de mayor volumen consumido respecto al volumen facturado. Esta diferencia nos da una aproximación de lo que representan las pérdidas de agua reales.

De acuerdo con el balance de agua publicado por la Asociación Internacional del Agua (IWA por sus siglas en inglés), del volumen de agua producido (Alegre et al., 2006), se divide en Volumen Consumido Autorizado (VCA) y en pérdidas de agua reales y aparentes (Tabla 1). El VCA se refiere propiamente al consumo facturado, y éste a su vez puede ser cobrado o no cobrado. De acuerdo con los datos presentados, la EE corresponderían entonces al VCA, que en promedio a nivel nacional se tienen un 55.4%. Y la EE1 de 57%, que se reporta a nivel nacional sería la suma del VCA y las pérdidas aparentes, por lo que las pérdidas aparentes corresponderían a un 1.6%, dato muy pequeño pero que se refiere a números promedio. Dichas pérdidas aparentes se refieren a los consumos no autorizados y a las pérdidas por inexactitud en la medición. Por lo que se considera que las pérdidas reales o físicas de agua en promedio en México es de 43% y que

pueden presentarse en tuberías de conducción y distribución, en tanques por fugas y derrames, en conexiones de tomas domiciliarias y en tanques durante la potabilización. De acuerdo con el programa de mejora de eficiencia de organismos operadores, es razonable hasta un nivel de pérdidas del 15% (CONAGUA, 2011), por lo que, en promedio, en México se tendría que recuperar un 28% del agua producida.

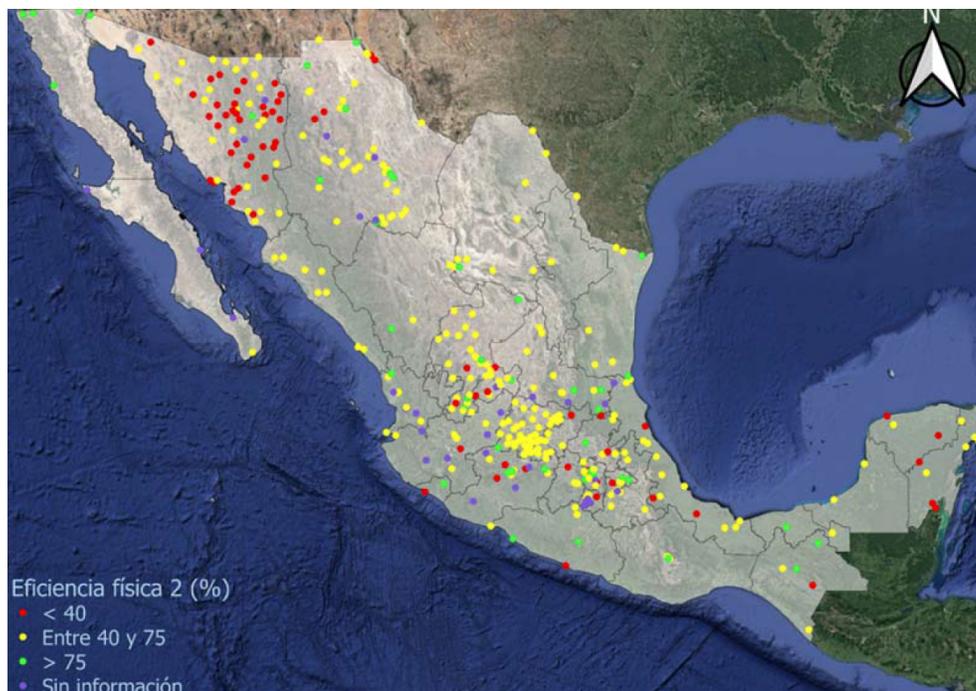


Figura 1. Rango de Eficiencia Física 2, con datos reportados de 367 SAA (Imagen tomada de Hansen y Rodríguez, 2019).

Tabla 1. Relación de Eficiencia Física con Conceptos de Balance de Agua de la IWA.

Conceptos del Balance de Agua de la IWA				Relacionado con Eficiencias Física de CEAG y CONAGUA (Promedio Estatal y Nacional)	
Volumen de agua producido	Volumen consumido Autorizado (VCA)	Consumo Autorizado	Cobrado	EE = EE2 = 55.4% del Volumen Facturado / Volumen de agua producido	EF1 = 57.0% Volumen de agua consumido / Volumen de agua producido = 57%
			No cobrado		
	Pérdidas de agua aparentes	Consumos no autorizados	Pérdidas por inexactitud en la medición	Diferencia EE1 – EE2 = 1.6%	
	Pérdidas de agua reales	En tuberías de conducción y distribución		Diferencia Volumen de agua producido con la EE1	43%
	En tanques por fugas y derrames				
	En conexiones de tomas domiciliarias				
		En tanques durante la potabilización			

4. Marco conceptual

Algunos componentes de una red de distribución que se deben considerar y tener conocimiento de ellas al momento de realizar la simulación, son las siguientes:

