

“DISEÑO Y EVALUACIÓN DE DISTRITOS HIDROMÉTRICOS EN REDES DE AGUA POTABLE”

Leonel H. Ochoa Alejo (1)

(1) Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA); Paseo Cuauhnáhuac No. 8532, Jiutepec, México, C.P. 62550; Tel. 52-777-329-3600; Email: Leonel_ochoa@tlaloc.imta.mx

RESUMEN

Los distritos hidrométricos, DH's, (en inglés: *DistrictMeteredArea*) son zonas de una red de distribución de agua potable que se aíslan temporalmente para realizar la gestión de fugas. En este artículo se presentan los procedimientos recomendados para implementar los DH's, específicamente sobre su diseño y construcción, y la aplicación de pruebas de evaluación de fugas. Se muestran algunos casos reales de estudio sucedidos en México, para ejemplificar los métodos expuestos. Los resultados muestran que es necesario simular el funcionamiento hidráulico de la red con el cierre de los DH's, para garantizar que su aislamiento no ocasione problemas de desabasto de agua en las áreas adyacentes. También, se demuestra la importancia del diseño de las estaciones de aforo y la selección de medidores. Finalmente, se anota que la Eficiencia Volumétrica de los DH's se puede realizar con cinco métodos: Auditoría de fugas de corta duración, consumo mínimo nocturno, medición con subdivisión nocturna, caudal mínimo sin consumo e indicador de fugas estructural; con la finalidad de solventar la dificultad que se tiene en la estimación de los consumos de agua de los usuarios durante las pruebas.

Palabras claves: Distrito hidrométrico, fugas de agua, Eficiencia Volumétrica, redes agua.

ABSTRACT

Districts Metered Area, DMA's, (in Spanish: *DistrictosHidrométricos*) are areas of a distribution network of drinking water that are isolated temporarily for leakage management. In this paper the recommended procedures for implementing the DMA's, specifically on its design and construction, and application of leakage assessment tests. It shows some real case studies occurred in Mexico, to illustrate the methods described. The results show that it is necessary to simulate the hydraulic performance of the network with the closure of DMA's, to ensure that your privacy will not cause water shortage problems in adjacent areas. Also, it demonstrates the importance of design of measurement stations and meter selection. Finally, it is noted that the volumetric efficiency of the DMA's can be realized with five methods: Audit leakage of short duration, minimum nocturnal measurement, subdivision nocturnal minimum flow without consumption and leak structural order to solve the have difficulty in estimating water consumption during the test users.

Key words: District hydrometric, water leaks, volumetric efficiency, water networks.

SOBRE EL AUTOR PRINCIPAL

Autor: Doctor en ingeniería por la Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM. 34 años de trabajo profesional en sistemas hidráulicos urbanos y flujo a presión. Autor de 54 artículos en congresos y revistas. Profesor de hidráulica urbana y de fenómenos transitorios, UNAM. Profesor invitado por la Universidad Politécnica de Valencia, Universidad de Guanajuato, Universidad de Zacatecas, Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey. Actualmente es especialista en Hidráulica en el IMTA.

INTRODUCCIÓN

En el año de 1980 la industria del agua potable del Reino Unido propuso una técnica para dividir la red de distribución de agua potable en áreas más pequeñas, aisladas unas de otras hidráulicamente, con la intención de mejorar la gestión del control de las fugas. El documento oficial de esta propuesta fue el “Report 26 Leakage Control Policy&Practice, (UK Water Authorities Association, 1980)”. Las áreas divididas fueron llamadas “District Metered Area (DMA)”; en el idioma español se les conoce como Distritos Hidrométricos (DH).

Desde entonces, varias empresas de agua reportan estar trabajando en la gestión de las pérdidas reales desde finales de la década de los 80's; durante los 90's hubo un auge en la conformación distritos hidrométricos (DH) para facilitar la reducción de pérdidas. En general, se observa que los resultados más exitosos y notables se empiezan a dar durante los últimos diez años.

En términos generales la propuesta original sobre la conformación de distritos hidrométricos no ha cambiado sustancialmente durante sus tres décadas de existencia. Por ello, los éxitos recientes pueden ser adjudicados principalmente a dos factores: a) A las experiencias (buenas y negativas) que se tuvieron durante los primeros esfuerzos realizados para reducir las pérdidas reales en los sistemas de agua potable; b) A las modernas herramientas tecnológicas, cada vez más eficaces y eficientes, que no estaban disponibles anteriormente.

En los últimos diez años se ha afianzado la técnica como la mejor práctica en la gestión de las pérdidas de los sistemas de agua potable. Es por ello que, en este artículo se expone la experiencia del autor sobre esta técnica de DH; se presentan en primer lugar los principales criterios prácticos para conformarlos en la red de distribución de agua potable, con la ayuda de un modelo de simulación hidráulica, y en segundo lugar, se analizan los métodos de evaluación de la ocurrencia de fugas que más efectividad han demostrado en México.

FUNDAMENTOS DE LOS DISTRITOS HIDROMÉTRICOS

Los distritos hidrométricos, DHs, son áreas de la red de distribución que pueden independizarse hidráulicamente unas de otras en forma temporal o permanente, por medio de maniobras en las válvulas de seccionamiento, con la finalidad de realizar estudios de fugas (figura 1).

