

Pérdidas de agua en los sistemas fluviales

Pedro Díaz
Jorge Quintero
Candidatos a graduación

Sinopsis

El propósito de este trabajo fue señalar los elementos que contribuyen a la pérdida indeterminada de agua en la Autoridad de Acueductos (AAA). Se proveen recomendaciones detalladas para reducir las pérdidas de agua en los diferentes sistemas de distribución de agua potable.

Abstract

In this paper we identify those elements that contribute to the undetermined water losses in the Puerto Rico Water and Sewers Authority. We also provide detailed recommendations to reduce these losses.

Introducción

El problema de la pérdida de agua en los sistemas fluviales ha coincidido con el desarrollo del suministro de agua y ha ocurrido siempre en los sistemas de acueductos en Puerto Rico. Aunque este problema se ha atendido a través de los años, el control de la pérdida de agua tiene hoy día mayor importancia que antes. El crecimiento continuo de la población en una era de vastos cambios económicos y sociales ha sido responsable del rápido y aparentemente interminable aumento en el consumo de agua. En los últimos años muchas compañías de acueductos han tenido dificultades en mantenerse al paso con el alto aumento en la demanda, por lo que ha habido escasez de agua en los momentos de mayor consumo. Esta situación ha ocasionado que la demanda por agua sobre la AAA haya aumentado a tal punto que se anticipan conflictos en las áreas donde las fuentes de agua disponibles son inadecuadas.

Díaz y Quintero/Pérdidas de agua en los sistemas fluviales

Toda vez que la pérdida indeterminada de agua en los sistemas de acueductos operados por la AAA en la isla contribuye grandemente al aumento en la demanda de agua, es inminente implantar un programa efectivo para aminorar la pérdida de agua a todos los niveles. En la medida en que aminoremos las pérdidas aumentará nuestra capacidad para satisfacer la demanda futura de agua.

I. Elementos que ocasionan pérdidas indeterminadas de agua potable en los sistemas de acueductos

Los elementos que ocasionan pérdidas indeterminadas de agua potable en los sistemas de acueductos son varios. En esta sección presentamos los orígenes y consecuencias de estas pérdidas. Para este propósito usamos como referencia los datos recopilados durante los años 1980-81, 1981-82 y 1982-83. La información de estos años la comparamos con la información recopilada en años más recientes.

A. Producción de agua potable

El agua potable que sirve la AAA proviene de diferentes fuentes de producción, tales como plantas de filtros, plantas de filtros compactas, plantas parciales, pozos y fuentes superficiales (Tabla 1). El aumento en la producción de agua potable en buena medida obedece a que en los últimos años se han construido nuevas facilidades para proveer agua potable y se han mejorado las facilidades de tratamiento de agua ya existentes.

Tabla 1. Fuentes de producción de agua potable (mgd)

Fuentes	1981	1982	1983	1989	1990	1991
Plantas filtros	263.040	271.780	281.860	301.648	290.930	299.562
Plantas filtros compactas	9.810	13.400	14.270	21.285	41.618	25.783
Plantas parciales	2.570	2.92	3.520	1.791	1.125	1.135
Fuentes superficiales	6.850	6.010	5.610	4.690	4.584	4.304
Pozos	77.090	79.42	82.420	81.556	77.371	78.621

Para efectos de la administración y operación de los sistemas de acueductos, la AAA divide la isla en seis distritos. Cada uno de estos distritos recopila información sobre su producción de agua. La tabla 2 presenta una relación de los valores de producción de agua por distrito durante los años fiscales 1981, 1982, 1983 y los de los años 1989, 1990 y 1991. Estos valores de producción incluyen el agua que la AAA utiliza para lavar filtros y otros menesteres. Aproximadamente un 7% del agua producida se usa para los fines antes mencionados.

Tabla 2. Producción de agua potable por distritos (mgd)

Distritos	1981	1982	1983	1989	1990	1991
San Juan	165.240	169.920	175.200	177.530	171.422	178.062
Arecibo	45.280	47.750	49.850	55.210	55.123	54.694
Mayaguez	44.580	43.840	44.540	43.500	45.026	47.811
Ponce	47.510	51.850	53.030	51.530	44.953	45.778
Guayama	21.170	21.290	21.170	25.000	25.762	27.392
Humacao	35.580	38.880	44.150	58.200	54.255	55.668

Los métodos que usa la AAA para obtener sus datos no son confiables. En muchos casos la producción de agua se estima por las capacidades de las bombas o por otros métodos, ya que muchas de las facilidades de producción de agua no tienen contadores para registrar el flujo o los contadores se encuentran defectuosos. Esta situación contribuye a las inexactitudes en los cálculos sobre las pérdidas indeterminadas de agua.

Como caso particular, en la inspección realizada en la Planta de Filtros Sergio Cuevas en Trujillo Alto, que tiene una capacidad de diseño de 60 millones de galones diarios (mgd), la producción de agua se estima a base de la capacidad del equipo de bombeo de agua de la represa de Carraízo. El Apéndice A presenta un método para estimar la producción de agua de esta planta.

Al inspeccionar la planta Sergio Cuevas se observaron pérdidas notables por las juntas de las piezas de conexión en las tuberías de salida para el sistema de distribución, por salideros en varias válvulas que

Díaz y Quintero/Pérdidas de agua en los sistemas fluviales

controlan el proceso de lavado de los filtros y por el desbordamiento del tanque que almacena el agua para el proceso de lavar los filtros. También observamos que había dos filtros en reparación. En el compartimiento de agua filtrada de los filtros en reparación se encontraban grandes depósitos de arena de filtro o antracita, que reducían la capacidad del compartimiento prácticamente a la mitad. La presencia de ésta arena de filtro en los sistemas de distribución disminuye el flujo hasta afectar el contador, lo que evita que registre el flujo. Esta situación es otro de los factores de la producción que contribuyen a la pérdida indeterminada de agua.

La situación en la planta Sergio Cuevas demuestra que hay una inexactitud en la producción de agua, lo que puede resultar en un registro por debajo o por encima del flujo. La inexactitud en la medición es uno de los factores que contribuyen a la pérdida de agua en los sistemas no se pueda determinar. También se debe señalar que los informes mensuales de producción de agua para los pozos demuestran que se estimó de un 73 a un 75%. Esto se debe a que, en su mayoría, los pozos no tienen contadores o los que hay están defectuosos.

Un informe publicado en la revista de la AWWA¹ menciona que la inexactitud en la medición de la producción de agua crea una contabilidad falsa de la pérdida de agua, lo que puede confundir los esfuerzos para controlar la pérdida indeterminada de agua. Una registro por debajo de lo real en el contador maestro puede indicar menos pérdida de la que está ocurriendo en realidad y puede dirigir a la complacencia. Un subregistro, por el contrario, indica una pérdida de agua que no ocurre y puede resultar en gastos innecesarios de inspección. Por consiguiente, los mecanismos usados para los contadores maestros deben seleccionarse cuidadosamente con relación a su exactitud a nivel de todas las escalas de flujo. Después de instalar estos mecanismos hay que inspeccionarlos regularmente. La frecuencia de inspección se determina por la experiencia para mantenerlos dentro de los límites de exactitud de diseño, de manera que la operación de

¹ Niemayer, H.W, 1956, Reducing Unaccounted-for Water by Continuous Leak Survey, Journal AWWA, 48: 1555

los contadores en las facilidades de producción sea esencial para monitorear y controlar las pérdidas indeterminadas de agua.

B. Consumo de agua potable

La AAA clasifica los principales usuarios de agua en la isla como abonados residenciales, comerciales, industriales y gubernamental además de agua usada en fuentes públicas y bocas de incendio (Tabla 3). El consumo residencial (doméstico) es el agua que se le supe a los hogares. Este consumo varía de acuerdo a las condiciones de vida de los consumidores, con un margen que generalmente se considera de 200 a 400 galones por día (gpd). Para una ciudad de tamaño medio se espera que el consumo residencial sea como el 50% del consumo total, pero si el consumo total es pequeño, la proporción es mayor.

Tabla 3. Consumo de agua potable por usuarios (mgd)

Usuarios	1980-81	1981-82	1982-83	1988-89	1989-90	1990-91
Residencial	159.900	169.920	175.200	177.530	171.422	178.062
Comercial	31.290	47.750	49.850	55.210	55.123	54.694
Industrial	15.070	43.840	44.540	43.500	45.026	47.811
Gubernamental	29.670	51.850	53.030	51.530	44.953	45.778
Fuentes públicas	1.4000	21.290	21.170	25.000	25.762	27.392
Bocas de incendio	10.810	38.880	44.150	58.200	54.255	55.668

El consumo comercial e industrial incluye menesteres humanos y agua para procesos industriales y comerciales. La cantidad de agua que se requiere para el uso industrial y comercial se ha relacionado con las áreas de piso de los edificios que se sirven. En ciudades de una población de más de 25,000 personas se puede esperar que el consumo comercial ascienda a casi el 15% del consumo total.

El consumo gubernamental es el de las diferentes dependencias del gobierno de Puerto Rico. El uso de agua por fuentes públicas y bocas de incendio se clasifica como el agua utilizada en incendios, lavado de calles, lavado de alcantarillados y otros usos ocasionales en lugares que carecen de

Díaz y Quintero/**Pérdidas de agua en los sistemas fluviales**

un sistema adecuado de acueductos. La AAA estima el agua usada para estos fines y no la cuenta como pérdida de agua.

La causa principal de la disminución en el consumo de agua por año fiscal puede deberse al aumento de las tarifas decretado por la AAA en enero de 1982. Este alza en las tarifas aparentemente creó conciencia en los usuarios de la necesidad de economizar agua. Otra de las razones es el aumento que ha ocurrido en el hurto de agua debido al aumento en las tarifas. Sobre este tema ampliaremos más adelante.

Los datos concernientes al consumo de agua provienen del Banco de Información de Estadísticas Generales y de los informes estadísticos mensuales de consumo de agua de la AAA. Los récords de consumo de agua para usos residenciales que mantiene la AAA son bastante confiables. Las muestras tomadas del informe estadístico mensual de consumo de agua revelan que solamente se estima el 2% de consumo residencial y el restante 98% del consumo de agua se contabiliza con los contadores que registran el flujo. El estudio reveló que solamente se estima el 7% del consumo de agua de los usuarios comerciales; el 100% del consumo de agua de los usuarios industriales se mide con los contadores. Los datos de consumo de agua demuestran que en la isla un 65% del agua la consumen los usuarios residenciales, el 12.5% el comercio, el 5.5% la industria, 11.5% el gobierno y el 5.5% del consumo de agua es de uso público.

En la actualidad la AAA no tiene un programa efectivo de mantenimiento y reparación de contadores. En una investigación realizada se determinó que solamente el 4% de los contadores se reparan anualmente, de un total aproximado de 850,000 contadores instalados alrededor de la isla. En su mayoría, los contadores se envían a reparar por gestiones que hacen los mismos usuarios al querrellarse a la agencia.

Estudios realizados en los Estados Unidos revelan que la principal causa de la pérdida indeterminada de agua es la inexactitud de los contadores que registran el consumo de agua, ya sea residencial, industrial o comercial debido a que los contadores registran por debajo del consumo.

El propósito de cuatro de estos estudios fue determinar el porcentaje de agua usada a diferentes niveles de velocidad del flujo pasando por el contador. Se demostró que el 23.2% del agua se usa a niveles de velocidad de 1 galón por minuto (gpm) o menos. Este es el nivel de velocidad en el cual los contadores registran de menos, ya que mientras menor es la velocidad, mayor es la inexactitud.