- **Tuberías:** se compone de dos o más tubos ensamblados mediante un sistema de unión que permite la conducción de un fluido, pudiendo ser de distintos materiales.
- **Accesorios:** permiten formar cambios de dirección, ramificaciones e intersecciones, así como conexiones incluso entre tubería de diferente material y diámetros. También permiten la inserción de válvulas y la conexión con estaciones de bombeo y otras instalaciones hidráulicas (CONAGUA, 2015).
- **Válvulas:** dispositivos mecánicos que son empleados para detener, iniciar o controlar las características del flujo en conductos a presión. Pueden ser accionadas manualmente o por medios automáticos o semiautomáticos (CONAGUA, 2015).
- **Red de distribución:** conjunto de tuberías, accesorios y estructuras que conducen el agua desde tanques de servicio o de distribución hasta la toma domiciliaria o los hidrantes públicos. Su finalidad es proporcionar agua a los usuarios para consumo doméstico, público, comercial, industrial y para condiciones extraordinarias como el extinguir incendios (CONAGUA, 2015).
- **Línea de alimentación:** tubería que inicia en un tanque de regularización y suministra agua directamente a la red de distribución. En caso de que haya más de una línea de alimentación, la suma de los gastos en estas líneas hacia la red de distribución debe ser igual al gasto máximo horario (SIAPA, 2014).
- **Red primaria:** permite conducir el agua por medio de líneas troncales o principales y alimentar a las redes secundarias.
- **Red secundaria:** distribuye el agua propiamente hasta la toma domiciliaria.
- **Consumo:** Volumen de agua utilizado para cubrir las necesidades de los usuarios. Hay diferentes tipos de consumos: doméstico, no doméstico (dividido en comercial e industrial) y público. Este se puede obtener directamente de las mediciones en la toma domiciliaria (CONAGUA 2021).
- **Demanda:** Cantidad de agua requerida en las tomas para consumo de una localidad o área de proyecto, considerando los diferentes usuarios (domésticos, comerciales, industriales, turísticos, entre otros) que ahí tienen lugar, más las pérdidas físicas del sistema.
- **Fuga:** Pérdida de agua a través de cualquiera de los elementos o uniones de un sistema de agua potable, toma domiciliaria o alcantarillado sanitario.
- **Caudal mínimo nocturno:** se utiliza para la estimación de fugas y otros objetivos estratégicos en empresas operadoras de agua. Se aplica durante las primeras horas de la madrugada el consumo de los usuarios es mínimo y en general suele ser más estable (menor variabilidad). Esto se traduce en un mayor porcentaje de pérdidas con respecto al volumen total de agua y una mayor precisión para calcular el nivel de fugas.
- **Epanet:** este software es utilizado para modelar y diseñar sistemas a presión, de igual forma, es posible realizar el seguimiento de sustancias en la red, también simula fugas a partir de emisores. Epanet resuelve diferentes ecuaciones no lineales simultáneamente utilizando métodos iterativos con el objetivo de alcanzar el equilibrio de red (Si la red no presenta fuga el valor del coeficiente del emisor será igual a cero (Ladino M. 2022).
- **WaterGEMS:** es un software para la ayuda y mejora de cómo se comporta la infraestructura hidráulica como sistema, cómo reacciona a las estrategias operativas y cómo debería crecer a medida que aumentan la población y la demanda. Desde simulaciones de flujo de incendios y calidad del agua hasta análisis de criticidad y costos de energía. WaterGEMS ofrece todas las herramientas de análisis hidráulico en régimen permanente de Redes a Presión como son el análisis en periodo estático (Steady State), Periodo Extendido (EPS), Análisis de Flujo de Incendio (Fire Flow Analysis) y Análisis de Calidad (Calidad del Agua).
- **Emisor en Epanet:** los emisores se utilizan para modelar el flujo a través de sistemas de rociadores, redes de riego y flujo de incendio en nodo, mediante la presión residual mínima. También se pueden usar para simular fugas en una tubería conectada al nodo (estimando un coeficiente de descarga y un exponente de presión para la grieta o unión con fuga).
- **Exponente emisor:** potencia a la que se eleva la presión al calcular el flujo a través de un dispositivo emisor.
- **Darwin Calibrator:** es una herramienta de WaterGEMS para encontrar la mejor solución calibrada del sistema en estudio mediante diversos escenarios de diseño y operación.

- Algoritmos genéticos: son métodos adaptativos, los cuales pueden usarse para resolver problemas especializados de búsquedas y optimización. Están basados en los procesos genéticos de los organismos biológicos. Son capaces de resolver problemas del mundo real, si se hace la codificación adecuada y pueden ser utilizados para el control de proceso en línea, tales como en una planta química, o el equilibrio de carga en un sistema de ordenador multiprocesador (Cervantes. D. 2015).

5. Metodología de validación

5.1 Modelo de la red experimental

Se planteó un escenario físico en la red experimental de la Perlita (Figura 2), creando un flujo de caudal que nos permitiera tener dos escalones de presión para las dos redes secundarias que se tienen. Ya que por primera vez se estuvo interactuando con toda la red y el objetivo era lograr diferencia de presiones en ambos sectores de la misma.

En el modelo físico experimental los parámetros que gobiernan el funcionamiento hidráulico son: las demandas, los diámetros, las rugosidades, los emisores y las pérdidas de energía por accesorios. El modelo físico experimental se compone de tres partes:

I. Sistema de alimentación a la red: Cisterna de 100 m³. Equipo de bombeo (15 kW) y tren de descarga con válvula expulsión de aire, válvula controladora de bomba y de compuerta.

II. Línea de conducción y red primaria: Tubería de fierro galvanizado (fuego) Diámetro: 4" (DI 102.3 mm).

III. Red de distribución secundaria: Tubería de PVC RD-32.5 de diámetros de 3" (DI 83.5 mm) y 2" (DI 56.5 mm), orificios circulares en las tuberías de 3" y 2" a fin de simular fugas y válvulas de seccionamiento, además de 5 tuberías de 1/2" con medidores y cuatro descargas de 2" a fin de simular demandas.

IV. Sistema de recirculación: Tanque superficial, canal rectangular y vertedor triangular (Caballero C. 2007).



Figura 2. Red Experimental (2023).

De la simulación física se registraron los datos en la tabla 2, cerrando algunas válvulas para direccionar el flujo, de tal manera que se crearan escalones de presión y poder crear distintos escenarios y variabilidad de presiones dentro de la red de distribución. Se colocaron manómetros en diferentes puntos para hacer las lecturas de presiones en cada escenario. Una vez cerradas las válvulas necesarias se puso en funcionamiento la red. Se recopilieron los siguientes datos medidos, correspondientes para 4 escenarios

distintos, para cada uno de ellos se repitió la lectura de datos 5 veces y al final se tomó un valor promedio. Los datos tomados fueron de la presión de 8 manómetros (M1 a M8), 11 fugas (dos en salidas de 2" (F2 y F3) y dos grupos de fugas de 4 (FA) y 5 (FB) orificios en tuberías de PVC) y 2 de caudales de consumo (Q1 y Q4).

Tabla 2. Datos medidos en la red experimental.

ESCENARIO	Caudales (l/s)							Cargas de presión (mcH ² O)								Caudales (l/s)			Eficiencia
	Q total	Q1	F2	F3	Q4	FA	FB	M1	M2	M8	M7	M6	M5	M4	M3	Consumos	Fugas	Qcalc.	
1	14.35	3.38	3.37	2.46	2.04	0.63	0.85	22.2	18.6	16.7	15.1	13.5	14	13	13	5.42	7.30	12.72	42.61%
2	16.13	5.21	2.84	2.12	3.10	0.55	0.75	21.6	16.9	14.2	12.2	10.2	10	9.18	9.13	8.31	6.26	14.57	57.03%
3	17.92	6.86	2.35	1.82	4.08	0.46	0.62	21	15.3	12.2	9.89	7.44	7.4	6.12	6.07	10.95	5.25	16.20	67.59%
4	19.1	7.81	2.01	1.60	4.80	0.40	0.55	20.8	14.5	11.2	8.46	5.81	5.8	4.38	4.28	12.61	4.56	17.16	73.44%

El comportamiento hidráulico de las fugas está altamente relacionado con las presiones, y se puede describir utilizando la expresión siguiente (Ziegler et al., 2011):

$$q = c p^\alpha$$

donde: q es el Caudal de fuga, C es el Coeficiente de fuga, p es la Presión y α es el Exponente de Fuga.