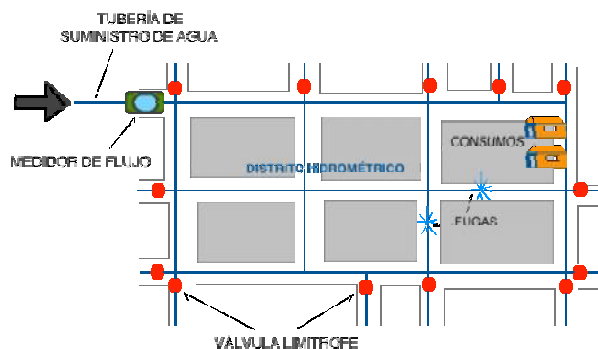


Figura 1. Distrito hidrométrico en una red de agua potable

Al cerrar las válvulas que delimitan cualquier distrito hidrométrico, el agua que entra por la tubería de suministro tiene dos destinos: a) Consumo de agua de los usuarios y b) Fugas en la red de distribución.

Desde esta perspectiva, las fugas en un distrito hidrométrico se calculan con la diferencia del volumen de agua suministrado, menos el agua consumida por los usuarios, en un período de tiempo dado.

$$Fugas = Agua suministrada - Agua consumida \quad (1)$$

Esto implica que se debe establecer un cálculo exacto del volumen de agua que ingresa y del agua que se consume, en un tiempo perfectamente definido. Por ejemplo, si el período seleccionado para el análisis inicia a las 10:00 horas del día 3 de abril y termina exactamente a las 10:00 horas del día 4 de abril, el volumen suministrado deberá ser precisamente la diferencia de la lectura final del medidor, menos la lectura inicial, registradas a las 10:00 horas. Similarmente, el volumen de consumo será igual a la suma de los consumos de todos los usuarios conectados en el DH, registrados entre las 10:00 del primero al segundo día del análisis.

En la práctica el registro del agua suministrada se obtiene fácilmente si se instala un medidor de caudal con registro continuo. Sin embargo, la estimación del agua consumida es complicada, debido a lo siguiente:

- En un DH hay una gran cantidad de usuarios y se dificulta realizar las lecturas simultáneamente y exactamente en la hora de inicio y finalización del período de estudio.
- Algunas veces existen usuarios que no tienen medidor o está descompuesto.

- Durante la prueba, varios de los usuarios con medidor no se encuentran en los domicilios o no permiten el acceso a su propiedad.
- Los medidores instalados pueden estar desajustados y arrojar errores de exactitud.
- El personal de lectura puede cometer errores de registro y procesamiento de datos.

Por lo tanto, se han desarrollado métodos alternativos para resolver estos problemas y robustecer las pruebas en los DHs, como el muestreo de campo, análisis en períodos prolongados, monitoreo continuo de caudales mínimos, pruebas con cierre de conexiones domiciliarias, etc.

Cuando se conforma un distrito hidrométrico, el cierre de válvulas para su aislamiento puede ocasionar que las áreas adyacentes de la red de distribución sean alteradas hidráulicamente. Se pueden presentar disminuciones de presión y de caudal, dejando incluso sin servicio de agua a algunos usuarios de la red.

En estas circunstancias, es indispensable que se elabore una planeación y diseño de los distritos hidrométricos, soportado con un análisis en un modelo de simulación hidráulica, antes de ejecutar las pruebas y la construcción y equipamiento de la estación de aforo, con el fin de disminuir al máximo las afectaciones y prevenir las adecuaciones constructivas correspondientes.

PLANEACIÓN Y DISEÑO DE DISTRITOS HIDROMÉTRICOS

La planeación y diseño de los distritos hidrométricos se soporta con un modelo de simulación hidráulica de la red, para analizar su operación conjunta, optimizar su ubicación, minimizar el número de válvulas de cierre, elegir la tubería de suministro y garantizar su funcionamiento hidráulico. Para realizar esta tarea aplica el procedimiento que se describe a continuación:

Paso a) En el plano de la red se exploran las posibilidades de ubicar distritos hidrométricos, bajo las reglas y recomendaciones siguientes (Hueb, 1985):

- El tamaño del distrito debe tener entre 500 y 3,000 conexiones, o entre 5 y 25 kilómetros de longitud de red.
- En zonas donde se sospeche que hay una alta incidencia de fugas, el distrito hidrométrico debe tender a ser de menor tamaño.

- Los límites del DH deben coincidir con divisiones urbanas naturales, como son líneas de ferrocarril, carreteras, avenidas, ríos, canales, playas, lagos, etc. También, se consideran importantes las fronteras hidráulicas de la red para delimitar el DH.
- Al quedar aislado el DH, la red interna y externa debe tener presiones mínimas de 1 kg/cm^2 , aún en horas de máximo consumo.
- Se debe disponer solamente una tubería de suministro al DH. No obstante, si no se logra cumplir con esta restricción, entonces se eligen dos o tres suministros como máximo. En casos extraordinarios es posible que se esté obligado a elegir una tubería de salida de agua del DH. No hay que olvidar que en cada uno de estos puntos de suministro o salida de agua representa una estación de aforo, que implica construcción, tiempo y costo adicionales.
- El aislamiento del DH debe ser ejecutado con el mínimo de cortes de tuberías o cierres de válvulas.

Como ejemplo, se presenta el caso de la ciudad de Zihuatanejo, México, donde se definieron varios distritos hidrométricos dentro de seis sectores de la red de distribución de agua potable, un ejemplo de dos DHs ubicados dentro del sector SH-2, se muestra en la figura 2.