Se hizo otro estudio para determinar la pérdida de agua a través de contadores residenciales. Se usó el 3% del total de los contadores de un sistema de distribución. Los contadores probados estaban en un sistema en que el agua no es corrosiva y la arena y el polvillo no son un problema. Así que los resultados demostrarían lo máximo que se puede esperar de un contador. Los resultados obtenidos demuestran que el 20% de los contadores con más de nueve años de servicio no registran flujo a un nivel de velocidad de 3/4 de gpm.

Estos estudios demostraron que bajo las mejores condiciones posibles los contadores residenciales, comerciales e industriales no deben permanecer en servicio por más de ocho a diez años sin repararse. Si el agua es corrosiva o contiene arena y polvillo, este período debe ser menor. Por otro lado, si se descuidan los contadores hasta el punto de que el 5% de ellos no registre el uso de agua a niveles de velocidad menores de 3/4 de gpm, entonces tenemos una gran indeterminación de pérdida de agua.

C. Salideros en el sistema de distribución

Los salideros en los sistemas de distribución representan uno de los elementos más importantes de las pérdidas indeterminadas de agua en los sistemas de acueductos en la isla. Esta situación se debe a que las tuberías principales y las líneas de servicio están sujetas a tensiones por presiones de estructuras externas y sus posiciones cambian por movimientos de tierra causados cuando se asienta el terreno a su alrededor. Los defectos y puntos débiles en la tubería ceden y se forman salideros. Muchos de estos salideros salen a la superficie y pueden detectarse fácilmente, pero otros no salen a la superficie debido a drenajes subterráneos. Estos salideros subterráneos

Díaz y Quintero/Pérdidas de agua en los sistemas fluviales

son una de las causas principales de pérdida de agua y por lo tanto requieren atención constante para detectarlos. Otro de los factores que contribuyen a los salideros son los materiales y la mano de obra. El ajuste e instalación impropia de curvas, válvulas, líneas de servicio y piezas especiales contribuyen a que surjan salideros. El uso del material plástico de polietileno y polibutileno en las líneas de servicios ha ocasionado gran pérdida de agua en la isla.

Las presiones altas que se mantienen en algunos sistemas de distribución tienen una tendencia a crear más salideros al forzar quebraduras en las uniones de tuberías y causar desgaste en las piezas de conexión. Por lo tanto, hay una pérdida de agua mayor en los sistemas donde hay presiones altas que en los sistemas con condiciones de baja presión.

Durante nuestra investigación no pudimos recopilar datos de los salideros que la AAA repara anualmente ya que la AAA no mantiene récord de los salideros que las brigadas asignadas a las oficinas regionales de los distritos reparan. Esta situación no nos permitió establecer las causas de los salideros. De haberse recopilado estos datos se podrían hacer recomendaciones más detalladas para controlar la pérdida indeterminada de agua ocasionada por los salideros.

Los salideros de agua ocasionados por una rotura grande en una tubería pueden representar un alto porcentaje de pérdida de agua en un día. La pérdida de agua por muchos salideros pequeños puede ser equivalente a la de una rotura grande. No se puede despreciar ningún salidero por pequeño que sea, sino que deben localizarse y repararse en el preciso momento en que se originan. El tamaño de los salideros nunca disminuye, más bien crecen y con ellos aumenta la pérdida de agua. Siempre que se repara un salidero pequeño se elimina un potencial salidero grande y se ahorra una cantidad considerable de agua. Por lo tanto, se debe implantar un programa de inspección para detectar y localizar salideros en los sistemas de distribución para reducir la pérdida indeterminada de agua.

D. Salideros en líneas de servicio plásticas (acometidas)

Una de las causas de grandes pérdidas indeterminadas de agua en los sistemas de distribución en los últimos años en la isla son los salideros en las líneas de servicio plásticas de 1/2 y 3/4 de pulgada de diámetro. El material usado para estas líneas de servicio es de polietileno y polibutileno.

Los salideros en las líneas de servicio plásticas que conectan la tubería principal a los contadores parecen estar relacionadas con roturas, salideros de agujeros y grietas por la tensión en las líneas, ya sea por material defectuoso o instalación impropia. Esta situación ha conducido a la AAA a llevar una acción legal contra los fabricantes de este material.

Para los años 1972 al 1980, cuando el cobre se puso muy caro, la AAA aprobó la instalación de aproximadamente 97,844 líneas de servicio en tuberías de polietileno y polibutileno de 1/2 y 3/4 de pulgada de diámetro en toda la isla. En 1982 la AAA implantó un programa para reemplazar las líneas de servicio defectuosas que ocasionan grandes pérdidas de agua.

Informes sometidos en 1983, y otros más recientes, demuestran que la AAA ha reemplazado un total de 34,026 líneas de servicio de polietileno y polibutileno por cobre. Esta cifra representa un 34.78% de estas líneas. Un artículo publicado en la revista "ENR News" indica que varias ciudades de los Estados Unidos tienen problemas similares a los de Puerto Rico. La publicación menciona "que pruebas realizadas por dos suplidores de la tubería plástica no muestran degradación o violación a las normas de manufactura". Sin embargo las fallas se han incrementado a un nivel alto, 95% de ellas en las secciones curvas de la tubería en la transición desde lo profundo de la tubería principal a lugares poco profundos donde se encuentra la caja del contador. La mayoría de los oficiales de las corporaciones del agua de las ciudades culpan a los fabricantes de la tubería alegando material defectuoso como la causa. Pero algunos admiten que las prácticas impropias de instalación pueden estar detrás del problema.

Díaz y Quintero/Pérdidas de agua en los sistemas fluviales

Por otro lado, oficiales en muchas de las compañías que producen la tubería también señalan la colocación incorrecta de la tubería como una de las causas de las fallas. Sin embargo, un fabricante admite que las medidas de control de calidad del pasado no eran tan confiables como las del presente y que los problemas actuales pueden relacionarse con la tecnología subdesarrollada. La mayoría de las fallas resultan del uso de material que originalmente se pensó que resistiría presiones por largo término.

Independientemente de la causa de la pérdida indeterminada de agua por los salideros en las líneas de servicio plásticas, lo cierto es que el problema ha causado y continúa causando grandes pérdidas indeterminadas de agua en la isla. Esta situación hace evidente la necesidad de un programa abarcador y acelerado para evitar mayores pérdidas de agua en el futuro.

E. Hurto de agua potable

El hurto de agua es un elemento que contribuye a la pérdida indeterminada de agua. La cantidad perdida de esta forma no se sabe con exactitud y debe vigilarse para minimizarla. Los consumidores pueden obtener servicio de agua sin tener que pagar mediante conexiones a líneas de servicios antes del contador, instalación directa de niples en la línea del contador y manipulando los contadores. Se debe reconocer que el hurto de agua es un problema y proveer todos los medios necesarios para desalentarlo o evitarlo.

Investigaciones sin notificación previa que realiza la AAA desde el 1982 alrededor de toda la isla han demostrado que un total aproximado de 35,000 usuarios anualmente obtienen el servicio de agua potable que supe la agencia sin pagar por ella. De acuerdo a esta cifra, que suministró un alto oficial de la AAA, hay 20,000 usuarios que obtienen el servicio por medio de conexiones clandestinas y 15,000 usuarios con conexiones a líneas de servicio antes del contador, con pillos instalados en la línea del contador o que manipulan sus contadores.

Se presume que cada uno de estos usuarios tiene un consumo medio de 173.7 gpd. Este consumo se computa a base de un consumo mínimo de 40 metros cúbicos por cada periodo de facturación de 60 días, que es el que usa la AAA para estos casos. Los resultados demuestran que los usuarios no autorizados consumen 6.08 mgd. Esta cantidad representa una pérdida indeterminada de agua que varía de 1.6% a 1.7% del agua producida para cada año fiscal utilizado como base del estudio.

Ya que el hurto de agua es uno de los elementos que contribuye a la pérdida indeterminada de agua, la AAA debe mantener vigilancia continua para evitar esta práctica. Los lectores de contadores probablemente proveen uno de los mejores medios para detectar el hurto de agua, debido a que el lector está continuamente patrullando la utilería de la AAA.

F. Resumen de pérdidas indeterminadas de agua

Por lo discutido anteriormente se puede señalar que las deficiencias mayores en los datos deben estar en los valores de producción de agua que se reportan. Los datos usados para computar la pérdida económica de la AAA se tomaron de la tarifa decretada por la AAA, efectiva el 1 de enero de 1982. El cargo por el servicio de agua se computa a base de \$0.45 por cada metro cúbico de consumo de agua. Este precio se usó para los años fiscales 1981, 1982 y 1983; sin embargo, para los años fiscales 1990 y 1991 se usó \$0.60, que es el precio actual por metro cúbico de consumo. Las tablas 4 y 5 presentan una relación de las pérdidas intederminadas de agua potable por distritos y la pérdida económica que estos valores representan.

Tabla 4. Pérdida indeterminada de agua potable por distritos (mgd)

Distritos	1981	1982	1983	1989	1990	1991
San Juan	48.990	59.420	73.100	68.100	60.502	62.042
Arecibo	19.090	22.230	26.150	32.430	30.095	28.514
Mayaguez	14.570	15.020	18.100	17.240	16.376	17.841
Ponce	16.430	21.830	28.140	24.290	15.233	14.698
Guayama	6.550	7.630	8.250	11.710	11.782	12.772
Humacao	5.5900	9.500	16.930	31.980	25.555	25.638

Díaz y Quintero/Pérdidas de agua en los sistemas fluviales

II. Cómo reducir las pérdidas de agua potable en los sistemas de acueductos

Las fugas en un sistema de distribución tienen un impacto negativo en los ingresos y la imagen pública de la agencia. La pérdida de agua es proporcional al tamaño de la rotura en la tubería y al tiempo que lleva esta rotura. Además de la pérdida en ingreso, las roturas aumentan los costos de la mano de obra, materiales, planta física, productos químicos y gastos operacionales. La presión en los sistemas de distribución causa mayores o menores pérdidas. Estas pérdidas son directamente proporcionales a la cantidad de agua que se pierde a través de la rotura. Un sistema de distribución que cuente con un servicio para detectar, localizar y reparar las fugas es más eficiente que uno que carezca de éste y sus pérdidas de agua son menores.

Tabla 5. Costo de las pérdidas de agua potable por distritos (\$ x 10⁶)

Distritos	1981	1982	1983	1989	1990	1991
San Juan	30.45	36.94	45.44	29.57	26.27	26.94
Arecibo	11.87	13.82	16.26	14.08	13.07	12.38
Mayaguez	9.06	9.33	11.25	7.48	7.11	7.74
Ponce	10.21	13.57	17.49	10.54	6.61	6.38
Guayama	4.07	4.74	5.13	5.08	5.11	5.54
Humacao	3.47	5.91	10.52	13.88	11.09	11.13

A. Técnica de distritos pitométricos

Los distritos pitométricos son áreas de la red de distribución donde hay entre 2,000 y 5,000 abonados o acometidas de servicio. Estas áreas se pueden alimentar por una sola entrada, facilitando el detectar las pérdidas visibles y no visibles de la zona. Los distritos pitométricos también ayudan a investigar la efectividad de la facturación del área. Para implantar los distritos pitométricos se requiere que las válvulas del sistema de distribución del área escogida operen bien. Hay que localizar todas las válvulas; en el caso que los sectores no tengan válvulas hay que instalarlas y operarlas antes de proceder con las pruebas. También hay que levantar censos de cada

distrito pitométrico por calle.