Siendo así se deberán calcular los coeficientes emisores de fuga para cada nodo y un exponente para introducirlo en la interfaz del programa EPANET 2.2. Para ello se consideró los 4 escenarios (Tabla 3) y se agregó líneas de tendencia potenciales, con lo cual se genera la expresión del caudal (y) que depende de la presión (x) (Figura 3).

Tabla 3. Datos de presión y caudal para la obtención de coeficiente y exponente de fuga.

Escenarios	Fugas A		Fugas B		Fugas 2		Fugas 3	
	P (mcH ² O)	Q (m ³ /s)	P (mcH ² O)	Q (m ³ /s)	P (mcH ² O)	Q (m ³ /s)	P (mcH ² O)	Q (m ³ /s)
1	13.520	0.632	13.520	0.846	13.000	3.366	13.520	2.457
2	10.200	0.548	10.200	0.746	9.180	2.844	10.200	2.122
3	7.440	0.458	7.440	0.618	6.120	2.351	7.440	1.822
4	5.810	0.402	5.810	0.547	4.380	2.013	5.810	1.596

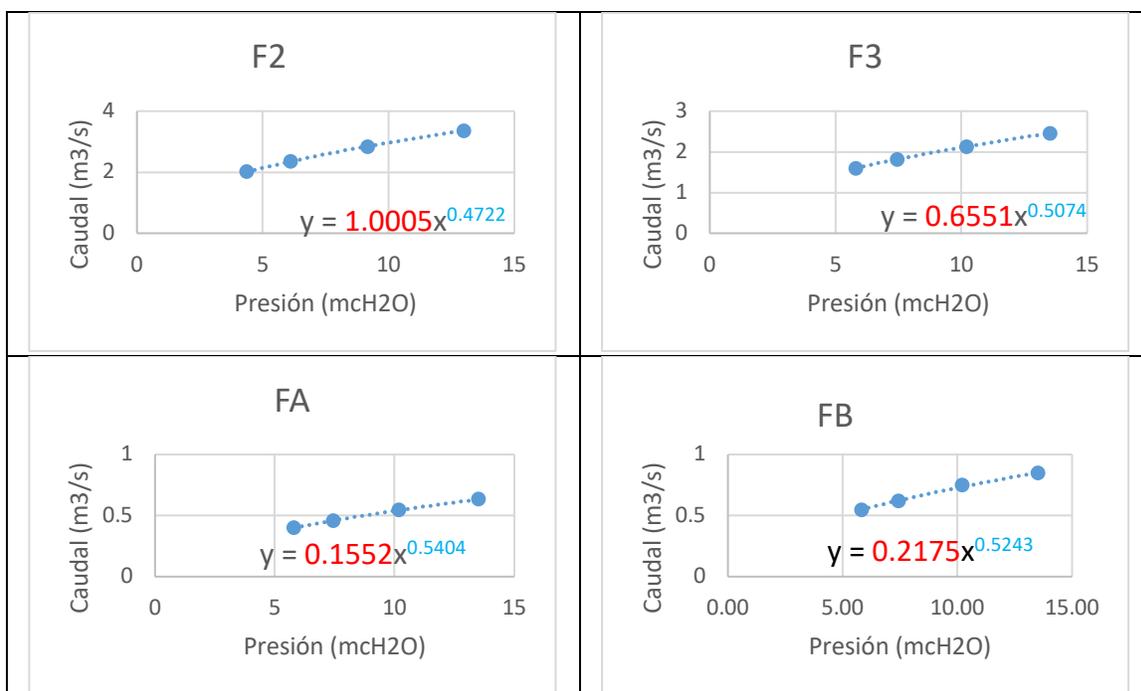


Figura 3. Ajuste de curva potencial para la obtención de coeficientes y exponentes de fuga.

De esta manera obtenemos los valores de coeficientes emisores (que representan las fugas), señalados en rojo en las gráficas anteriores (Tabla 4).

Tabla 4. Coeficientes emisores calculados.

FA	0.1552
FB	0.2175
F2	1.0005
F3	0.6551

5.2 Simulación de la red en Epanet para su calibración.

Se realiza el trazado en el programa libre Epanet y se incluyen las características de todos los elementos en el modelo y poder realizar la calibración adecuada. Una vez que la red está trazada (Figura 4), en la versión de Epanet 2.2, en cada línea se incluyen las características de los tubos (longitud, diámetro y rugosidad en función del material) y en los nodos se incluyen sus características de (elevación topográfica y consumo para los que corresponda), donde se presentaron las fugas, se incluyó el coeficiente emisor. Mientras que el exponente de fuga se incluye un solo valor promedio en los parámetros hidráulicos del modelo (Figura 5), también fue requerida una curva para la simulación de la bomba y establecer la carga piezométrica de la cisterna, la pérdida de energía por fricción se calculó con la fórmula de Darcy.