Figura 2. Vista de dos DHs ubicados dentro del sector SH-2 de la ciudad de Zihuatanejo, México.

Fuente: Proyecto de asesoría y supervisión de la implementación del proyecto de eficiencia hidráulica del sistema de agua potable de Zihuatanejo, Gro.," Informe, CAPAZ-SHIPSA, Enero 2007, México.

Los detalles de los DHs conformados en el modelo de simulación hidráulica se presentan en la figura 3, donde se han señalado sus límites, las válvulas a cerrar y cortes de tuberías para su aislamiento, y la posición de la estación de aforo.

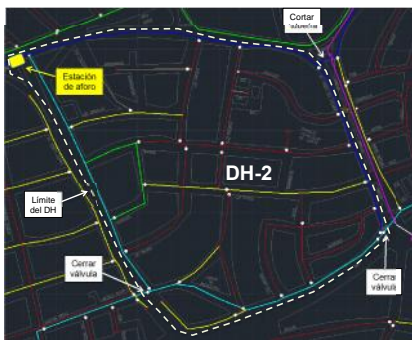


Figura 3. Detalles de los DHs de Zihuatanejo en el modelo de simulación hidráulica.

Paso b) Después de ubicar los distritos hidrométricos, es necesario que se simulen en el modelo hidráulico para investigar si con los aislamientos propuestos se afecta el servicio de agua a los alrededores y dentro de los propios distritos hidrométricos. En la ciudad de Zihuatanejo, los resultados del análisis con el modelo hidráulico indicaron que el aislamiento del DH-1 no causa alteraciones importantes de las presiones y caudales de la zona (figura 4).

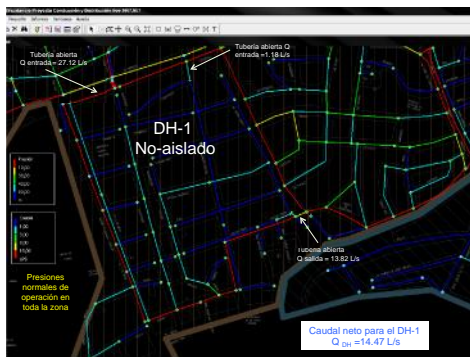


Figura 4. Análisis hidráulico del DH-1 de Zihuatanejo, sin y con aislamiento físico, respectivamente.

En cambio, al aislar el DH-2 sí se suspende el servicio de agua en algunas zonas adyacentes y las presiones disminuyen en forma considerable, como se muestra en la figura 5.

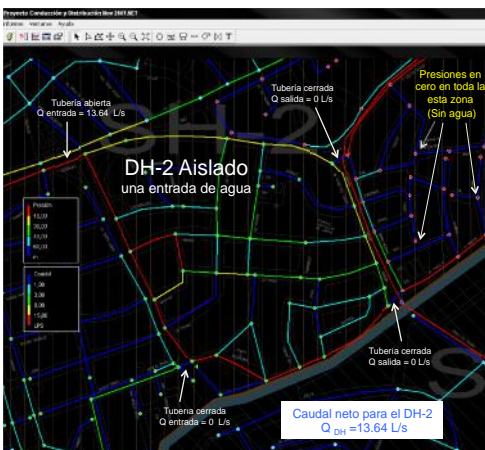


Figura 5. Análisis hidráulico del DH-2 de Zihuatanejo, sin y con aislamiento físico, respectivamente.

Si sucede un problema como en el caso anterior del DH-2, en donde se deja sin servicio de agua a otros usuarios fuera del distrito, se debe entonces probar con otras entradas de agua o bien dejar una salida de agua para suministrar agua a la otra zona de la red. Es importante recordar que en cada salida y entrada

de agua al DH se debe instalar una estación de aforo, para poder realizar las pruebas posteriores. En el caso anterior de Zihuatanejo, una solución viable para el DH-2 fue dejar salir el agua por alguna de las tuberías que conectan al distrito con el resto de la red, como se muestra en la figura 6.

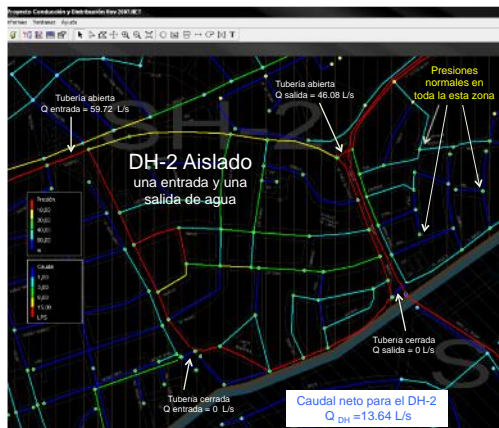


Figura 6. Análisis hidráulico del DH-2 de Zihuatanejo, aislado pero con una entrada y una salida de agua.

Como se observa en la figura 6, con esta solución de agregar una estación de salida de caudal, las presiones se normalizan y no se afecta el funcionamiento de otras áreas de la red de distribución de agua potable.

Paso c) Una vez que se concluya con la ubicación y análisis de todos distritos hidrométricos, se realiza diseño de las obras de aislamiento y estaciones de aforo, y se dibuja en un plano los DHs, con los detalles constructivos y cantidades de obra, señalando las válvulas que deben cerrarse durante las pruebas para lograr los aislamientos (figura 7).