Una red de distribución separada en distritos pitométricos alivia los inconvenientes de las reparaciones y las pruebas, ya que permite aislar el área a trabajarse. Esta práctica también ayuda a actualizar los planos de la agencia, pues es un requisito identificar todos los accesorios de la red, tales como válvulas, bocas de incendio, desvíos, puntos muertos y cambios que se realizaron sin catastrar. Una vez se subdivide la red de distribución en distritos pitométricos, éstos se evalúan continuamente, se analizan sus pérdidas y los salideros se localizan y reparan. Los distritos pitométricos o sectores de medición son parte de la red de distribución de una zona de presión y pueden independizarse hidráulicamente mediante maniobras en las válvulas o aislando los conductos con taponés para estudiar la distribución de consumos y de reducción de pérdidas.

Para aislar parte de la red de distribución se procede de tal forma que el distrito pitométrico formado de esta manera se abastezca, preferiblemente, por una sola entrada. Algunas veces esto no es posible, ya que es común encontrar distritos pitométricos con más de una entrada y, eventualmente, con una o más salidas. Una vez terminados los estudios de distribución de consumo y reducción de pérdidas en un distrito pitométrico, el distrito puede reintegrarse a la zona de presión por la simple apertura de las válvulas que lo aíslan.

El propósito principal de los distritos pitométricos es reducir las pérdidas de agua por concepto de fugas visibles y no visibles. Al aplicar esta técnica hay que mejorar la red de distribución para que opere eficientemente. Tales mejoras contribuyen significativamente a la eficiencia en la operación y mantenimiento de la red de distribución y consecuentemente reducen costos operacionales.

Cuando se elabora el proyecto de una red de distribución, muchas veces no se proveen válvulas en cantidad y disposición adecuada para aislar los distritos pitométricos, ni bocas de incendio en puntos estratégicos que permitan simular flujos de agua en periodos nocturnos. Además, tampoco

Díaz y Quintero/Pérdidas de agua en los sistemas fluviales

hay, en la mayoría de los casos, previsión de todas facilidades necesarias para implantar distritos pitométricos, como la instalación de dispositivos para la medición no permanente de caudales, presiones y otros.

Por otro lado, las limitaciones financieras en la fase de construcción, la falta de materiales o vicios de construcción o de los propios proyectos hacen que la red presente discontinuidades, muchos puntos muertos, interrupciones de la red primaria, falta de válvulas de paso y bocas de incendio, válvulas inoperables (enterradas o rotas), interconexión con redes de otras zonas de presión y otras. Todos estos aspectos son negativos y dificultan no solamente la ejecución de la técnica de los distritos pitométricos, sino también los trabajos de operación y mantenimiento de la red de distribución. Por esta razón, la AAA es blanco de críticas por parte de la población. En muchos casos las críticas son justificadas. Realizar un ensayo en distritos pitométricos es relativamente simple, siempre que la red de distribución haya sido proyectada y construida con las facilidades necesarias y previendo su operación para control de fugas.

La técnica de los distritos pitométricos permite lo siguiente:

- Detectar, localizar y reparar fugas no visibles económicamente detectables.
 - Identificar y reparar fugas visibles usando detectores de fugas
 - Localizar conexiones clandestinas que no son de bajo consumo, excepto en algunos casos esporádicos.
 - Mejorar la confiabilidad del catastro de la red de distribución.
 - Mantener las válvulas de paso y bocas de incendio. Al final de las pruebas al distrito las válvulas deben estar en perfecto estado. En el caso de las válvulas de paso, se prueba su hermeticidad y se corrigen las fugas a través del asiento y las ocasionadas por defectos en la empaquetadura. Estas investigaciones y trabajos en las válvulas son de fundamental importancia debido a los siguientes factores:
- Las válvulas de paso necesitan operarse periódicamente como mantenimiento preventivo. Esta operación, además de garantizar

mayor seguridad que la que se logra en una maniobra real, logra que las válvulas funcionen adecuadamente y ayuda a remover los materiales depositados en el asiento y en la guía de la compuerta (en el caso de válvulas de compuerta metálicas).

- La inspección minuciosa de las válvulas inoperantes que se retiran de la red proporciona valiosa e irrefutable información respecto a las causas del mal desempeño de las mismas. Esta información es fundamental para redactar las especificaciones de compra de nuevas válvulas, pruebas de recepción y desarrollo de los procesos de fabricación de las mismas.
- Cuando se ejecutan maniobras en la red y por olvido se dejan algunas válvulas de paso cerradas, surge una mayor pérdida de carga en las tuberías. Esto, a su vez, puede producir escasez de agua en algunas partes de la red de distribución.
- Cuando se realizan maniobras clásicas en la red de distribución (con la finalidad de aislar tramos para la reparación de fugas), frecuentemente se rompen algunas válvulas de paso y no se reportan al área de mantenimiento para que se tomen las debidas providencias. En la mayoría de casos la válvula se rompe en posición de cierre, probablemente debido a que el operador tenía la esperanza de que ajustando un poco más, conseguiría eliminar un eventual paso de agua. La válvula rota, en posición cerrada, restringe significativamente la capacidad de la red de distribución.

La aplicación de las técnicas de distritos pitométricos exige eliminar los puntos muertos, reforzar la red secundaria y complementar las redes primarias. Esto resulta en una mejor circulación de agua, menor pérdida de carga y mejor distribución y eliminación del agua sucia en los grifos de los usuarios.

Cuando se prepara un distrito pitométrico hay que revisar la ubicación de las válvulas de paso para asegurar que se puedan aislar tramos de red con 100 acometidas por calle. La ventaja principal de tal configuración consiste en que se puede sacar de servicio, para mantenimiento o para investigar fugas, una pequeña parte de la red de distribución que se desea

Díaz y Quintero/Pérdidas de agua en los sistemas fluviales

aislar. En esta práctica la zona afectada es mínima y la facturación prácticamente no se afecta, lo que mejora la calidad del servicio de la AAA. Las áreas con un número de conexiones entre 2,000 y 5,000 facilitan los trabajos.

Los consumos del distrito pitométrico quedan bien caracterizados cuando se determinan el consumo máximo, mínimo y medio del distrito pitométrico y el consumo mínimo nocturno de las diferentes subdivisiones de la red de distribución. Al determinar los consumos se obtiene valiosa información relativa al posible destino del agua en el interior del distrito pitométrico. La medida periódica de estos parámetros proporciona indicaciones en cuanto a:

- La tendencia del aumento en las pérdidas de agua
- El crecimiento del consumo como función del aumento del número de conexiones.
- El crecimiento del consumo debido a la industrialización del área
- El crecimiento del consumo "per cápita"
- La necesidad de obras de refuerzo de la red como función del crecimiento de las demandas.

Al comparar los consumos del distrito pitométrico con la facturación del Área de Servicios a Consumidores en dicho distrito se refleja un volumen de agua no contabilizada y un aumento o disminución en la facturación y en el consumo estimado.

1. Concepción de los distritos pitométricos

Los distritos pitométricos deben establecerse de forma tal que cumplan, mientras sea posible, con los siguientes requisitos:

- Tener el menor número posible de entradas y salidas y, siempre que sea posible, tener solamente una entrada y ninguna salida.
- El diámetro de la tubería de entrada debe ser compatible con el consumo esperado del distrito pitométrico. Como una pauta a seguir,

la velocidad media en el conducto debe ser superior a 0.40 metros por segundo (1.30 pies por segundo) durante las horas de consumo mínimo nocturno.

- Los límites del distrito pitométrico deben coincidir, siempre que sea posible, con las carreteras, grandes avenidas y ríos. Si esto no es posible, el distrito pitométrico debe tener capacidad para aislarse de la red de distribución al cerrar las válvulas de paso. Las redes de distribución, internas y externas al distrito pitométrico, deben mantener buena presión, aún en las horas de gran consumo.
- Estar dentro de los límites de una sola zona de presión y coincidir, si es posible, con la propia zona de presión.
- El número de conexiones del distrito debe estar entre 2,000 y 5,000. Es deseable que el tamaño de los distritos pitométricos no sea muy grande, debido a que puede haber un posible cambio en las características de consumo causado por industrias y otras conexiones que consumen agua durante el período nocturno.

Para darles prioridad a la implantación de los distritos pitométricos hay que considerar dos aspectos básicos:

- Que la red esté mal abastecida y se pueda resolver el problema al detectar, localizar y reparar las fugas
- Que la red sea antigua, esté hecha de material inadecuado y presente una gran cantidad de fugas

2. Proyectar distritos pitométricos

Proyectar un distrito pitométrico significa proponer obras y mejoras que cumplan con los requisitos definidos anteriormente. En el proyecto de un distrito pitométrico deben considerarse los siguientes aspectos:

- Eliminar los puntos muertos de la red
- Complementar y reforzar las tuberías primarias. Es muy común encontrar un tramo de la red primaria interrumpido o con una red secundaria en su lugar. Estas fallas tienen que eliminarse.

Díaz y Quintero/Pérdidas de agua en los sistemas fluviales

- Proyectar válvulas de paso que permitan el seccionar la red del distrito pitométrico en tramos de pequeña longitud (de menos de 100 acometidas)

El propósito de las estaciones pitométricas (puntos donde se instalarán los medidores de flujo) es el siguiente:

- Medir los consumos de todo el distrito pitométrico. Para medir los consumos se proveen estaciones pitométricas en las entradas y salidas del distrito pitométrico cuidando que el diámetro de la tubería sea compatible con los consumos esperados, evitando la baja velocidad y la consecuente imprecisión de las medidas.
- Medir los consumos nocturnos en sectores para determinar pérdidas y asignar prioridades a los sectores a investigarse
- Considerar válvulas de paso que permitan aislar el distrito pitométrico del resto de la zona de presión sin causar falta de agua.

3. Inspección de válvulas de paso y bocas de incendio

Antes de iniciar las actividades en el distrito pitométrico hay que verificar todas las válvulas de paso y bocas de incendio de la red de distribución. El proceso de verificación de las válvulas consiste en inspeccionar la caja de la válvula, cerrar y abrir la válvula, escuchando, con el auxilio de un geófono, eventuales ruidos de escape de agua.

Los principales problemas constatables en una inspección de válvulas son:

- Las cajas de las válvulas cubiertas por pavimento asfáltico o cualquier otro tipo de revestimiento. En ese caso se usa un detector electrónico de cuerpos metálicos para localizarlas. De no localizar la válvula de esa manera, entonces se usan los amarres de la válvula.
- Las botellas telescópicas de las válvulas obstruidas con escombros tales

como lodo, piedras, fragmentos de madera y otros. En ese caso se limpian con la ayuda del camión "flushing".