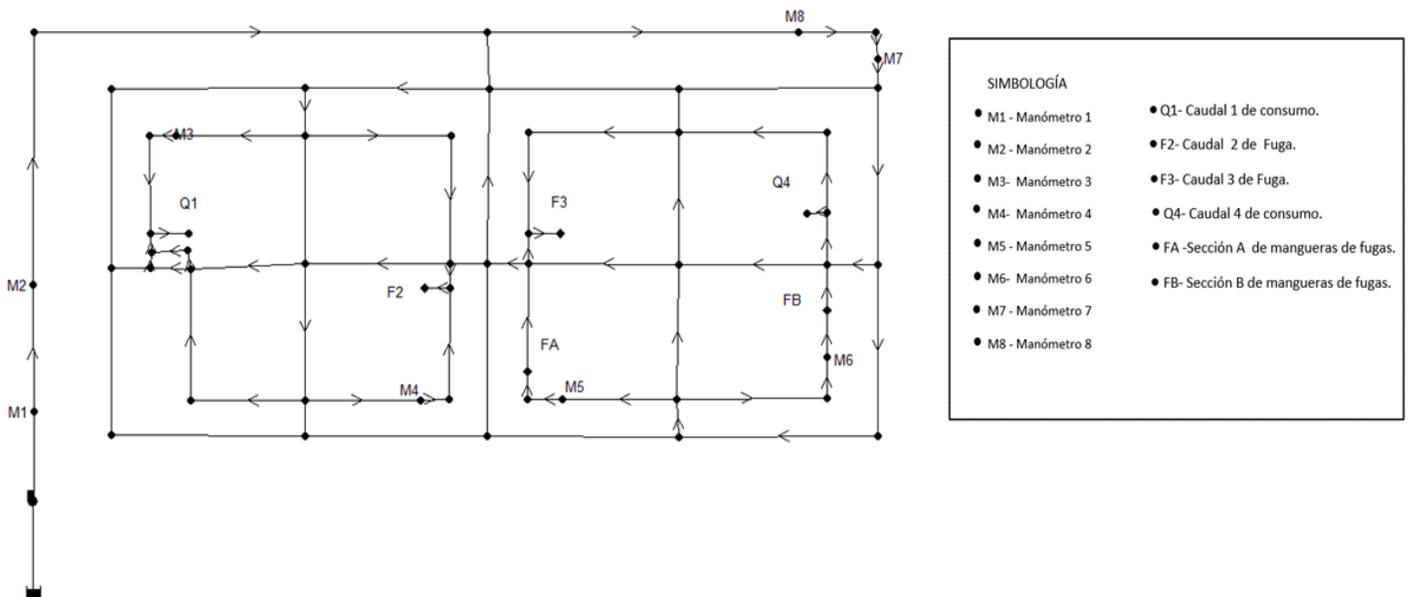


Figura 4. Modelo Numérico en (EPANET 2.2, 2023)

Posteriormente, se inició con la calibración con el valor de coeficiente de pérdida por accesorios (k), debido a que la red experimental tiene tramos cortos de tubería, por lo tanto, las pérdidas por fricción son pequeñas en comparación con las pérdidas de energía por accesorios debido a la gran cantidad de accesorios que se tienen en la red experimental en comparación con la longitud de tuberías.

Se tomó como base los datos del escenario 3 es decir los consumos $Q1 = 6.86$ l/s y $Q4 = 4.08$ l/s y se simuló para un horario estacionario. Una vez ejecutada la simulación se agregó un patrón de consumo considerando un horario extendido de 72 hrs, para ello se utilizaron los multiplicadores obtenidos a partir de los consumos de los 4 escenarios. A partir de este punto se consideraron las pérdidas por accesorios, al realizar la simulación se presentaron variaciones en las presiones calculadas con las observadas en la red, por lo que se procedió a calibrar mediante los valores de coeficiente de k, incluida en cada tramo de tubería, representando sus accesorios correspondientes. Después de una serie de pruebas de variación a los coeficiente de pérdida por accesorios, se logró una buena calibración aproximando las presiones calculadas con el programa a las observadas en la red real, en los 4 escenarios experimentales. Estas pérdidas se asignan en las propiedades de las tuberías en la opción de *Loss Coeff.* Y son las sumatoria de pérdidas por tramo derivadas por codos, té, válvulas, cruceros, reducciones etc.

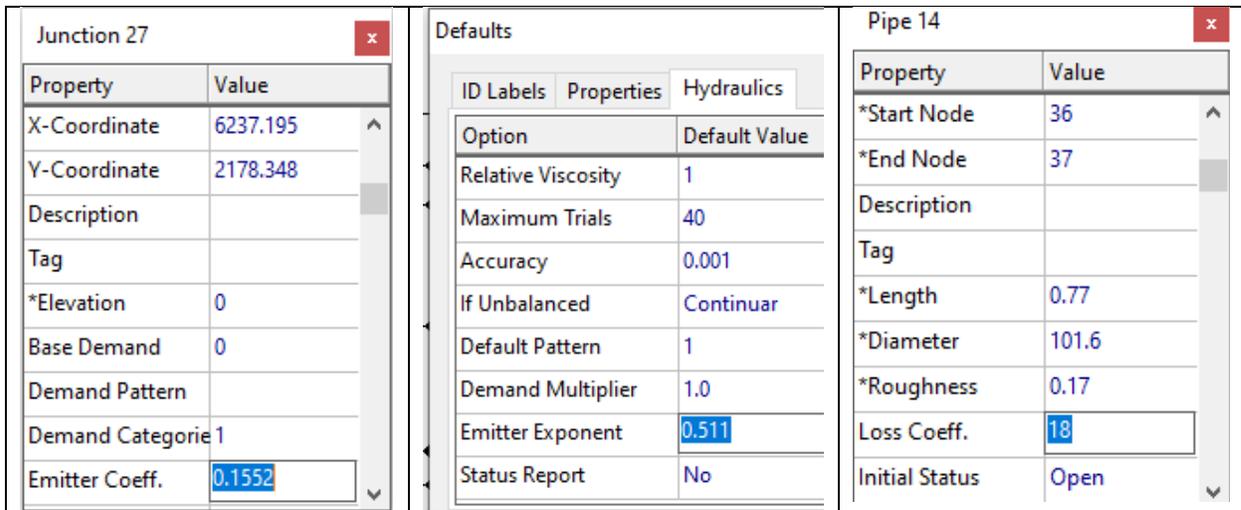


Figura 5. Ejemplo de aplicación de coeficiente emisor, exponente emisor y coeficiente k por accesorios asignados (EPANET 2.2 2023).

Un parámetro importante para la simulación de las fugas mediante el caudal mínimo nocturno, es el patrón de consumo, donde se ingresan los multiplicadores de los consumos de los 4 escenarios simulados en función de un consumo base, que se considera del 100%. En este caso, el consumo base fue el segundo escenario y con él se dividen los consumos de los otros tres escenarios para obtener el patrón de consumo (Figura 6) con los multiplicadores 0.50, 1.00, 1.15, 0.76 y representan la variabilidad a lo largo del día. En este proyecto, se consideraron 4 patrones, cada uno representando 6 horas de consumo debido a la simplificación de la toma de datos en el modelo experimental. Aún con ello, se tienen una buena representación del consumo de una población con una EF del 60%.

