

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Medición y caracterización estocástica de la demanda instantánea de agua potable.
<i>Autor / Adscripción</i>	Velitchko Tzatchkov Víctor Hugo Alcocer Yamanaka Instituto Mexicano de Tecnología del Agua Felipe Ignacio Arreguín Cortés Comisión Nacional del Agua, México Daniel Feliciano García Universidad Nacional Autónoma de México
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, 20(1): 67-76
<i>Fecha de publicación</i>	2003
<i>Resumen</i>	Se reporta un estudio de resolución temporal ultra fina del comportamiento real e instantáneo de la demanda de agua potable doméstica. En tres viviendas de diferente nivel socioeconómico de Culiacán, Sinaloa, México, se colocaron micromedidores nuevos, equipados con sensor magnético de impulsos y registradores, todos ellos con la capacidad de registrar el consumo en la vivienda cada segundo. La información obtenida ayudaría también en una estimación más precisa en la variación de la demanda de agua potable y, en general, para un mejor entendimiento de los patrones reales del consumo doméstico de agua potable.
<i>Identificador</i>	http://hdl.handle.net/123456789/1236

Medición y caracterización estocástica de la demanda instantánea de agua potable

Velitchko Tzatchkov
Víctor Hugo Alcocer-Yamanaka

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Felipe Ignacio Arreguín-Cortés

Comisión Nacional del Agua, México

Daniel Feliciano-García

Universidad Nacional Autónoma de México

Este artículo reporta un estudio de resolución temporal ultra fina del comportamiento real e instantáneo de la demanda de agua potable doméstica. En tres viviendas de diferente nivel socioeconómico de Culiacán, Sinaloa, México, se colocaron micromedidores nuevos, equipados con sensor magnético de impulsos y registradores, todos ellos con la capacidad de registrar el consumo en la vivienda cada segundo. De esta manera se conoció el consumo en las viviendas cada segundo durante 101 días (más de 8 700 000 registros por vivienda). El consumo se presenta en pulsos instantáneos de intensidad y duración aleatorias. Los datos de la medición se procesaron para obtener los parámetros estadísticos de esos pulsos, como duración, intensidad y volumen con sus valores promedio, desviación estándar, coeficiente de variación y otros. El factor de utilización medio (la relación del tiempo durante el cual hubo uso del agua y el tiempo total de la medición) fue entre 3 y 5%. Estos parámetros posteriormente pueden ser usados en el modelo de pulsos rectangulares de Poisson (PRP) de Buchberger y Wu para generar series de consumo para los fines de modelos dinámicos de las redes de agua potable u otros usos. La información obtenida ayudaría también en una estimación más precisa en la variación de la demanda de agua potable y, en general, para un mejor entendimiento de los patrones reales del consumo doméstico de agua potable.

Palabras clave: *demanda de agua potable, consumo de agua potable, modelos dinámicos, redes de agua potable, variación de la demanda, medición de la demanda, demanda estocástica, simulación de redes, simulación de la demanda.*

Introducción

La estimación correcta de la demanda de agua potable representa una condición indispensable para la planeación y el diseño de los sistemas de suministro, que en gran medida determina las inversiones necesarias y la calidad

del servicio. A pesar de su importancia, en la práctica, la demanda de agua potable se establece de acuerdo con las condiciones climáticas y factores socioeconómicos indicados en manuales, o se estima con base en datos promedios de facturación mensual o mediciones del gasto suministrado en las fuentes y los tanques que

abastecen a la red. La demanda real de agua potable en un domicilio se presenta con pulsos instantáneos de consumo, generalmente de poca duración, seguidos por periodos prolongados sin consumo. En la ingeniería del abastecimiento de agua potable actualmente es común utilizar curvas de variación horaria de la demanda, como la que se muestra en la ilustración 1a. Curvas tabuladas de ese tipo se tienen en el Manual de datos básicos de la Comisión Nacional del Agua de México (Ochoa, et al., 1994), obtenidas para varias poblaciones de México. Obviamente, esas curvas están obtenidas por mediciones en tuberías principales, fuentes y tanques, donde el gasto varía de forma gradual. La demanda real de agua potable en un domicilio, definida por las necesidades de agua y hábitos de sus habitantes, tiene un carácter muy diferente, como el que se muestra en la ilustración 1b.

Ilustración 1a. Curva de la variación horaria de la demanda para diferentes ciudades del país, de acuerdo con el Manual de datos básicos de la Comisión Nacional del Agua.