- El cabezal del extremo del vástago de la válvula desplazado. Si la válvula no está muy profunda, el cabezal puede recolocarse en el vástago provisionalmente con la mano (debidamente protegida con un guante). De lo contrario se puede operar la válvula utilizando una llave tirafondo con boca de menores dimensiones y luego, con la intervención de personal de operaciones, recolocar el cabezal en el vástago. La operación de una válvula en estas condiciones puede producir desgaste del extremo del vástago.
- Pérdida del cabezal del extremo del vástago de la válvula. También puede haberse desgastado. Las válvulas en estas condiciones o las que se han roto cerradas o abiertas no pueden operarse y deben reportarse para su reparación o reemplazo.
- La válvula tiene una fuga a través de la empaquetadura. En este caso hay que ajustar la empaquetadura o cambiarla si ésto no surge efecto.
- La válvula tiene una fuga por el asiento, entre la compuerta y el cuerpo. La fuga puede identificarse en algunos casos utilizando el geófono. El geófono se apoya en una llave tirafondo encajada en el vástago de la válvula y se puede escuchar un sonido de escape que indica fuga a través del asiento o de la empaquetadura de la válvula. Nunca se debe hacer un esfuerzo exagerado para cerrar una válvula porque se puede romper.

Si hay ruido, se debe verificar si éste procede de una fuga del empaque, ya que este tipo de ruido es muy parecido al ruido de fuga por el asiento de la válvula. Si se prueba que la fuga ocurre por el asiento, entonces se debe abrir y cerrar sucesivamente 10 veces la válvula hasta que no se escuche más ruido. La acumulación excesiva de materiales depositados en el asiento, guías y compuerta de la válvula provoca el aumento de velocidad y turbulencia en el agua. El procedimiento aquí señalado permite limpiar el interior de la válvula y eliminar el problema de retención de materiales.

Díaz y Quintero/Pérdidas de agua en los sistemas fluviales

Todos los datos de las válvulas de paso verificados deben anotarse en un formato especial. En ese formato se anota la localización, el diámetro, el número de vueltas del vástago en un curso completo de apertura, condiciones en que se encontró la válvula y sus defectos. El formato "Reporte Válvulas de Paso" se diseñó para recoger todas las informaciones mencionadas.

4. Delimitación del distrito pitométrico

El distrito pitométrico debe estar totalmente aislado de la red de distribución, con excepción de las entradas y salidas que deben contar con medidores de flujo. Cuando el distrito pitométrico no es natural, lo que significa que hay válvulas limítrofes para cerrar, hay que tomar los cuidados necesarios al cerrar las válvulas para evitar la escasez de agua dentro o fuera del área.

Antes de iniciar el cierre de las válvulas limítrofes se deben colocar aparatos registradores de presión en las tuberías adyacentes a la línea limítrofe, dentro y fuera del distrito pitométrico, principalmente en los puntos donde haya sospecha de que el cierre de las válvulas pueda ocasionar bajas presiones (por debajo de 15 libras por pulgada cuadrada). Si ésto sucede hay que mover la línea limítrofe para que no ocurran bajas presiones dentro o fuera del distrito pitométrico. Si aún así no se resuelve el problema, hay que verificar si las válvulas de paso próximas están cerradas. En última instancia habrá que determinar los puntos de estrangulamiento de la red y proyectar tuberías de refuerzo.

De la misma forma que se instalan registradores de presión a lo largo de la línea limítrofe, es necesario instalar registradores de presión en los puntos más desfavorables de la red de distribución, dentro y fuera del distrito pitométrico. De esta forma se detectan los reflejos de los cierres de las válvulas limítrofes en esos puntos.

Siempre es conveniente realizar pruebas para verificar si el distrito pitométrico está efectivamente aislado de la red de distribución luego de

cerrar las válvulas limítrofes. Para ésta prueba basta cerrar la entrada del distrito pitométrico durante algunos minutos y verificar si las presiones bajan a cero en los registradores de presión internos y si ocurren alteraciones de presión en los registradores instalados externamente al distrito pitométrico.

Puede ser que las presiones externas al distrito pitométrico sufran la influencia de la elevación de la presión en la entrada de la red de distribución como consecuencia de la reducción de caudal que causa el cierre de la entrada del distrito pitométrico. Esta influencia debe tenerse en cuenta al analizar los gráficos de los registradores instalados externamente al distrito pitométrico.

En el caso de que las presiones dentro del distrito pitométrico no bajen a cero en todos los puntos donde hay aparatos registradores instalados, o si las presiones disminuyen en los puntos externos al distrito pitométrico contiguos a la línea limítrofe, puede ser que haya una conexión hidráulica entre la red del distrito pitométrico y la red externa al mismo. Esa conexión hidráulica puede ser una válvula con fuga en su asiento o una válvula que se cierra en sentido antihorario y que, inadvertidamente, se abrió en vez de cerrarla. Con una nueva inspección a las válvulas limítrofes se identificaría el problema.

En caso de que no se encuentre ninguna válvula que deje pasar agua, se debe verificar la posibilidad de que una de las válvulas cierre operándola en el sentido antihorario. Para esto, con las válvulas supuestamente cerradas (de acuerdo al sentido horario), se abre cada válvula (girando la llave tirafondo en sentido antihorario) hasta el final del curso de la rosca de varilla. Si la válvula es de cierre antihorario, al terminar de cerrarla se escucha el ruido característico de la vena líquida estrangulada, lo que señala que la válvula cerró.

Si no se encuentra ningún problema con las válvulas, se debe sospechar de una interconexión no catastrada, lo que representa un problema mayor.

Díaz y Quintero/Pérdidas de agua en los sistemas fluviales

En ese caso se deben consultar los planos y proyectos antiguos y tratar de localizar en el campo el punto de interconexión con la ayuda de aparatos detectores de tubería. Como apoyo, puede ser necesario excavar en puntos de la red donde pueda estar la interconexión.

B. Determinación de pérdidas

1. Pérdidas del sistema de distribución

Las pérdidas en un sistema de distribución se estiman con los métodos de "Flujo Total Integrado" o "Flujo Total Nocturno". El método de "Flujo Total Nocturno" es el más preciso. No obstante, para determinar las pérdidas en ambos métodos al caudal influente de un sistema de distribución se le resta el consumo medido de los consumidores y se le suma un consumo estimado. El sobrante es el agua no contabilizada de la cual una parte sustancial se fuga.

El agua no contabilizada incluye errores en las mediciones de flujo (éstos pueden ser positivos o negativos), agua que se usa legítimamente, pero que no se mide, y pérdidas o fugas.

En el método de "Flujo Total Integrado", la fórmula que se utiliza para estimar el agua no contabilizada es:

$$U = S - (M + AP) \quad (1)$$

Donde

- U = Agua no contabilizada
- S = Suma de las entradas al sistema
- M = Suma de toda el agua contabilizada por contadores
- A = Consumo doméstico medio per cápita, más una cantidad permisible del consumo comercial que no se mide.
- P = población que se suple, pero que no tiene contadores.

Los valores que se utilizan para cada variable deben responder al mismo periodo de contabilidad. El periodo de contabilidad normalmente es

de un mínimo de dos meses, ya que es usualmente el periodo en que se toman las lecturas de los contadores de los consumidores y, por ende, es el período mínimo en que se puede obtener el valor del factor "M".

El método de "Flujo Total Integrado" es el más simple para estimar el agua no contabilizada. Sin embargo, este método es menos preciso debido a que en la fórmula se restan grandes cantidades que están sujetas a errores para obtener una cantidad relativamente pequeña. Cada cantidad que se mide está sujeta a errores del medidor de flujo. Por ende, se deben calibrar los medidores antes de realizar los estudios de flujo. Obviamente, no es posible calibrar todos los contadores utilizados para medir el consumo "M". Estos contadores normalmente son del tipo mecánico y tienden, por causa de desgaste, a registrar una cantidad menor que la real. También, durante los flujos mínimos los contadores tienden a registrar una cantidad menor. Actualmente no hay suficiente información sobre el consumo medio doméstico, "A", para poder definir un valor general. Este factor tiende a variar entre las zonas urbanas y rurales.

Los estimados de la población se pueden obtener de las estadísticas locales o multiplicando el número medio de personas por familia por el número de propiedades que se sirven.

Por otro lado, estimar las pérdidas por el estudio de "Flujo Total Nocturno" requiere mayor esfuerzo que con el método del "Flujo Total Integrado", pero los resultados son más precisos y confiables. La fórmula que se utiliza es similar a la utilizada con el método de "Flujo Total Integrado", pero cada término que se mide es una razón de flujo en vez de una cantidad. En adición, el consumo doméstico permisible se expresa por propiedad en vez de per cápita.

$$U' = S' - (M' + A' N') \quad (2)$$

Donde U' = Agua no contabilizada durante el flujo nocturno
 S' = Suma de los flujos influentes al sistema durante el periodo de flujo mínimo nocturno

Díaz y Quintero/Pérdidas de agua en los sistemas fluviales

- M' = Consumo nocturno de todos los comercios
- A' = Consumo medio doméstico nocturno por propiedad
- N' = Número de propiedades suplidas

Para determinar las pérdidas con el método de "Flujo Total Nocturno" se restan flujos pequeños, sujetos a ciertos errores de flujos relativamente grandes, para obtener un flujo relativamente grande. El valor obtenido de esta forma es estrictamente el flujo nocturno no contabilizado, pero eliminando lo más posible el consumo utilizado. Por ende, se obtiene un valor más real de las fugas. El factor M' se obtiene directamente de los contadores de los grandes consumidores durante las horas nocturnas.

Estudios realizados en el Reino Unido demuestran que el flujo medio doméstico nocturno (A') es relativamente bajo, aproximadamente 2 litros por propiedad por hora (0.53 gal./prop./hr.). Para calcular este factor para Puerto Rico hay que leer los contadores de los consumidores domésticos durante el período nocturno de 12:30 a 4:30. El número de propiedades suplidas puede obtenerse de planos, de los informes de servicio a consumidores o de los censos electorales.

2. Metodología para determinar las fugas

Una vez determinadas las pérdidas con el método de "Flujo Total Nocturno", se realiza la "Prueba de Subdivisión Nocturna". Esta prueba se hace para determinar la prioridad en la detección de fugas en los sectores que componen un distrito pitométrico.

Para determinar las fugas en un distrito pitométrico se usa la prueba de subdivisión nocturna ("Step Test"). Esta prueba consiste en aislar pequeños sectores por medio de una operación de válvulas, de tal modo que se pueda medir el consumo mínimo nocturno en esos sectores del distrito pitométrico. Los trabajos de subdivisión nocturna deben ejecutarse durante el periodo en que ocurre el consumo mínimo, o sea, normalmente entre media noche y las 5:00. Se presume que las pérdidas no varían durante las 24 horas del día. Al realizar esta prueba durante las horas de consumo mínimo, gran parte del

volúmen de agua medida corresponde a las pérdidas. Esta prueba nos indica los sectores con mayores índices de fugas, a los cuales se les debe dar mayor prioridad.

Una vez se delimita el distrito pitométrico, se procede con los estudios de flujo por 24 horas, preferiblemente durante una semana. De los estudios de flujo diarios se obtiene el consumo total diario, el flujo total nocturno, el consumo medio horario, consumo máximo horario, consumo mínimo nocturno. Con estos datos se calculan los índices de consumo mínimo nocturno y el consumo medio por propiedad.

Al inicio y al final del período de medición diaria deben leerse todos los contadores de los grandes consumidores (fábricas, hospitales, condominios, etc.), para evaluar su consumo medio. Del mismo modo, durante la semana de medición hay que medir el caudal durante períodos cortos, en las horas de consumo mínimo nocturno, en los contadores de los grandes consumidores. Los contadores deben leerse inicialmente en una ronda entre el período de 12:30 y 2:30. Se debe anotar la hora exacta en que se leyeron los contadores y se deben leer todos los dígitos del contador. En la segunda ronda, los contadores se deben leer en el mismo orden durante el período de 2:30 y 4:30.