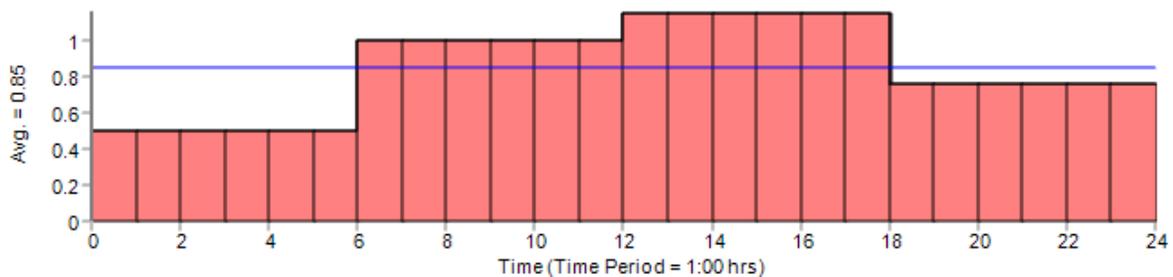


Figura 6. Patrón de consumo (EPANET 2.2)

Teniendo la red calibrada en Epanet, se comparó los datos experimentales con los calculados por el software para verificar el ajuste a los datos experimentales (Tabla 5-7), con lo que se concluyó que el modelo quedaba

calibrado y listo para realizar la validación de WaterGEMS, con el escenario sin incluir las fugas, para obtener los resultados con Darwin Calibrator.

Tabla 5. Estadística de calibración de presiones (EPANET 2.2 2023)

Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
2	1	22.23	22.42	0.192	0.192
3	1	18.56	19.01	0.447	0.447
6	1	16.72	16.97	0.25	0.25
8	1	15.09	14.91	0.175	0.175
19	1	13.52	13.72	0.201	0.201
50	1	13.52	13.74	0.215	0.215
54	1	13	12.49	0.514	0.514
35	1	12.95	12.54	0.413	0.413
2	1	21.01	20.35	0.659	0.659
3	1	15.35	15.16	0.188	0.188
6	1	12.24	12.08	0.16	0.16
8	1	9.89	8.96	0.932	0.932
19	1	7.44	7.15	0.294	0.294
50	1	7.44	7.18	0.262	0.262
54	1	6.12	5.11	1.008	1.008
35	1	6.07	5.18	0.893	0.893
2	1	20.8	19.78	1.016	1.016
3	1	14.53	14.11	0.419	0.419
6	1	11.22	10.74	0.477	0.477
8	1	8.46	7.33	1.13	1.13
19	1	5.81	5.35	0.461	0.461
50	1	5.81	5.39	0.423	0.423
54	1	4.38	3.09	1.288	1.288
35	1	4.28	3.16	1.12	1.12
2	1	21.57	21.33	0.24	0.24
3	1	16.88	16.98	0.101	0.101
6	1	14.17	14.39	0.223	0.223
8	1	12.24	11.78	0.465	0.465
19	1	10.2	10.26	0.055	0.055
50	1	10.2	10.28	0.079	0.079
54	1	9.18	8.61	0.574	0.574
35	1	9.13	8.66	0.466	0.466
Network	32	12.19	11.82	0.479	0.589
Correlation Between Means: 0.997					

Tabla 6. Estadística de calibración de demanda (LEPANET 2.2 2023)

Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
48	1	3.37	3.62	0.254	0.254
46	1	2.5	2.49	0.01	0.01
28	1	0.85	0.83	0.021	0.021
27	1	0.63	0.59	0.039	0.039
48	1	2.35	2.3	0.054	0.054
46	1	1.9	1.78	0.121	0.121
28	1	0.62	0.59	0.026	0.026
27	1	0.46	0.42	0.036	0.036
48	1	2.01	1.78	0.234	0.234
46	1	1.6	1.53	0.069	0.069
28	1	0.55	0.51	0.038	0.038
27	1	0.4	0.37	0.034	0.034
48	1	2.84	3	0.157	0.157
46	1	2.13	2.14	0.013	0.013
28	1	0.75	0.71	0.036	0.036
27	1	0.55	0.51	0.04	0.04
Network	16	1.47	1.45	0.074	0.105
Correlation Between Means: 0.996					

Tabla 7. Estadística de calibración de flujo (EPANET 2.2 2023).

Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
2	4	15.16	15.12	0.916	1.083
51	4	5.81	5.85	0.86	1.168
33	4	3.51	3.48	0.519	0.696
Network	12	8.16	8.15	0.765	1.004
Correlation Between Means: 1					

5.3 Aplicación de Darwin Calibrator para la Validación de WaterGEMS en la búsqueda de fugas

Teniendo la calibración en EPANET, se importa el archivo de la red a WaterGEMS sin los coeficientes emisores indicados, ya que son el objetivo para validar la técnica de búsqueda de fugas que realiza el programa al localizar los puntos de fugas con la herramienta de Darwin Calibrator. Dentro de la opción de optimización con la demanda (Figura 7), se selecciona la detección de fugas en nodos, haciendo variar el coeficiente emisor en un amplio margen, entre 0 y 5.0 (ya que en el experimental se obtuvo un máximo de 1.0). Se hizo variar el número de posibles fugas entre 4 y 5, para tener diversos escenarios y observar la variabilidad de los resultados y la tendencia de la localización de las fugas y con ello validar la técnica.

Roughness Demand Status Field Data Options Notes									
	Is Active?	Operation	Minimum Demand Multiplier	Maximum Demand Multiplier	Demand Multiplier Increment	Minimum Emitter Coefficient (L/s/(m H2O) ⁿ)	Maximum Emitter Coefficient (L/s/(m H2O) ⁿ)	Emitter Coefficient Increment (L/s/(m H2O) ⁿ)	Number of Leakage Nodes
1	<input checked="" type="checkbox"/>	Detect Leakage Node	0.500	1.500	0.100	0.000	5.000	0.010	4

Figura 7. Parámetros propuestos de Darwin Calibrator (WaterGEMS 2023).

En la pestaña de opciones tenemos diferentes variables de las cuales se realizaron variaciones en los parámetros: Maximum Trails, Non- Improvement Generations y Population Size (como variable principal se variaron entre 500 a 2000 de tamaño de población). Para obtener diferentes escenarios en cada optimización y verificar la tendencia de los resultados en diversas condiciones del proceso numérico, se estableció un número de 10 soluciones por simulación para observar la tendencia de los resultados (Figura 8). Finalmente, Para aplicar la búsqueda, se agrega una nueva ejecución optimizada (New Optimized Run) en la herramienta y se obtienen resultados.