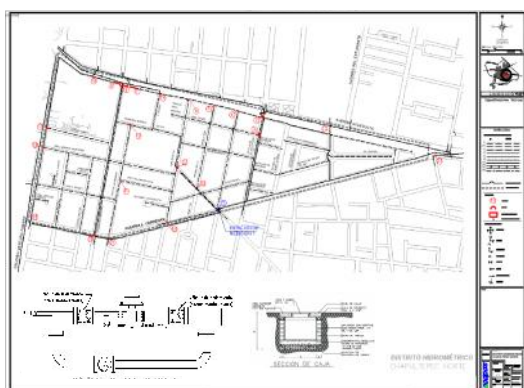


Figura 7. Plano constructivo típico de un DH.

SELECCIÓN Y DISEÑO DE LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN Y MONITOREO EN LOS DHs

En cualquier situación, la medición del caudal suministrado al DH es indispensable para realizar los análisis de fugas en la red que lo conforma. Por ello, se requiere de mucho cuidado en la selección del equipo de medición y en las condiciones de su instalación.

Primordialmente, se recomienda colocar medidores fijos, que registren el caudal de manera continua en el tiempo. Esto implica elaborar el diseño y construcción de la estación de medición, para proteger los equipos del vandalismo y de los agentes físicos externos (figura 8). No obstante, en muchos sistemas de abastecimiento de agua potable, la colocación de equipos de medición fijos llega a ser tan numerosa y costosa que es preferible realizar las pruebas en los distritos hidrométricos con equipos de medición portátiles; de cualquier modo deben diseñarse y construirse estaciones de aforo, para su colocación temporal.



Figura 8. Estación de aforo de un DH con medidor de caudal fijo.

La selección y diseño de medidores no es una acción complicada, sin embargo se deben tomar varias precauciones para obtener resultados satisfactorios. Existen especificaciones de instalación para cada tipo de medidor, que deben ser respetadas para obtener un funcionamiento adecuado. Los medidores deben instalarse en tramos rectos de tuberías, donde el flujo no sea interferido por algún obstáculo, como por ejemplo: codos, reducciones, válvulas, etc. (figura 9).

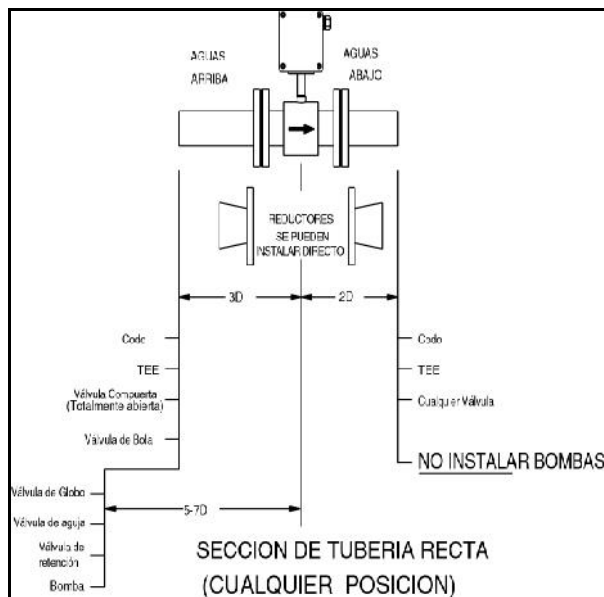


Figura 9. Distancias mínima para instalar un medidor de flujo electromagnético.

Fuente: Especificaciones técnicas, Badger Meter de las Américas, Año 2000, México.

MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE FUGAS EN DISTRITOS HIDROMÉTRICOS

Los métodos para la evaluación de fugas en distritos hidrométricos, que se presentan en este artículo, son los siguientes:

- Auditoria de fugas de corta duración
- Consumo mínimo nocturno
- Medición con subdivisión nocturna
- Caudal mínimo sin consumo
- Indicador de fugas estructural

Los cinco métodos están soportados con pruebas de campo, que se deben realizar a partir de que se ha comprobado el aislamiento físico del distrito hidrométrico. Enseguida se describen los procedimientos de aplicación de las pruebas.

a. Auditoria de fugas de corta duración

La auditoria de fugas de corta duración consiste en realizar un balance hídrico en un período de un días o máximo una semana.

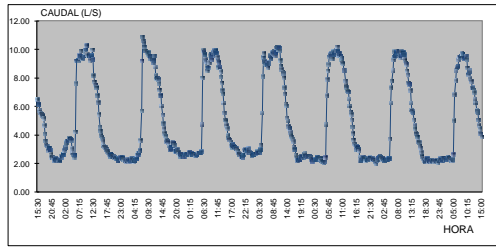
La prueba se aplica mediante el siguiente procedimiento:

- Cerrar la válvula de entrada de agua al DH, o apagar la bomba o re-bombeo, para que se detenga su abastecimiento de agua.
- Realizar el registro de lecturas en todos los medidores domiciliarios (lecturas iniciales).
- Abrir la válvula de suministro de agua, encender la bomba o re-bombeo y comenzar con el registro continuo de caudales.
- Dejar transcurrir el período elegido (24 horas, tres días o una semana).
- Cuando se cumpla exactamente el período establecido, se vuelve a detener el servicio de agua al DH, cerrando la válvula de entrada, apagando la bomba o re-bombeo.
- Registrar nuevamente las lecturas de los medidores domiciliarios (lecturas finales) y calcular el volumen suministrado en el período, a partir del registro continuo de caudales..
- Calcular el volumen de consumo de agua, restando las lecturas iniciales de las finales de medidores domiciliarios y sumando todas las diferencias.
- Calcular el valor de las fugas de agua, con la diferencia del volumen de agua suministrado en el período, menos el consumo total registrado (ecuación 1).