Los grandes consumidores nocturnos se determinan mediante los informes del Area de Servicios a Consumidores. Se mide el consumo de los grandes consumidores para eliminar su influencia en el análisis del consumo nocturno y para facilitar el proceso de establecer una correlación entre los coeficientes de consumo y el nivel de fugas posible.

Después de obtener el flujo total nocturno del distrito pitométrico, se procede con la prueba de subdivisión nocturna. En el análisis de los consumos de los sectores que componen el distrito pitométrico, es necesario definir un parámetro de comparación, el cual es función del consumo medio doméstico nocturno medido en el estudio de flujo total nocturno. Una parte del agua suministrada a la red de distribución durante horarios del consumo mínimo nocturno se pierde por fugas y la restante se entrega a los

Díaz y Quintero/Pérdidas de agua en los sistemas fluviales

consumidores. Se calcula el consumo medio doméstico nocturno (A) por propiedad (gal/día/prop.).

El consumo medio doméstico nocturno se determina con la lectura de los contadores domésticos durante el período nocturno de 12:30 a 4:30. Hay que leer todos los dígitos del metro para mayor precisión en los cálculos ya que el consumo doméstico en este período es mínimo y los cambios en el metro son de milésimas de metros cúbicos.

Normalmente, una fuga detectable por los medidores de flujo provoca una pérdida de agua que, cuando se traduce a consumo medio por propiedad, es muy superior al consumo medio doméstico nocturno. Al restar el consumo medio doméstico nocturno de los consumos nocturnos de cada sector del distrito pitométrico obtenemos las pérdidas en cada sector. De esta forma podemos fijar la prioridad de los sectores a investigarse para determinar las causas de dichas pérdidas.

Para investigar estas causas primero investigamos si hay grandes consumidores en el área del sector correspondiente al estudio. En caso afirmativo, se mide el consumo nocturno de esos grandes consumidores utilizando su propio contador. Si el consumo medio justifica el elevado consumo encontrado en la subdivisión nocturna, el problema está resuelto y no se necesita investigar fugas. Si no hay grandes consumidores en el área, o si los mismos no justifican el elevado consumo medido, se inicia una investigación de fugas no visibles en la parte respectiva de la red de distribución.

Una vez se localizan y reparan todas las fugas, se debe repetir la prueba de subdivisión nocturna midiendo los nuevos consumos de los diversos sectores que presentaban fugas. De esta forma se puede determinar, a través del cálculo de la diferencia entre los consumos de los sectores antes y después de la reparación de las fugas, la pérdida de agua a esperarse en cada sector.

La evaluación final consiste en repetir la medición del flujo diario luego de localizar y reparar todas las fugas. Es deseable que el tiempo transcurrido entre los estudios de flujo diarios inicial y final no sea muy grande para de evitar alteraciones en la red de distribución, tales como nuevas conexiones y nuevas fugas, entre otros. La diferencia entre el flujo total nocturno entre ambas pruebas de flujo diarias proporciona la reducción de pérdida de agua.

Al final de los trabajos se debe elaborar un informe que reúna toda la información recolectada a lo largo del desarrollo del distrito pitométrico, tal como:

- Plano en la escala 1:2000 mostrando los límites del distrito pitométrico, las subdivisiones nocturnas realizadas y la ubicación de los medidores de flujo.
- Reportes de válvulas de paso, los que se llenan al momento de verificar las válvulas del distrito pitométrico, que indiquen la condición normal de las válvulas y sus defectos.
- Reportes de válvulas de paso, los que se llenan al momento de realizar la subdivisión nocturna.
- Velocidades, consumos y presiones del distrito pitométrico obtenidos en la medición de flujo diaria.
- Relación de válvulas nuevas, bocas de incendio, interconexiones de red, eliminación de los puntos muertos e instalación de medidores de flujo en el distrito pitométrico.
- Relación de los puntos en que se miden presiones en la delimitación.
- Presentación de los formatos cumplimentados: "Resultados prueba subdivisión nocturna".
- Velocidades, consumos y presiones del distrito pitométrico obtenidos en la evaluación final.
- Gráficos retirados de los aparatos registradores de flujos y presiones, en la delimitación, en la medición global y en la evaluación final.

Díaz y Quintero/Pérdidas de agua en los sistemas fluviales

3. Controles de pérdidas

Una vez se reducen las pérdidas en un distrito pitométrico a un porcentaje aceptable, el distrito pitométrico no debe descuidarse en el control de pérdidas. La frecuencia de inspección en cada distrito pitométrico depende de los resultados de las lecturas de los medidores de flujo. La frecuencia apropiada depende del tamaño del distrito pitométrico y de los beneficios económicos potenciales que se obtengan.

El porcentaje de pérdidas aceptable es uno que iguala el costo de reparación y el costo de la pérdida de agua. Como ejemplo considere los siguientes datos:

- El costo diario de reparación (válvulas, salideros, etc.) en un distrito pitométrico asciende aproximadamente a \$750.00. Dicho costo considera los equipos, transportación, materiales y el salario del personal.
- En un distrito pitométrico se ha determinado un flujo promedio de 1.6 mgd y mediante la prueba de subdivisión nocturna se ha determinado un porcentaje de pérdidas de un 44%, o sea, unas pérdidas de 704,000 gpd (2,664.6 metros cúbicos por día).
- El costo de un metro cúbico por día es de aproximadamente \$0.65.
- El costo de reparación de \$750.00 por día tendría un equivalente a 1,153.85 metros cúbicos (304,622.6 gpd.), o sea, un porcentaje de pérdidas de 19%.

A base de estos datos podemos concluir que para este distrito pitométrico se deben reducir las pérdidas aceptables a 19%.

C. Equipos para detectar tuberías y cuerpos metálicos enterrados

1. Equipos detectores de tuberías

Aunque hay varios fabricantes de equipos detectores de tuberías, todos son semejantes. En esta sección presentamos algunos aspectos del uso del

detector Metrotech², modelo P-480, conforme al manual de operación del fabricante. Para una referencia más completa de este equipo sugerimos se consulte el citado manual. El detector de cables y tubos Metrotech P-480 es un instrumento electrónico preciso usado para detectar y ubicar tubos enterrados, conductores y diversos objetos metálicos. Este instrumento se compone de principalmente de un transmisor y un receptor.

El transmisor produce un campo electromagnético que rodea la tubería (objeto metálico que se desea ubicar), propagándose a lo largo de la misma. El receptor capta las ondas electromagnéticas emitidas por el transmisor y conducidas por el objeto metálico, indicando, por la intensidad de recepción, la dirección y ubicación de la pieza buscada. Las tablas 6 y 7 presentan las características del transmisor y receptor, respectivamente.

Tabla 6. Características del transmisor del Metrotech P-480

Transmisor	Función
Llave selectora	Proporciona una indicación visual de la carga de la batería o del volumen de la señal que se está captando. Sirve también para indicar las condiciones de carga de la batería.
Llave selectora	Permite seleccionar la intensidad del receptor: baja (LO), mediana (MED) y alta (HI) intensidad. Sirve también para accionar la prueba de carga de la batería (BATT).
Salida del sonido	Proporciona el sonido correspondiente a la indicación visual del volumen de la señal captada a través de un audifono.
Control de sensibilidad	Controla el volumen de sensibilidad del receptor.
Burbuja de nivel	Permite establecer la inclinación de 45° del receptor para determinar la profundidad del objeto metálico a localizarse.
Interruptor	Sirve para conectar y desconectar el receptor.
Altoparlante	Proporciona el sonido correspondiente a la indicación visual del volumen de la señal captada sin la ayuda del audifono.
Enchufe auxiliar	Sirve para conectar y desconectar el receptor.

² La mención de equipo o materiales por su nombre de fábrica no indica endoso del producto ni su preferencia sobre otro material o equipo que pueda hacer el mismo trabajo.

Díaz y Quintero/Pérdidas de agua en los sistemas fluviales

a. Principios de operación

Los dos métodos de operación del del Metrotech P-480 son por inducción o por conducción. En cualquiera de los dos casos, cargando el transmisor (inducción) o manteniendo fijo el mismo (conducción) su posición debe ser siempre vertical y paralela a la supuesta dirección del objeto metálico que se espera ubicar. Para el método de inducción la secuencia de operaciones es la siguiente:

- Presione el interruptor del transmisor
- Coloque la llave selectora en la posición de inducción
- Gire un poco más la llave selectora a la posición "signalator", proporcionando la emisión alterna de onda, lo que prolongará la vida útil de la batería.
- El proceso de ubicación se inicia manteniendo una distancia aproximada de 10 metros entre el transmisor y el receptor.

Observación: Puede usarse el audífono o el propio altoparlante del receptor, ya que la ubicación del tubo se da en los dos casos por la señal sonora, visual y más fuerte.

Tabla 7. Características del receptor del Metrotech P-480

Receptor	Función
Indicador visual prueba	Conducción: debe usarse cuando el transmisor está en contacto con el objeto metálico a localizarse. Inducción: debe usarse cuando el transmisor no está en contacto con el objeto metálico a localizarse. En prueba de carga: activa el indicador si estuviera electrizado. Emisor de ondas: selecciona la emisión de ondas, volviéndola continua o alterna.
Indicador de carga	Muestra luminosamente las condiciones de carga de la batería y la potencia de la salida del transmisor.
Toma para conectar el polo	Usada para conectar el terminal de tierra y el transmisor al objeto de ondas metálico, transmitiendo directamente las ondas; también usada para conectar el polo de tierra.
Interruptor	Sirve para conectar y desconectar el transmisor.

Para el método de conducción el transmisor se conecta directamente al objeto metálico a ser ubicado o a alguna pieza conectada a él (en el caso de tuberías de agua se pueden usar ventosas, grifos conectados a la conexión predial, registros, válvulas de incendio o a la propia tubería). En este método la secuencia de operaciones es la siguiente:

- Coloque el cable de conexión en contacto con el objeto metálico y conéctelo en la toma propia para el conector.
- El cable debe quedar en dirección perpendicular a la del objeto que se va a ubicar y bien extendido, de manera que el transmisor se mantenga lo más lejos posible del objeto a ubicarse. La placa de contacto con el suelo deberá introducirse verticalmente en el suelo o simplemente apoyarse sobre el pavimento (si fuera el caso) pero lo más lejos que sea posible del transmisor y del objeto. El buen funcionamiento de la "tierra" aumentará el rendimiento del aparato.
 - Presione el interruptor del transmisor.
 - Coloque la llave selectora en la posición de conducción y gírela un poco más a la posición "signalator".

b. Recomendaciones

Hasta este momento nos hemos preocupado de usar las palabras "objeto metálico", exactamente para fijar la idea de que el equipo ubica no sólo las redes de agua, sino todo y cualquier conductor que exista en el lugar, por ejemplo, cables de teléfono, cables y líneas de energía eléctrica y hasta las pequeñas cercas que existen en las proximidades, debiendo, por lo tanto, tener el cuidado necesario para que no existan falsos datos en los resultados que se obtengan.

La distancia entre el receptor y el transmisor es de verdadera importancia, pues si fuese pequeña puede haber transmisión de ondas a través del propio aire, accionando el receptor e interfiriendo en la investigación. El manejo del receptor se efectúa durante la ubicación; la magnitud de la señal recibida se gradúa a través del control de sensibilidad.