Roughness Demand Status Field Data Options Notes	
Options	
Fitness Tolerance:	<input type="text" value="0.001"/> <input type="button" value="Reset"/>
Maximum Trials:	<input type="text" value="1000000"/>
Non-Improvement Generations:	<input type="text" value="500"/>
Solutions to Keep:	<input type="text" value="10"/>
Leakage Detection Penalty Factor:	<input type="text" value="50.000"/>
Advanced Options	
Maximum Era Number:	<input type="text" value="6"/> <input type="button" value="Reset"/>
Era Generation Number:	<input type="text" value="150"/>
Population Size:	<input type="text" value="1000"/>
Cut Probability:	<input type="text" value="1.7"/> %
Splice Probability:	<input type="text" value="90.0"/> %
Mutation Probability:	<input type="text" value="1.0"/> %
Random Seed:	<input type="text" value="0.500"/>

Figura 8. Datos requeridos para la calibración (WaterGEMS 2023).

En este trabajo para la simulación en WaterGEMS se tomó el caudal mínimo nocturno en un horario de 0:00 am a 6:00 am, ya que este es un concepto utilizado para la detección de fugas en los organismos operadores de agua, realizando la simulación para 24 hrs variando parámetros que el programa pide para una mejor calibración y obtener la búsqueda de fugas más certera de acuerdo con su repetibilidad en las diferentes condiciones mencionadas: número de fugas, un total de pruebas máximas para simular, un total de generaciones, tamaño de población y un total de diferentes soluciones.

6. Resultados y discusión

Una vez especificados estos datos, se obtienen los resultados de la ubicación y número de fugas que el programa detecta (Figura 9). Los resultados que se obtuvieron fueron muy acertados, ya que se logra una calibración exitosa, detectando las fugas que se tenían en la red experimental, realizando una serie de diversas pruebas, se muestra una tendencia de localizar de dos a tres fugas en la red secundaria de la izquierda, donde se presentan la F3, FA y FB, en menor medida se presenta la fuga F2 en la red secundaria de la derecha, muchas veces no se alcanzó el lugar específico, pero la tendencia fue encontrar una fuga en esa zona.

Además de estas fugas, también se presentaron nodos con fuga en la línea de conducción, posterior al bombeo. En esta zona se tenía un gran pérdida de energía entre los manómetros M1 y M2 y posiblemente el ajuste de esta diferencia de presiones mostró en algunos casos esta ubicación errónea de fuga.

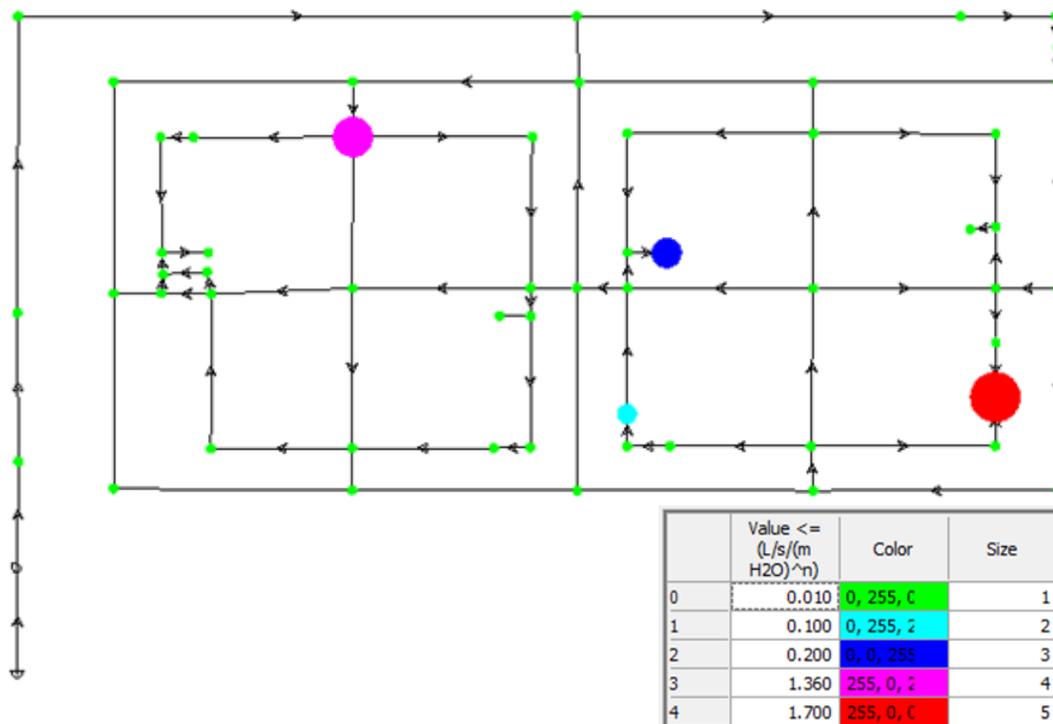


Figura 9. Ejemplo de un resultado de la ubicación de fugas (WaterGEMS 2023). El color muestra el valor del coeficiente emisor resultante de la optimización.

Para llegar a esto se realizaron varias optimizaciones hasta obtener la que mejor se ajustara a la ubicación real de las Fugas. Los valores se seleccionaron con el criterio de evitar obtener una solución óptima local y obtener las mejores soluciones posibles, por lo que se escogieron valores muy altos como 1,000,000 o 2,000,000 para el número de pruebas máximas.

Al obtener las soluciones, podemos obtener el resumen de los resultados encontrados por el Darwin Calibrator, se observa el ajuste de optimización mediante el Fitness, donde un número más bajo significa un mejor resultado. También se puede explorar las soluciones encontradas, con el ajuste de caudal y presiones, así como la ubicación de los nodos con fuga en la tabla de soluciones y revisar el ajuste realizado por la calibración sobre los resultados simulados.

Para analizar el comportamiento y la tendencia de resultados de las distintas optimizaciones, se realizó una tabla resumen con los valores que se modificaron en cada prueba (Tabla 8). Cinco de estas pruebas se

simularon con 4 nodos de fuga ya que es el número de fugas presentes en la red real y en una de ellas se simuló con 5 nodos fuga para analizar si los resultados tenían un cambio relevante al modificar este dato.

Tabla 8. Tabla resumen de número de pruebas.