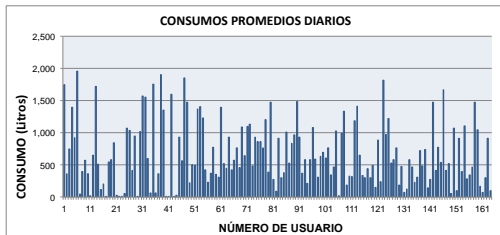
Aunque la prueba parece simple, en realidad es complicada su aplicación en campo, principalmente por la molestia de los usuarios, el acceso a todos los domicilios, el funcionamiento exacto de los medidores, entre otros. Por eso se deben tomar todas las precauciones, con avisos a los usuarios, revisión de medidores y equipos, etc.

En las gráficas de la figura 10 se presentan los resultados obtenidos en un estudio piloto en un DH de la ciudad de México, para evaluar los niveles de fugas en la red de abastecimiento de agua potable, aplicando la auditoria de fugas en un período de siete días, con opción de volumen promedio diario.





El volumen promedio diario de suministro de agua fue de 436,062 litros.



El volumen promedio diario de consumo de agua fue de 309,075 litros.

Figura 10. Resultados del DH de la ciudad de México.

Fuente: Proyecto de microsectores piloto para la obtención de parámetros del control de pérdidas de agua de la zona "a" en la Ciudad de México" Informe, Proactiva Medio Ambiente-SAPSA, Abril 2011, México.

En este caso, el volumen de fugas promedio diario resultó igual a:

$$Volumen_{Fugas} = 436,062 - 309,075 = 126,987 \text{ L}$$

Que representa el 29.1% de fugas, respecto al volumen suministrado.

b. Consumo mínimo nocturno

Como se ha visto, el cálculo de la auditoría de fugas en períodos cortos sobre DHs, proporciona los valores confiables de volúmenes de fugas, siempre y cuando se realicen todas las lecturas de los medidores domiciliarios y se tengan registros de caudales suministrados de manera simultánea.

Sin embargo, muchas veces es difícil o complicado disponer de esos datos, y mientras más grande sea el DH, las dificultades crecerán, a un grado tal que será prácticamente imposible realizar tales mediciones.

Una prueba alternativa que se puede aplicar es realizar una medición continua de caudales durante 24 horas, a la entrada de suministro de agua del DH, para analizar el comportamiento de los caudales mínimos nocturnos, e inferir el nivel de fugas existente en la red, a través del llamado "Índice de

Consumo Mínimo Nocturno, ICMN", que se calcula con la siguiente ecuación (Hueb, 1985):

$$ICMN = \frac{Q_{\text{mínimo}}}{Q_{\text{medio}}} \cdot 100 \quad (2)$$

Donde:

ICMN = Índice de consumo mínimo nocturno, en %

$Q_{\text{mínimo}}$ = Caudal mínimo nocturno, en L/s

Q_{medio} = Caudal medio, en L/s

En la figura 11 se muestra una gráfica típica de suministro de agua a un distrito hidrométrico, donde se observa que por la noche el valor del caudal disminuye, debido al bajo consumo de los usuarios, pero no llega a cero, lo cual indica que hay una posibilidad de fugas en la red.



Figura 11. Curva típica caudal registrada en un DH.

Fuente: "Sectorización de redes de agua potable" Comisión Nacional del Agua, julio de 2007, México

De acuerdo con los valores indicados en la gráfica de la figura 10, el valor del ICMN es:

$$ICMN = \frac{1.02}{1.72} \cdot 100 = 59.3\%$$

La teoría de la ICMN se basa en la hipótesis de que en la noche los usuarios duermen y sus consumos son muy pequeños, por lo que el caudal suministrado será aquel que escapa por las fugas de la red. No obstante, a la fecha hay pocos estudios que confirman esta hipótesis, generalmente se cumple en DHs con usos domésticos, con medición al 100%, sin depósitos y problemas de fugas dentro de las casas, redes con servicio de agua continuo y donde no existen usos fraudulentos.

El valor de la ICMN es solamente un indicador del tamaño del problema de fugas, si el ICMN es mayor al 20% quiere decir que en la red del sector hay un nivel importante de fugas y que es necesario realizar una búsqueda de las mismas de manera intensiva

(Ochoa y Bourguett, 1998). En ningún caso, se debe interpretar que el valor del *ICMN* expresa el porcentaje de volumen de fugas en un DH, respecto al volumen suministrado de agua.

Cuando existen consumos industriales, comerciales, hospitales, hoteles o de servicios públicos importantes, aunado a la existencia de depósitos en los domicilios, el *ICMN* debe ser determinado con la ecuación siguiente:

$$ICMN_{I-S} = \frac{Q_{min} - I_{nocturno} - S_{llenado}}{Q_{medio} - I_{medio} - S_{medio}} \times 100 \quad (3)$$

Donde:

- Q_{min} = Caudal mínimo que entra al DH (l/s)
- $I_{nocturno}$ = Consumo industrial nocturno medido (l/s)
- $S_{llenado}$ = Caudal nocturno de llenado de tanques (l/s)
- Q_{medio} = Caudal medio diario de entrada (l/s)
- I_{medio} = Caudal medio diario industrial (l/s)
- S_{medio} = Caudal medio diario de llenado de depósitos (l/s)

En redes con servicio de agua discontinuo, se recomienda que se mantenga el suministro continuo de agua al DH de 24 a 48 horas antes de realizar las mediciones de caudal, para lograr una estabilización en los consumos en aquellas zonas que han interrumpido su servicio previamente.