Díaz y Quintero/Pérdidas de agua en los sistemas fluviales

También la potencia de recepción se controla en función de la distancia entre el transmisor y el receptor. Con 10 metros entre ellos se comienza con "LO" y a medida que se aumenta debe usarse "MED" y "HI".

c. Determinación de la profundidad del objeto metálico

Luego de ubicar la red, podemos determinar su profundidad a través del proceso de triangulación, como se describe a continuación:

- Instale el transmisor en la posición vertical (inducción), exactamente sobre un punto por donde pase la tubería, o haga la conexión (conducción) dejando el aparato conectado.
- Permanezca con el receptor conectado a una distancia aproximada de 25 metros del transmisor, inclinado a 45 grados (use la burbuja del nivel para conseguir esa posición) y a una altura de 10 a 15 cm con relación al suelo.
- Muévase despacio, perpendicularmente a la dirección de la red, siempre con el receptor inclinado a 45 grados, hasta el punto en que la señal del receptor sea nula o la mínima posible.
- Mida la distancia horizontal entre ese punto y el eje proyectado de la tubería en la superficie. La profundidad de la red debe ser igual a la diferencia de esa distancia y la altura existente entre el receptor y el suelo.

2. Equipos detectores de cuerpos metálicos

En este inciso se presentan las instrucciones del fabricante en el manual de operación del localizador Metrotech Modelo 220 y 220 A. No todos los aspectos abordados en el manual se han considerado en esta traducción, por lo que se recomienda consultar directamente el manual si se necesitan más detalles.

Este instrumento fue especialmente proyectado para localizar objetos metálicos pequeños y medianos que se encuentren enterrados hasta a 1.50 metros de profundidad. El instrumento se usa para localizar tapas de

alcantarillado cubiertas por el pavimento; cajas de registros; herramientas perdidas o enterradas; metales o demarcaciones de propiedades y conducciones; en fin, prácticamente todo objeto cuya conductibilidad sea mucho mayor que el medio donde se encuentra. El rango de detección varía un poco debido a las diferencias del tipo de suelo o del material involucrado, al tamaño, forma y área externa del objeto metálico enterrado.

a. Recomendaciones:

- Sea sistemático al inspeccionar un área determinada, siga líneas o direcciones definidas, en forma de reja, distanciadas una de otra aproximadamente 30 cm.
- Mantenga siempre el instrumento de modo de conservar una altura constante entre el disco detector y el terreno o superficie en inspección. Esta operación es importante cuando se trabaja en terreno conductivo.
- El instrumento puede usarse para localizar objetos metálicos dentro del cimiento, albañilería, barro, agua salada o dulce, piedra o tierra. No funciona a través de redes de acero, hierro o concreto armado, pues en este caso estará detectando tanto la presencia del hierro y acero de las estructuras, como de los objetos metálicos en ellas.
- Nunca sumerja el disco detector en agua, pues el aparato puede dañarse.

b. Secuencia de operaciones

La secuencia de operaciones para el uso del Metrotech 220 y el 220A es la siguiente:

- Levante el conjunto medidor, eje-medidor, hasta la posición vertical u otro ángulo que prefiera.
- Cierre el cable cerca de 1/4 de vuelta en sentido horario.
- Hale para arriba el conjunto eje-medidor hasta la altura deseada y luego apriete el aro de fijación.
- Coloque el piñón del audífono en el contacto que existe en el conjunto de medición y control. Este contacto tiene la función de llave que

Díaz y Quintero/Pérdidas de agua en los sistemas fluviales

"conecta-desconecta"

- Asegurado el aparato, tan luego el disco detector esté a la altura normal de operación sobre el área de inspección, gire el botón de ajuste hasta obtener una indicación de la aguja en cualquier punto del rango negro del medidor.
- Verifique que el aparato no se instale sobre algún objeto metálico, enterrado o no, durante este ajuste.
- Pase el instrumento lenta y sistemáticamente por sobre todo el área en sospecha, escuchando y observando cuidadosamente los aumentos de volumen en el audífono y en el indicador del medidor. Mantenga siempre el disco detector en la misma altura sobre el terreno o superficie a explorarse.

D. Equipos para localizar fugas

1. Equipos no electrónicos

Las varillas de sondeo y los geófonos mecánicos son equipos no electrónicos que se usan para localizar fugas. Las varillas de sondeo son equipos muy simples destinados a la localizar fugas. No obstante, aún dentro de esta simplicidad, hay equipos más precisos. La investigación de la fuga se realiza colocando un extremo de la varilla contra el suelo, o directamente en el tubo, y el otro contra el oído del operador, lo cual permite escuchar el ruido de una posible fuga. Una de las varillas de sondeo más precisas es la fabricada por The Palatine Engineering Co. Boote, Nr. Liverpool, Inglaterra. Estos modelos se denominan estetoscopios industriales o hidrófonos y se fabrican en varios tamaños.

El geófono mecánico (Globe Geophone) es un equipo compacto, robusto, simple y preciso destinado a detectar y localizar fugas invisibles, a través de la auscultación del suelo bajo el cual existe una tubería enterrada. Se transporta en una pequeña caja de madera de 25 x 19 x 7.5 cm. Consta de dos cilindros pesados, conectados a través de mangueras a un auricular, del mismo tipo que el utilizado en los estetoscopios médicos. En el interior de cada cilindro hay dos membranas finas de bronce,

separadas por un anillo pesado de plomo, lo que forma una caja de resonancia. Cuando el cilindro se coloca en el suelo, capta las vibraciones emanadas de la fuga, lo que hace que vibren las membranas inferior y superior. Esta vibración luego se transmite al operador a través de la propagación de las ondas sonoras a lo largo de las mangueras y el auricular.

Debido a su sensibilidad, el equipo debe usarse sólo de noche, cuando hay menos movimiento de tránsito y de las personas. Además, es difícil de usar cuando hay viento fuerte, ya que las mangueras del geófono captan el ruido del viento que pasa a su alrededor. El geófono capta prácticamente todos los ruidos del medio tales como pasos de personas que se aproximan, ruidos de vehículos, transformadores de los postes, motores de refrigeradoras industriales, por lo que al operador le corresponde distinguir entre los ruidos que llegan a su oído y el causado por una fuga.

El ruido de la fuga se asemeja al ruido del vapor, o de un torrente de agua; es más grave o agudo y más o menos intenso dependiendo de condiciones tales como la presión del agua, el tamaño de la fuga, el tipo de suelo, el tipo de pavimento, la profundidad, el material del tubo y otros. La audibilidad del ruido, por otro lado, puede variar de operador a operador. A algunos operadores les es más fácil identificar los ruidos agudos y a otros los graves. Muchos pueden oír igualmente ruidos graves o agudos, por lo que se les prefiere para trabajar con geófonos.

Un buen operador nunca se olvida del ruido de una fuga después que lo escucha por primera vez. Sin embargo, debe agudizar su oído para aprender a distinguir un ruido de fuga de otros ruidos que se encuentren mezclados con él. La investigación puede hacerse directamente sobre la tubería o en varillas metálicas que se encuentren en contacto con la tubería, en caballetes (segmento de tubería con medidor o lugar destinado a su instalación) o aún sobre el terreno bajo el cual está enterrada una tubería.

Los sensores del geófono deben ubicarse sobre el suelo, distantes uno del otro tanto como sea posible; luego se colocan los auriculares en los oídos y en caso de no escuchar ruidos se pasa para otro punto de la tubería. El

Díaz y Quintero/Pérdidas de agua en los sistemas fluviales

geófono debe colocarse cada cinco metros a lo largo de la tubería; también es necesario ponerlo en cada caballete predial. En el caballete, cuando se escuche algún ruido sospechoso, es necesario cerrar el registro para certificar que dicho ruido no sea del agua que se escurre por la conexión domiciliaria hacia la red predial. En caso de tuberías de asbesto-cemento o PVC, debe escucharse cada dos metros de tubería.

Muchas veces se puede escuchar un ruido de fuga a una distancia razonable del mismo, ya que la propagación del ruido se hace a través del tubo, del terreno o del pavimento. En el caso del geófono mecánico, el ruido que se escucha en un oído no tiene la misma intensidad del que capta el otro oído; por lo que el operador debe avanzar a lo largo de la tubería hasta que los ruidos alcancen la misma intensidad en los dos oídos. En este momento, la fuga estará a media distancia entre los dos cilindros.

Es común, principalmente en las tuberías antiguas, oír ruidos típicos de fugas, abrir zanjas y no encontrar las fugas. La causa de esto, en muchos casos, puede estar relacionada al hecho de que una obstrucción parcial de la tubería puede causar un ruido muy semejante al provocado por una fuga. En ese caso el ruido escuchado es una obstrucción y no una fuga. La duda en este caso puede eliminarse realizando una medición de la presión diferencial entre un punto aguas arriba y uno aguas abajo del lugar en cuestión. De igual forma, cuando hay fugas muy grandes, la velocidad del agua en los tubos alimentadores aumenta sensiblemente, pudiéndose escuchar ruidos en curvas de 90 grados y otros, los cuales pueden confundirse con ruidos de fugas por los operadores sin experiencia.

La operación del geófono, a pesar de ser simple y económica, es bastante incómoda y causa cansancio. Por tanto no es posible trabajar continuamente con el equipo por muchas horas en una misma noche. Un buen operador que trabaja con bastante cuidado investigando calles con tuberías en cada acera, puede recorrer hasta un kilómetro de tubería por noche.

2. Equipos electrónicos de detección directa de fugas

Los equipos electrónicos para detectar directamente las fugas son instrumentos cuyo funcionamiento consiste en captar las vibraciones emanadas de una fuga, transformar esas vibraciones en impulsos electrónicos, ampliar la señal de entre las demás señales que interfieren y, nuevamente, transformar esa señal resultante en señales sonoras, audibles por un operador. Estos detectores se caracterizan por determinar el lugar exacto de la fuga en el momento en que el aparato se encuentra en el terreno, exactamente sobre la misma, o sea, cuando la señal captada generada por la fuga es la más alta posible.

Los detectores electrónicos normalmente constan de las siguientes partes: el micrófono, el amplificador y el filtro de frecuencia. La salida del amplificador puede alimentar audifonos, altoparlantes, indicadores de señal o la combinación de estos tres elementos.

En el proceso de captar y amplificar los ruidos provocados por fugas también se pueden captar y amplificar los ruidos del medio ambiente, además de los que produce el mismo equipo electrónico. Es bastante usual, y de cierta eficiencia, remover los ruidos indeseables usando filtros de frecuencia.

El indicador de señal es un dispositivo utilizado para medir la intensidad total del ruido recibido por el micrófono. Es bastante útil para determinar el punto exacto en el que se encuentra la mayor intensidad de ruido provocado por la fuga. Su precisión puede ser mayor que la de los detectores mecánicos, ya que los mecánicos dependen mucho más de la habilidad del operador.

Las características del ruido de una fuga varían dependiendo del lugar en el que se hace el sondeo, bien sea directamente en la tubería o en la superficie del terreno. Hay diferentes tipos de micrófonos adecuados para cada tipo de sondeo que se quiera hacer. Por ejemplo, para detectar fugas desde la superficie se usan geófonos y para el sondeo directo en tuberías se

Díaz y Quintero/Pérdidas de agua en los sistemas fluviales

usan los acelerómetros. Algunos equipos comercialmente disponibles incluyen los dos tipos.