Número de Ejecuciones optimizadas (Pruebas)	Número de soluciones	Número de nodos de fuga	Pruebas Máximas	Generaciones sin mejora	Tamaño de la población
1	10	4	1000000	500	2000
2	10	4	1500000	300	2000
3	10	4	1000000	300	2000
4	10	4	2000000	300	1000
5	10	4	2000000	500	1000
6	10	5	1000000	600	2000

Previo a la simulación en las opciones se estableció para cada optimización 10 soluciones posibles. Por lo que en total se analizaron los resultados de 60 soluciones, dentro de las cuales se observó resultados con la misma tendencia en la ubicación de las fugas, lo que indica que la posibilidad de encontrar fugas en dichas zonas con las variables hidráulicas establecidas es alta. Entre las 10 soluciones presentadas en cada simulación, sí se presentan diferencias y en efecto el número de nodos de fuga asignado cambia considerablemente la ubicación de los puntos. En otras palabras, los parámetros que se deben analizar y modificar para trabajar en el mejor ajuste son el tamaño de la población, el número de soluciones para cada optimización y el número de nodos de fuga, para observar una tendencia de los resultados.

Se comparó gráficamente los datos observados con los medidos por el programa, arrojando la nueva optimización para observar la igualación que se logró de las presiones, demanda y flujo sin los coeficientes emisores y el ajuste que logra tener detectando las fugas en los puntos dados (Figura 10 y 11).

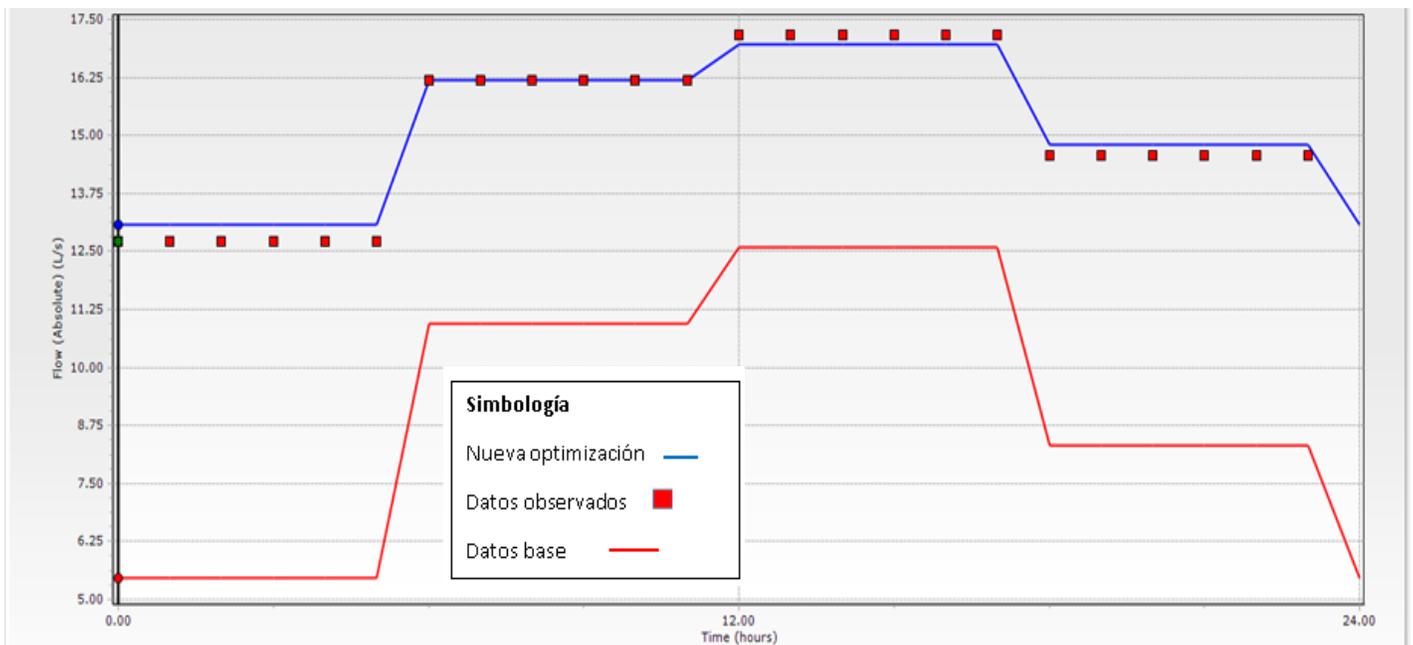


Figura 10. Optimización de flujo (WaterGEMS 2023).