Existen diversas variantes en la aplicación de la teoría de consumo mínimo nocturno en redes de agua potable. Se utiliza para monitorear en forma permanente el comportamiento típico de un distrito durante un tiempo prolongado, observando el *ICMN* es posible identificar algún cambio provocado por la aparición de una nueva fuga en la red, o bien para ir evaluando el *ICMN* ante un programa de reducción de fugas.

3. Medición con subdivisión nocturna

Si en el sector o DH que se tenga bajo estudio, hay una sospecha importante de la existencia de fugas y se desea puntualizar las zonas que tienen más problemas, se puede usar una técnica complementaria de medición y análisis.

La técnica consiste en cerrar temporalmente las válvulas internas, para formar pequeñas zonas dentro del distrito hidrométrico, y medir el caudal de agua suministrada durante estos cierres (*Hueb, 1985*). Es deseable que se realice la prueba durante la noche para obtener mejores resultados.

En la figura 12 se muestra el ejemplo de un distrito de la ciudad de Monclova, México, donde se observa que el caudal suministrado al sector disminuye conforme se van cerrando las válvulas que impiden el paso de agua hacia las sub-zonas del DH.

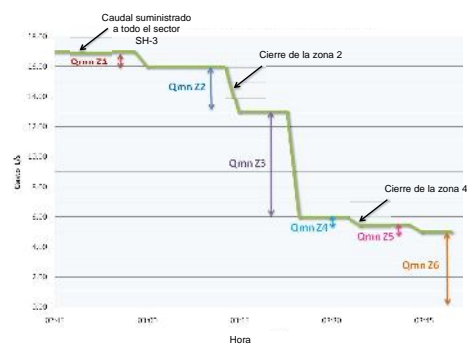


Figura 12. Registros de medición de caudal en un DH subdividido por la noche en seis zonas.

Fuente: Proyecto de puesta en operación del distrito hidrométrico SH-3 de Monclova, Coahuila”, Informe, SIMAS-WATERGY, Junio 2008, México

Para analizar los resultados de mediciones entre las zonas y observar su incidencia de fugas, primero se calcula el consumo específico límite nocturno, CEL, en L/s/km, representativo del DH, el cual depende de caudal mínimo nocturno (CMN), la longitud de la red (L) y el porcentaje de entrega de agua a los usuarios, denominado como *E*:

$$E = \frac{CMN - Fugas}{CMN} \times 100 \quad (4)$$

El valor de *E* puede ser obtenido de la primera medición nocturna en el sector; la variable “*Fugas*” es el valor del caudal de fugas ocurrido durante la noche, en L/s.

Para el caso de la ciudad de Monclova los valores obtenidos en la prueba de mínimo nocturno fueron: $E=63.71$, $CMN=17$ L/s y la longitud total de la red del sector es de 25.79 km, por lo que el valor CEL correspondiente a esta prueba resultó igual a:

$$CEL = \frac{E \times CMN}{L} = \frac{63.71 \times 17}{25.79} = 0.42 \frac{L}{s \text{ km}}$$

Después, se calculan los consumos específicos nocturnos para cada zona en la que se dividió el DH, CEN , con la ecuación:

$$CEN = \frac{\text{Caudal Nocturno de la zona } i \text{ (L/s)}}{\text{Longitud de red de la zona } i \text{ (km)}} \quad (5)$$

Luego comparan los CEN de cada zona con el CEL del distrito hidrométrico. Si el CEN es mayor que el CEL , la zona tiene un nivel importante de fugas y es necesario realizar una localización intensiva de ellas. En la tabla 1 a 3 se muestran los resultados para el distrito hidrométrico SH-3 de la red de Monclova, México.

Tabla 1. Registro de división nocturna del distrito hidrométrico SH-3 en Monclova.

Identificación de válvula	Diam	Vueltas	Cierre	Q (L/s) registrado	Q (L/s) Por zona
Estado inicial			02:45	17.00	
Alimentación colonia Salinas y Rogelio Montemayor	2"	9	03:00	16.00	1.00
Alimentación colonia Obreras 3er Sector	8"	18	03:15	13.00	3.00
Alimentación colonia Asturias	6"	35	03:25	6.00	7.00
Alimentación Zona industrial	8"	35	03:35	5.50	0.50
Alimentación Eva Samano	4"	22	03:45	5.00	0.50

Tabla 2. Valores del CEN en el distrito hidrométrico SH-3 en Monclova.

Zona	Q (L/s) por zona	Longitud de zona (km)	CEN por zona
Z1	1.00	2.88	0.347
Z2	3.00	3.74	0.802
Z3	7.00	11.02	0.635
Z4	0.50	0.62	0.806
Z5	0.50	1.42	0.352
Z6	5.00	6.06	0.825

Tabla 3. Comparación de valores del CEN con el CEL del distrito hidrométrico SH-3 en Monclova.