Parece que el ruido de fugas, según percibido por el oído humano a través de un detector mecánico, suena diferente del que escucha el mismo oído a través de un detector electrónico, particularmente si el detector electrónico está provisto con un filtro de frecuencia. Por este motivo, hasta un experimentado operador requiere de cierto tiempo para habituarse a un determinado detector electrónico, por lo que es posible que el uso continuo de un detector por un mismo operador dé mejores resultados que un uso ocasional.

Sin embargo, es muy frecuente el caso de empresas en las que se usa rutinariamente el detector mecánico y sólo en situaciones específicas, de difícil solución, se usan equipos especiales provistos con detectores electrónicos. Esta práctica no es adecuada porque presenta dos efectos igualmente negativos: el operador del detector mecánico se siente sin motivación y frustrado por no conseguir resolver un problema que es exclusivamente suyo mientras el operador del detector electrónico, por no usarlo continuamente, no desarrolla la habilidad necesaria para aprovechar todos los recursos que ofrece el equipo. Parece que el mejor procedimiento sería que se trabaje exclusivamente con sólo un equipo. Es muy difícil comparar dos modelos de detectores electrónicos o comparar los detectores electrónicos con los mecánicos, ya que la comparación no puede hacerse solo entre instrumentos, sino que involucra también habilidades individuales, experiencia y entrenamiento, y es poco probable que se llegue a alguna conclusión convincente.

No obstante, bajo el punto de vista puramente teórico, después de un análisis comparativo entre un detector mecánico y uno electrónico o entre un detector electrónico con otro electrónico, podrían surgir las siguientes conclusiones:

- Todos los instrumentos dan una mejor respuesta cuando el sondeo se hace directamente en un conducto metálico que en uno no metálico o

sobre la superficie del suelo.

- Cuando la señal generada por el ruido de la fuga es baja o cuando el ruido de fondo es alto, los detectores electrónicos parecen ser más eficaces que los mecánicos.
- Parece que los detectores electrónicos con micrófonos específicos por sondeo directo en el conducto o en el suelo, respectivamente, son más eficaces que los detectores electrónicos que tienen solo un micrófono para sondeo en todos los lugares y situaciones.

En el mercado hay una gran variedad de equipos electrónicos detectores de fugas, todos ellos con características más o menos comunes. Los detectores más comunes son el Terroscop, Sewerin-Aquaphon (Zuurbier), Metrotech modelos EE64, 200L y HL2000, Fisher M-Scope, Capac, Sharman, Goldak, Seba-Hydrolux y el Heath Consultants - Aqua-Scope, Son-i-kit.

3. Equipos electrónicos de detección indirecta de fugas.

Los equipos electrónicos de detección indirecta de fugas se caracterizan por su propiedad de localizar fugas sin que los sensores de vibración se encuentren directamente sobre la fuga. El principio de su funcionamiento consiste en captar señales vibratorias emanadas de fugas en puntos de la tubería distantes de la fuga. Estas señales se propagan a lo largo de la tubería o con accesorios de la misma. Las señales captadas, así como la distancia del conducto entre los sensores, alimentan un microprocesador que, en función de estos datos, da la localización exacta de la fuga.

Hay dos tipos distintos de equipos. Los más conocidos en el mercado son el Hydrotronic y el Leak Noise Correlator (correlacionador de ruido de fugas). El analizador Hydrotronic de ruido de fugas está constituido por un conjunto de equipos, dispositivos y controles destinados a detectar y localizar fugas en tuberías subterráneas a presión. Consta de una consola electrónica que funciona conjuntamente con un sensor electrónico compacto y robusto.

Díaz y Quintero/Pérdidas de agua en los sistemas fluviales

En el método Hydrotronic se utiliza un sensor para establecer contacto físico en puntos determinados de la tubería o en piezas accesorias de la tubería. La fuga transmite señales acústicas a lo largo del tubo y del líquido; un sensor colocado en contacto con el tubo capta las señales. Las señales captadas se convierten en señales eléctricas y se transmiten a la consola electrónica donde se amplifican, se analizan y se muestran en voltímetros digitales, medidores analógicos, lámparas indicadoras de frecuencia y osciloscopios.

Luego se selecciona el rango de frecuencia estable correspondiente a la fuga; las frecuencias extrañas las elimina automáticamente el filtro y el equipo se sintoniza en la frecuencia de máxima amplitud. Se registran los datos producidos por cada sensor en cada punto de contacto físico y los resultados combinados se interpretan para establecer la localización, el tipo y la magnitud de cada fuga.

Cada fuga produce una señal diferente y puede identificarse en orden de predominio. Cuando hay más de una fuga, la señal predominante se localiza primero y, después de reparar esta fuga, se localizan las otras de la misma forma.

La localización de las fugas se realiza en dos fases distintas: la detección y la localización. La fase de detección consiste en realizar un reconocimiento general de la red de distribución a través de la colocación del sensor electrónico en contacto físico con los puntos accesibles de las tuberías o piezas accesorias. Los datos producidos en cada punto de contacto físico se interpretan y evalúan para identificar las áreas con fugas o para excluir las áreas exentas de fugas. Durante el reconocimiento general, el operador puede detectar otras deficiencias en las tuberías, tales como altas velocidades, medidores obstruidos, válvulas defectuosas y restricciones al flujo de cualquier especie.

La segunda parte del trabajo es la localización de la fuga una vez se detecta que la hay. Entonces se seleccionan los puntos de contacto físico correctos; también pueden establecerse nuevos puntos de contacto de

manera que la fuga se encuentre entre esos puntos.

La consola se sintoniza en las señales correctas y los datos transmitidos por cada sensor los almacena e interpreta un microprocesador que analiza las características y la intensidad de cada señal y proporciona, en función de dichos datos, la localización, el tipo y la magnitud de la fuga. La selección y el espaciamiento de los puntos de contacto físico dependen de las condiciones locales, por lo que deben definirse a base de la experiencia y el juicio de los operadores. El sensor se coloca luego en una de las dos posiciones seleccionadas a cada lado de la fuga y la intensidad de la frecuencia de la posición se registra en uno de los dos medidores analógicos y se almacena dentro de un microprocesador. Esta operación se repite en la segunda posición del sensor que corresponde al otro lado de la fuga. La longitud de tubería entre las dos posiciones del sensor se determina y alimenta al microprocesador. La distancia a la fuga se computa entonces electrónicamente.

Después de localizar la fuga, el operador con experiencia puede estimar el tipo y la magnitud de la fuga. La consola electrónica se proyectó para escoger la opción de usar uno de dos sensores durante los procedimientos para localizar la fuga.

a. Descripción del analizador Hydrotonic

El analizador está constituido por tres componentes básicos: el sensor electrónico, el cable de transmisión y la consola electrónica. El sensor electrónico consta de un captador de vibración extremadamente sensible, el cual está contenido en una cubierta compacta y robusta provista de alimentación propia de 9V e indicador de prueba de batería. El sensor convierte los impulsos acústicos en señales eléctricas y amplifica las señales eléctricas para transmitir las en la consola electrónica.

El cable de transmisión es uno coaxial que conecta el sensor electrónico a la consola electrónica, cuya finalidad es transmitir señales

Díaz y Quintero/Pérdidas de agua en los sistemas fluviales

eléctricas del sensor a la consola. Esas señales pueden transmitirse a través de cables de hasta 1,500 m de longitud.

La consola electrónica consta de los siguientes componentes: lámpara del espectro de frecuencia y 10 lámparas que muestran los rangos de frecuencia de fugas. Los sonidos de las fugas más grandes necesitan analizarse en rangos de frecuencia bajos, contrario a los sonidos de las fugas pequeñas, los cuales se analizan en rangos de alta frecuencia.

Los filtros de exclusión (rechazo) son 10 filtros que están conectados a los circuitos de las 10 lámparas del espectro. Los operan unos conmutadores para acomodar la aceptación o exclusión de cualquier combinación de frecuencias que llegan a la consola.

Un osciloscopio de trazado doble revela las diversas formas y patrones de onda recibidos e identifica la forma predominante de la frecuencia de onda producida por el ruido de la fuga; también las frecuencias de las ondas que provienen del medio ambiente, como son las corrientes eléctricas de las instalaciones de alta tensión, transformadores, etc.

Dos medidores electrónicos analógicos demuestran la intensidad de la frecuencia de la fuga y envían el valor de esa intensidad al microprocesador. Estos medidores están ajustados al nivel apropiado de la señal de entrada.

Los circuitos de audio responden a través de un altoparlante o audífonos para confirmar el sonido típico de la fuga, y otros sonidos provenientes de la red de distribución, como los producidos por la alta velocidad del agua, puntos de estrangulamiento del flujo, obstrucciones y otros.

Cuatro lámparas demuestran automáticamente si la señal de entrada en la consola está en el nivel correcto, si es muy fuerte o muy débil. El microprocesador almacena los datos provenientes de los medidores de intensidad de la frecuencia y la longitud de la tubería entre las posiciones

del sensor, pues se ha programado para computar e indicar la posición de la fuga. El panel de control está provisto de comandos que permiten operar toda las funciones de forma filtrada o no, incluyendo los controles para el microprocesador, el indicador de abastecimiento de carga y los controles para conectar y desconectar. Todos los componentes electrónicos operan alimentados por una fuente de energía de 12V.

El sistema Hydrotronic investiga toda la red de distribución, excepto mediciones de consumo y operación sistemática de las válvulas. El trabajo puede realizarse durante horarios normales de oficina. Puede ser necesario trabajar en periodos nocturnos cuando el congestionamiento del tráfico representa un problema o donde la presión en la tubería decae marcadamente durante el día o en cualquier lugar donde se justifique el trabajo nocturno.

El equipo completo con todos los accesorios, la fuente de abastecimiento de energía eléctrica y todo lo más necesario para investigar fugas está acondicionado en el interior de un vehículo. Según los fabricantes, se pueden encontrar fugas de hasta 0.025 l/s. El sistema Hydrotronic estima la pérdida de agua por fuga con errores de $\pm 20\%$. La presión necesaria mínima deseable para la investigación de fugas, según los fabricantes, es de 14.4 mca; se pueden tolerar, sin embargo, hasta 13.6 mca.

Conclusiones y recomendaciones

Debido a que el tema planteado en este trabajo de investigación es uno de gran controversia, toda vez que se trata de una de las agencias gubernamentales más importantes de nuestro país y abarca varias facetas, hemos querido separar nuestras conclusiones y recomendaciones en tres áreas que, a nuestro entender, son las que más se identifican con nuestro tema: la fase administrativa, la fase operacional y la fase técnica.

Díaz y Quintero/Pérdidas de agua en los sistemas fluviales

Fase administrativa

- Establecer por lo menos una división de estudios pitométricos en cada uno de los distritos regionales para poder trabajar en la detección de fugas en toda la isla, ya que la AAA cuenta sólo con una división completa de estudios pitométricos en la isla, la cual le sirve al área metropolitana.
- Establecer un sistema adecuado de comunicación entre las brigadas de estudios pitométricos y las brigadas de reparación para evitar que los salideros descubiertos por la división de pitometría tarden en repararse.
- Desarrollar un plan de trabajo que les asigne a las brigadas de estudios pitométricos las labores pertinentes que correspondan a las necesidades del área en la cual operan.
- Implantar una política pública en la agencia para mantener al día la información de la localización de los sistemas de distribución para poder realizar los trabajos de pitometría en el menor tiempo posible.
- Mantener un archivo adecuado que indique todos los lugares donde se han reparado e instalado sistema de distribución, tales como válvulas, bombas, piezas de conexión, metros y cualquier otro tipo de instrumentos o equipos para evitar pérdidas subsiguientes.
- Desarrollar un plan de publicidad para orientar al público para evitar pérdidas innecesarias. Ejemplos de esto son las bocas de incendio y las conexiones ilegales (pillos).