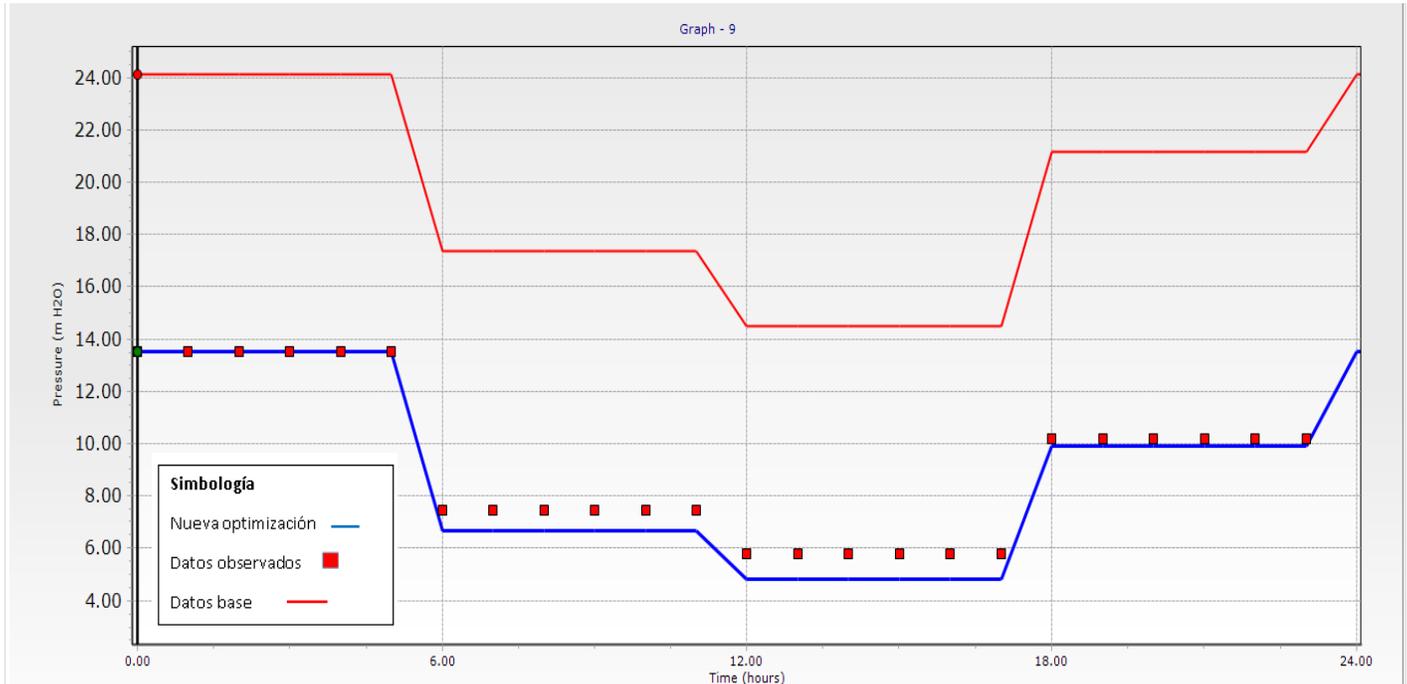


Figura 11. Optimización de presiones en horario de 24 horas (WaterGEMS 2023).

Considerando la EF calculada de cada escenario (Tabla 2) se sacó una EF promedio dando como resultado 60.2%, con un caudal promedio total suministrado a la red de 15.16 l/s, con 5.84 l/s de caudal perdido en promedio a lo largo del día, dado por la diferencia entre curvas (Figura 10). En el mejor de los casos al encontrar 3 fugas (red secundaria de la izquierda en la figura 9) de manera exacta, se podría recuperar un caudal de 3.20 l/s en promedio. Bajando el caudal suministrado a 11.96 l/s y con ello se mejoraría la EF, alcanzado un valor de 77.90%.

Conclusiones

Actualmente, la localización de fugas son un problema para la mayoría de los organismos operadores, ya que se cuenta con instrumentación para la detección de las mismas, pero involucra un gran tiempo de trabajo en función de la extensión de la red de distribución, además de la cantidad de trabajadores que se requerirían para ello.

Con este trabajo se pudo llegar a una solución muy factible por medio de calibración en WaterGEMS para implementar en la ubicación de fugas de una red de distribución, pasando a realizar la búsqueda a una zona prioritaria de búsqueda, donde se presenten los emisores de mayor tamaño, y donde la tendencia de las simulaciones de calibración, muestren fugas de manera repetitiva.

Con los resultados obtenidos se pudo identificar la detección de fugas en la red experimental que en un inicio se simulaban 4 zonas de pérdidas de agua, las mismas que el programa detectó y de manera exacta en 3 de ellas. Por primera vez se estuvo trabajando con toda la red experimental de la Perlita, obteniendo 3 fugas en el sector donde se tenían más fugas localizadas, lo cual fue una excelente calibración ya que se puede verificar que esta modelación por medio de calibración es una buena opción para aplicarla considerando

realizar las actividades descritas en este proyecto, desde el trabajo de campo, medición de variables hidráulicas, realización del modelo numérico y aplicación de la búsqueda de fugas.

La implementación de programas de cómputo especializados en el Funcionamiento Hidráulico que trabajan con métodos numéricos o algoritmos genéticos, como lo es WaterGEMS de Bentley, es una excelente alternativa para el análisis y control de pequeños o grandes sectores de redes de agua potable de las ciudades. En primera instancia a nivel municipio se puede implementar o sugerir esta herramienta para lograr mejoras por parte del Sistema de Abastecimiento de la Ciudad de Guanajuato, en la cual sabemos que existen dos factores importantes que influyen en la presencia de fugas: 1. Las distintas elevaciones que generan grandes presiones y 2. La existencia de tuberías con muchos años de antigüedad.

De esta forma, se podría alcanzar una mejoría en la Eficiencia Física (EF) a nivel Estado, como en el caso del presente ejemplo, se simuló una EF promedio de 60% y con la tendencia de las fugas más próximas a la simuladas en campo se podría mejorar una eficiencia al 78%, en el mejor de los casos, recuperando 3.20 l/s de caudal perdido, con sus repercusiones en lo social, ambiental y económico, que representa esa cantidad de agua.

Bibliografía

Alegre, H., Bapista, J.M., Cabrera, E., Jr., Cubillo, F., Duarte, P., Hirner, W., Merkel, W., and Parena, R. (2006). Performance Indicators for Water Supply Services, Manual of Best Practice Series, IWA Publishing, London, UK.

Burn S, De Silva D, Eiswirth M, Hunaidi O, Speers A, Thornton J (1999) Fugas en tuberías: desafíos y soluciones para el futuro. Pipas Wagga Wagga. Australia. 18 págs.

Caballero C. (2007). Análisis Experimental Del Rendimiento Hidráulico En El Abastecimiento De Agua. Veranos de Investigación Científica Universidad de Guanajuato.

CEAG (2019). Diagnóstico sectorial de agua potable y saneamiento. Comisión Estatal del Agua de Guanajuato, México.

Cervantes D. (2015.) Algoritmos Genéticos Para La Ubicación Óptima De Estaciones De Reinyección De Cloro En Redes De Abastecimiento De Agua Potable. Pág. 45-63

CONAGUA (2011). Programa de mejoramiento de eficiencias de Organismos Operadores. México.

CONAGUA (2015). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Datos Básicos Para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado.

CONAGUA (2015). Mejora de Eficiencia Física <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro39.pdf>

CONAGUA (2021). Estadística del Agua en México. <http://sina.conagua.gob.mx/sina/index.php?publicaciones=1>

CONAGUA, Comisión Nacional del Agua (2015). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Diseño de Redes de distribución de Agua Potable. México, D.F. Cap. 2 Componentes de una red de distribución. Pág. 11-71.

Hansen Rodríguez, P., & Rodríguez Varela, J. M. (2019). Indicadores de gestión prioritarios en organismos operadores, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. <http://repositorio.imta.mx/handle/20.500.12013/2221>

Ladino-Moreno, E. O., García-Ubaque, C. A. y García-Vaca, M. C. (2022). Estimación de fugas en tuberías a presión para sistemas de agua potable mediante redes neuronales artificiales y Epanet. *Revista Científica*, 43(1), 2-19.

Váldez C. (1990). *Abastecimiento de Agua Potable*. Primera edición. Cap. 6 Conducción.

Ziegler, D., Fallis, P., Hübschen, K., Oertlé, E., Klingrl, P., Knobloch A., Baader, J., & Trujillo, R.,Laures C. (2011). *Guía para la reducción de pérdidas de agua. Un enfoque en la gestión de la presión*. Eschborn, Alemania.