Zona	CEN	CEL del SH3	Fugas
Z1	0.347	0.42	No
Z2	0.802	0.42	SÍ
Z3	0.635	0.42	SÍ
Z4	0.806	0.42	SÍ
Z5	0.352	0.42	NO
Z6	0.825	0.42	SÍ

Se observa que de todo el distrito hidrométrico SH-3 de Monclova, las zonas Z1 y Z5 no tienen fugas importantes, por lo que los esfuerzos de búsqueda se

deben concentrar en las otras zonas donde el CEN fue mayor que el CEL .

4. Caudal mínimo sin consumo

La prueba de caudal mínimo sin consumo consiste en medir el caudal mínimo, L/s, suministrado al DH durante un período corto, menor a 24 horas, mientras son cerradas sistemáticamente las llaves de todas las conexiones domiciliarias de los usuarios conectados a la red dentro de la delimitación de dicho DH.

La evaluación del nivel de fugas con esta prueba se realiza aplicando siguiente expresión:

$$I_{fugas} = \frac{Q_{\text{Mínimo sin consumo}} (L/s)}{Q_{\text{Medio}} (L/s)} \cdot 100 \quad (6)$$

Donde I_{fugas} es el valor designado como indicador del nivel de fugas en porcentaje; $Q_{\text{mínimo sin consumo}}$ es el gasto mínimo estabilizado en el momento en que el mayor número conexiones domiciliarias posibles han sido cerradas; Q_{medio} es el caudal promedio obtenido de la medición continua de caudal sin cierre de conexiones. Con el indicador I_{fugas} se evalúa entonces la hermeticidad volumétrica de la red

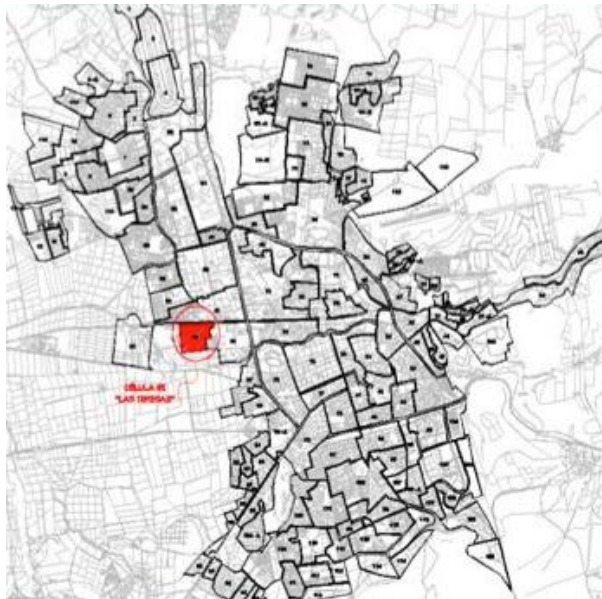
El valor que se obtenga de I_{fugas} , se compara con el porcentaje mínimo permisible de fugas, si el porcentaje llega a ser mayor al permisible, se tendrá que hacer recorridos para la búsqueda de las fugas.

Como es de esperar, esta prueba causa molestias a los usuarios del sector, debido a la falta del servicio de agua, por lo que uno o dos días antes debes promover una campaña de apoyo por medio de volantes escritos y anuncios en los medios de comunicación.

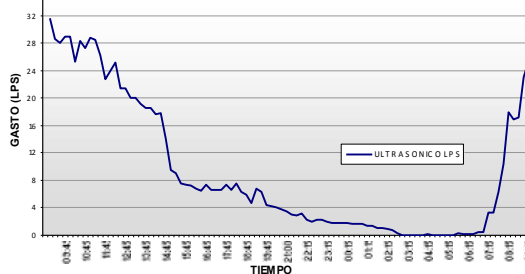
En la figura 13 se presentan los resultados de una de las pruebas de caudal mínimo sin consumo, realizadas en uno de los DH de la red de agua potable de la ciudad de Querétaro, México. Entonces el indicador de fugas se calcula como sigue:

$$I_{fugas} = \frac{2.2}{20.62} \cdot 100 = 10.67\%$$

Se observa que el índice de fugas es menor al 20% que la empresa de agua fijó como permisible, por lo tanto el DH no tiene un nivel de fugas considerable.



Medición continua de caudal antes de la prueba (sin cierre de conexiones domiciliarias) $Q_{\text{medio}} = 20.62 \text{ L/S}$



Medición continua de caudal (con el cierre de conexiones domiciliarias) $Q_{\text{mínimo sin consumo}} = 2.2 \text{ L/s}$

Figura 13. Resultados de la prueba de consumo mínimo en un DH de Querétaro.

Fuente: Proyecto supervisión del aseguramiento de la calidad del programa de mejoramiento de eficiencia de células de la ciudad de Santiago de Querétaro” Informe, CEA-IMTA, Mzo. 2003, México

5. Indicador de fugas estructural

La evaluación de la eficiencia volumétrica o niveles de fugas en los DH determinada con las pruebas anteriores, refleja en buena medida la capacidad que tiene un sistema de abastecimiento para entregar el agua suministrada a la red hasta los usuarios y la magnitud del volumen de las fugas existentes. Sin embargo, el valor de los niveles de fugas no

manifiesta de manera exacta el grado de deterioro de las tuberías, conexiones domiciliarias y otros elementos del sistema, ni considera la dimensión del DH.