Fase operacional

- Identificar y reparar todos los medidores de flujo en las plantas de filtración para poder obtener los datos reales de agua procesada para distribuirla.
- Cambiar los contadores de agua potable que excedan de 10 años desde que se instalaron para asegurarse que todos funcionen en óptimas condiciones.
- Verificar e inspeccionar anualmente todas y cada una de las válvulas y conexiones de troncales principales para asegurarse de que funcionan adecuadamente.

- Establecer un programa adecuado de restauración y restablecimiento de sistemas deteriorados para mejorar la infraestructura en dichos sistemas.
- Instalar nuevos metros en ciertas partes de los sistemas para poder medir y aislar áreas con posibles problemas de salideros.

Fase técnica

- Proverles a las brigadas de pitometría nuevos y mejores equipos para detectar las fugas y localizar las tuberías.
- Implantar programas de computadoras que provean apoyo para determinar las pérdidas de agua potable.
- Proverle al personal de estudios pitométricos seminarios que mejoren sus conocimientos en las nuevas técnicas de detectar fugas.
- Antes de instalar cualquier tubería, verificar las condiciones de los suelos aledaños para evitar fallas en las conexiones debido a los asentamientos de los terrenos y evitar la corrosión.

Díaz y Quintero/Pérdidas de agua en los sistemas fluviales

Apéndice A

Cálculos de producción de agua usados en la planta Sergio Cuevas, Trujillo Alto

Este apéndice provee el método usado para calcular la producción de agua en la planta de filtros Sergio Cuevas en Trujillo Alto. Como fue señalado anteriormente, esta planta de filtros estima la producción de agua a base de las capacidades de las bombas de agua cruda que se bombea desde la represa Carraízo en Trujillo Alto, incluyendo 3.0 mgd de agua que se pierden por deficiencias internas en la planta.

Para realizar los cálculos se incluye una tabla de los galones por hora que llegan a la planta, de las posibles combinaciones de las cinco bombas instaladas en la estación de bombas de Carraízo (Tabla 8).

Método

Producción = (Núm. de horas de cada combinación) x (Factor de cada combinación de bombas en gph) + (90,000 galones por cada proceso de lavado de filtros) x (Núm. filtros lavados) + (3.0 mgd en que se estima la pérdida de agua).

Tabla 8. Descarga de agua cruda de la estación de bombas de Carraizo a la planta Sergio Cuevas

Prueba número	Combinación bombas	Factor gph
1	1-4-5	2.77
2	3-4-5	2.74
3	2-3-5	2.75
4	1-2-3-5	3.19
5	3-5	2.14
6	1-3-5	2.77
7	1-5	2.03
8	1-2-5	2.62
9	2-3-4-5	3.05
10	2-3-4	2.70
11	1-2-3	3.14
12	1-2-3-4	3.14
13	1-2	2.03
14	1	1.05
15	2	1.03
16	3	1.04
17	4	1.06
18	5	1.03
19	2-4-5	2.82
20	1-3-4-5	3.2
21	3-4	2.62
22	1-3-4	2.68
23	1-2-3-4-5	3.45

Díaz y Quintero/Pérdidas de agua en los sistemas fluviales

Apendice B

Resultados de un estudio piloto del distrito pitométrico en la carretera 846, Trujillo Alto, P.R.

El proyecto piloto consiste de un distrito pitométrico con 4,515 propiedades. Se instaló un medidor de flujo en la tubería de 12 pulgadas que discurre por la carretera 846, la cual provee agua al área que comprende las urbanizaciones Villa Andalucía, Park Court, Reparto Los Cantizales, Villa Capri, Extensión Villa Capri, Town Park, Extensión Town Park, Vosburg, Hollywood, Extensión San Agustín, Park Gardens y Hills Mansion.

El 26 de febrero de 1992 se realizó la primera prueba de subdivisión nocturna en el distrito pitométrico. A base de los datos obtenidos, llegamos a las siguientes conclusiones:

- El flujo medio diario en el distrito fue de 1.637 mgd.
- El volumen de pérdidas fue de 733,023.4 gpd.
- El porcentaje diario de pérdidas en el distrito fue de 44.78.
- Las pérdidas se calcularon utilizando un valor de 0.53 gl/prop./hr. (2 litros/prop./hr) para el consumo medio nocturno por propiedad. Este valor se determinó mediante estudios de control de fugas por Severn Trent en el Reino Unido.
- Se utilizó un factor de 20 hr/día para calcular el volúmen de pérdidas por día, para compensar el hecho de que las presiones durante la noche son más altas que durante el día. Por ende, las pérdidas calculadas durante los flujos nocturnos tienden a ser mayores.
- El sector de mayor porcentaje de fuga fue Villa Capri con 57.55 galones/propiedad/hora, seguido de Hill Mansions, Extensión San Agustín y Park Gardens. El sector de Villa Capri tendrá prioridad en la búsqueda de fugas no visibles.
- El día 27 de febrero de 1992 se comenzó una investigación de fugas en los sectores indicados.

- En los sectores de la reguladora de Villa Andalucía y Torres de Andalucía se determinaron consumos negativos lo que nos indica el siguiente comportamiento del sistema: se estaban llenando cisternas mediante bombeo ocasionando un mayor consumo en la red.

En esta primera prueba de subdivisión nocturna se informó que las pérdidas eran de 44.7% para el distrito pitométrico piloto cuando en realidad eran de 54.44%. El error consistió en que se utilizó la suma de los volúmenes de pérdidas de cada sector para computar las pérdidas y en los sectores con consumo negativo se presumió que las pérdidas eran cero. En adición, se descubrió una línea de 6 pulgadas de diámetro que suplía agua a un sector adicional, cuyas pérdidas no estaban contabilizadas.

$$\% \text{ pérdidas} = (891,247.4/1,637,000) * 100 = 54.44\%$$

La determinación de los niveles de pérdidas se debe realizar utilizando el método de "Flujo Total Nocturno", en donde se calcula el flujo neto nocturno. Para determinar éste, se debe determinar primeramente el flujo mínimo nocturno. El flujo mínimo nocturno se obtiene tomando lecturas del medidor de flujo cada 15 minutos entre las 12:00 de la noche y 5:00 de la madrugada. A este flujo mínimo se le resta el consumo nocturno de los grandes consumidores nocturnos para obtener el flujo neto nocturno, cuyo valor se utiliza posteriormente para calcular el agua nocturna no contabilizada.

Una vez determinadas las pérdidas con el método de "Flujo Total Nocturno", se realiza la prueba de subdivisión nocturna con la finalidad de determinar la prioridad en la detección de fuga en los sectores que componen un distrito pitométrico.

Como parte de nuestro estudio se determinó un consumo doméstico nocturno medio de 1.19 gal./prop./hr. Un valor mayor al utilizado en el Reino Unido de 0.53 gal./prop./hr. Este valor se determinó tomando lecturas de 42 contadores residenciales distribuidos en el distrito pitométrico.

Díaz y Quintero/Pérdidas de agua en los sistemas fluviales

Utilizando este factor, las pérdidas originales disminuyeron levemente a 51.16 %.

Después de reparar los salideros y las fugas no visibles que detectaron los investigadores pitométricos, se procedió a realizar un estudio de presiones, una segunda prueba de subdivisión nocturna para determinar la diferencia entre los consumos de los sectores y un estudio del flujo nocturno neto para determinar la reducción en pérdidas. Los datos obtenidos nos señalan lo siguiente:

- El flujo diario medio en el distrito fue de 1.527 mgd.
- El volúmen de pérdidas en la prueba de subdivisión nocturna fue de 641,023 galones por día para un porcentaje de pérdidas de 41.96.
- En esta prueba no ocurrieron consumos negativos, pues se cerraron primeramente los condominios con cisternas. Los consumos de los sectores disminuyeron con las mejoras al sistema con excepción de los condominios que dieron consumos positivos.
- Mediante el análisis de los gráficos de presión, se determinó que las presiones del sector Extensión San Agustín no bajaron cuando se cerró el sector, lo que nos indicó que la cortina estaba abierta por dicho sector. Se encontraron dos válvulas abiertas y se cerraron.
- A base de la anomalía en el sector Extensión San Agustín, se realizó una prueba de "Flujo Total Nocturno" y se obtuvo un porcentaje de pérdidas de 37.07, una reducción de 17% con respecto a las pérdidas originales.
- Los resultados obtenidos en el distrito determinaron que parte de las pérdidas eran causadas por pases en las válvulas limítrofes, una válvula defectuosa en Villa Capri y no saber de la existencia de una tubería de 6 pulgadas en el distrito pitométrico, por la cual pasaba un flujo no determinado. En adición, aumentó el número total de propiedades a 4,515.

El análisis de ambas pruebas de subdivisión nocturna, nos indica que el sector de mayores pérdidas aún continua siendo Villa Capri. El sector

conocido como Villa Capri está compuesto de las urbanizaciones Hollywood, Town Park, Extensión Town Park, Villa Capri y Extensión Villa Capri. Prácticamente un 50% de las pérdidas totales se encuentran en dicha área. En este sector hay un consumo exagerado en comparación con el número de propiedades contabilizadas. Todos nuestros esfuerzos se han concentrado en la investigación de dicho sector; se han cotejado las válvulas limítrofes para pases de agua y se han realizado pruebas de presión en ambos extremos de la cortina y no se ha podido determinar la causa de dicho consumo.

Se sospecha que haya una interconexión desconocida hacia otro sector. Se procederá a subdividir el área de Villa Capri en sectores más pequeños de modo que se pueda medir el flujo para dichos sectores. Los caudales que se obtengan nos indicarán el sector aislado de mayor consumo en comparación con las propiedades existentes.

Díaz y Quintero/Pérdidas de agua en los sistemas fluviales

Apendice C

Preparación de un estudio piloto para identificar salideros en la región sur de Puerto Rico

Procedimiento a seguir para aislar la calle #20 de la urbanización Valle Alto en Ponce del servicio de agua potable

- Colocar un medidor de presión "chart meter" que se instalará en la boca de incendio localizada en la calle #12 para verificar las presiones en el sistema.
- Cerrar la válvula principal de entrada a la calle #20 que se encuentra localizada en la servidumbre de paso entre los solares #13 y #14 de bloque L.
- Abrir todas las bocas de incendio de esa calle de manera tal que las líneas del sistema queden completamente vacías.
- Verificar en el medidor de presión, si las presiones en la red de distribución son adecuadas para continuar el proceso sin que se afecten la demás líneas del sistema.
- Si las presiones en el sistema son altas, abriremos la boca de incendio de la calle #12 para bajarlas.
- Luego de mantener presiones bajas en el sistema se comienzan a leer los contadores de servicios y el medidor de flujo a la entrada de la válvula principal del sistema cada 15 min. para recopilar los datos necesarios para aplicar el "Método de flujo total nocturno" que previamente habíamos detallado.