Por esta razón, es necesario que se apliquen indicadores que dependan de la longitud, la presión media, el tiempo de servicio y el número de tomas domiciliarias que tiene la red de distribución. La *International Water Association* (IWA) recomienda la utilización del *Índice de Fugas Estructural* (IFE) que se calcula mediante la siguiente ecuación en el DH:

$$IFE = \frac{VIF}{UMF} = \frac{\frac{V_{if}}{dN_t}}{\frac{(A L_r + B N_t + C L_t) \rho}{N_t}} \quad (7)$$

Donde:

VIF = Indicador del volumen de fugas en el sector o DH, en L/acometida/día.

UMF = Umbral mínimo de fugas, en L/acometida/día.

V_{if} = Volumen anual de fugas, en litros, estimado con la auditoria de fugas de corta duración

d = Tiempo de operación del sistema de abastecimiento en el año, en días.

N_t = Número total de tomas domiciliarias registradas en el sector o DH

A, B y C = Constantes que ponderan la variable que acompañan y que han sido determinadas con un análisis estadístico de 20 países; $A=18 \text{ l/km.día.mca}$, $B = 0.8 \text{ L/toma.día.mca}$, $C=25 \text{ L/km.día.mca}$

L_r = Longitud total de las tuberías de la red del sector o DH, en km

L_t = Suma de las longitudes de todas las tomas domiciliarias, en km

ρ = Carga de presión media en la red de distribución, en m

Un valor del IFE igual a uno deberá ser interpretado como el estado físico óptimo deseable en un sector de la red de abastecimiento. En la medida en que este valor se incrementa, se interpreta que la red se encuentra más deteriorada.

A continuación se muestra un ejemplo sobre la comparación de dos valores del IFE , para una misma localidad en la que se ha logrado una reducción de fugas anual del 29.1% hasta el 25%. Las variables de las ecuaciones fueron tomadas de las mediciones realizadas antes y después de la reducción de fugas. Se observa que el IFE es mayor

si las fugas ocurren con mayores porcentajes en el sector.

Valores para un nivel de fugas del 29.1% del volumen anual suministrado:

$$IFE = \frac{46'350,255L}{\left(\frac{18 \cdot 2.444km}{465} + 0.8 + \frac{25 \cdot 2.79km}{465} \right) \cdot 8m} = 32.7$$

Valores para un nivel de fugas del 25.0 % del volumen anual suministrado:

$$IFE = \frac{39'790,931L}{\left(\frac{18 \cdot 2.444km}{465} + 0.8 + \frac{25 \cdot 2.79km}{465} \right) \cdot 8m} = 28.1$$

Se observa que el IFE está más alejado del umbral mínimo de fugas, para el caso de pérdidas de agua del 29.1%, que el de 25%.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los distritos hidrométricos, DH, son la principal estrategia en la gestión del control de fugas en los sistemas de agua potable. Para que los DH sean efectivos debe ser diseñados con el apoyo de un modelo de simulación hidráulica para evitar que su aislamiento provoque deficiencias hidráulicas en la red adyacente. El caso de la ciudad de Zihuatanejo presentado en el artículo es una demostración clara de lo que sucede si no se realizan con el modelo.

La evaluación de la eficiencia hidráulica y volumétrica en distritos hidrométricos es una actividad que se apoya en pruebas de campo, se realiza una vez que cada DH ha sido aislado e instrumentados con equipos de medición de caudal. Los métodos presentados ofrecen posibilidades de evaluar el nivel de fugas en el DH, el más acertado es el de la auditoría de corta duración, no obstante su aplicación se restringe a sistemas con medición al 100%, problema que persiste todavía en muchos países de Latinoamérica.

Se recomienda robustecer los métodos de evaluación, sobre todo en la verificación de los valores permisibles dados en cada uno de ellos. Asimismo, para el indicador de fugas estructural deben realizarse más pruebas locales, con la finalidad de extender valores de las constantes A, B y C.

Finalmente, se recomienda que cuando se determinan por primera vez los parámetros para evaluar la eficiencia hidráulica y volumétrica de sectores, se comparen con estándares establecidos en el ámbito internacional, en la medida en que se realicen nuevamente, la comparación se efectuará contra los anteriores, para observar los avances en el incremento de eficiencia logrados.

BIBLIOGRAFÍA

- Ochoa L., Bourguett V. (1998), Reducción Integral de Pérdidas de Agua Potable, volumen único, Segunda Edición, México, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA.
- Hueb J. A. (1985); Control de fugas en los sistemas de distribución de agua potable, Manual DTIA, No. C-7; Lima Perú, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente-CEPIS.
- Technical Working Group on Wase of Water, (1980), Leakage Control Policy & Practice,(Report 26), National Water Council UK Water Authorities Association.
- Wallace L.(1987), Water and Revenue Losses: Unaccounted for Water, Research Report Foundation december, Denver, AWWA.
- CONAGUA (2007), Sectorización de redes de agua potable, México, 2007.
- CAPAZ-SHIPSA (2007),Proyecto de asesoría y supervisión de la implementación del proyecto de eficiencia hidráulica del sistema de agua potable de Zihuatanejo, Gro., Zihuatanejo, México.
- PROACTIVA MEDIO AMBIENTE-SAPSA (2011), Proyecto de microsectores piloto para la obtención de parámetros del control de pérdidas de agua de la zona “a” en la ciudad de México, México D.F.
- SIMAS-WATERGY (2008), Proyecto de puesta en operación del distrito hidrométrico SH-3 de Monclova, Coahuila, Monclova, México.
- CEA-IMTA (2003), Proyecto supervisión del aseguramiento de la calidad del programa de mejoramiento de eficiencia de células de la ciudad de Santiago de Querétaro, Querétaro, México.