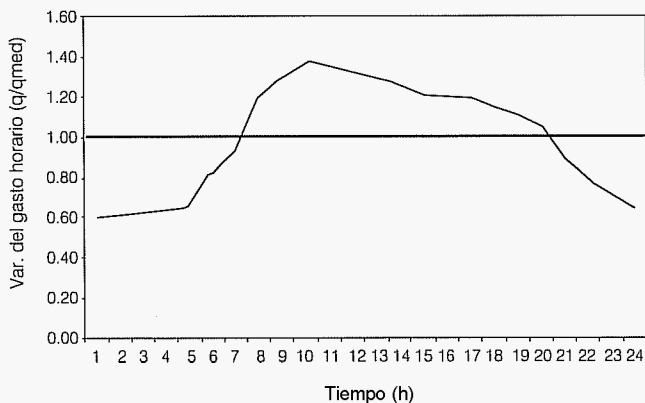
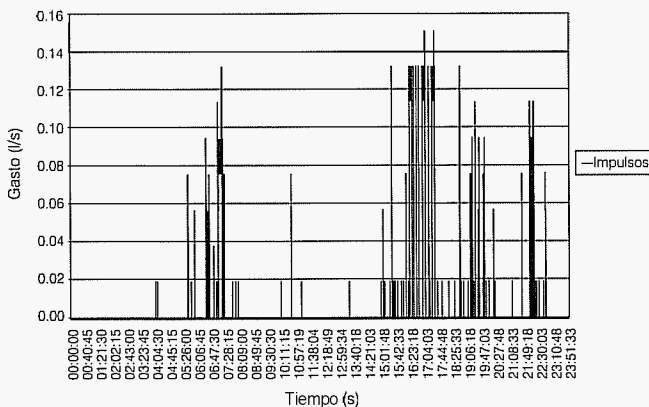


Ilustración 1b. Variación típica de la demanda domiciliaria en un día.



Es necesario considerar la variación temporal de la demanda de agua potable en al menos dos tipos de análisis:

- En el análisis del balance de las masas de agua que entran y salen de un tanque para determinar o revisar el volumen de almacenamiento.
- En una simulación (modelación) dinámica del comportamiento hidráulico del sistema de distribución (esta simulación puede incluir en sí, también el análisis del punto (a) anterior). Ahora existen varios modelos, algunos comerciales (como WaterCAD[®] y ScadRED[®]), otros de dominio público (como EPANET[®]), que pueden realizar esa simulación dinámica. En cualquiera de ellos se necesita alimentar el modelo con la variación temporal de la demanda en cada nodo.

Según el grado de detalle del modelo de la red de agua potable, un nodo puede ser usado para representar una toma de agua potable o un grupo de tomas vecinas. Con base en un análisis estadístico de los pulsos de consumo medidos, Buchberger et al. (2003) demostraron que la variación de la demanda doméstica de agua potable de un grupo de tomas puede ser representada con una curva continua cuando $\rho N > 5$, donde ρ es el factor de utilización (la relación del tiempo durante el cual hay uso del agua y el tiempo total) y N es el número de tomas en el grupo. El factor de utilización medio que se obtuvo en este estudio varía entre 3 y 5%, siendo mucho menor (del orden de los 0.5%) para las horas de la madrugada. Con base en ese resultado, se tendrá una variación continua de la demanda en un nodo cuando el nodo representa al menos cien tomas, y hasta mil tomas para las horas de la madrugada. Aún para este número de tomas, la curva de variación de la demanda será continua, pero diferente de una curva de variación del gasto suministrado (ilustración 1a) medida en las fuentes o tanques que alimentan a la red.

Por lo anterior, una curva de variación de la demanda, como la mostrada en la ilustración 1a, daría buenos resultados para el análisis de tipo (a), donde los gastos que entran y salen varían suavemente; pero para la simulación dinámica de la red podría ser confiable solamente para las tuberías principales, donde la variación del flujo generalmente es paulatina. En los nodos que se usan para representar el propio consumo, el uso de la curva de demanda mostrada en la ilustración 1a daría resultados inexactos debido a los múltiples cambios que presenta una demanda real en los domicilios, a no ser que el nodo represente un gran número de tomas.

Buchberger y Wu (1995), Buchberger y Wells (1996), Buchberger y Lee (1999), y Buchberger et al. (2003) propusieron y validaron un modelo capaz de generar la demanda estocástica doméstica de agua potable, llamado modelo de pulsos rectangulares de Poisson (en inglés, *Poisson Rectangular Pulse Model*) abreviado como modelo PRP. El modelo PRP asume que la demanda se presenta en pulsos rectangulares (en el plano tiempo-demanda), con duración e intensidad aleatorias, cuyo surgimiento en el tiempo obedece a un proceso de Poisson no homogéneo. La aplicación de ese modelo requiere de varios parámetros básicos de la demanda, como la frecuencia de uso del agua por hora del día (u otro intervalo de tiempo), la intensidad y duración promedio de los pulsos, y sus coeficientes de variación. Con el uso de esos parámetros, el modelo PRP puede simular la demanda real de agua potable en los domicilios, que luego puede ser usada en modelos dinámicos de la operación de las redes. Tzatchkov et al. (2001) y Buchberger et al. (2003) presentan resultados de ese tipo del modelo PRP, con parámetros de demanda obtenidos en los Estados Unidos de América, y también analizan la influencia de la demanda estocástica sobre el comportamiento hidráulico de la red y la dispersión del desinfectante. Asimismo, se podrían estimar de manera indirecta las fugas de algún sector analizado (Alcocer et al., 2004)

En forma muy abreviada, la aplicación del modelo PRP para simular secuencias de demanda de agua potable consiste en lo siguiente:

1. Datos de entrada (por cada hora del día u otro intervalo de tiempo):
 - a) Frecuencia de uso del agua.
 - b) Duración media y desviación estándar de la duración de los pulsos de demanda.
 - c) Intensidad media y desviación estándar de la intensidad de los pulsos de demanda.
2. Secuencia de los cálculos (para cada hora del día u otro intervalo de tiempo):
 - a) Usando números aleatorios se generan los instantes en que se presentan pulsos de demanda, con la frecuencia correspondiente al intervalo de tiempo.
 - b) Usando números aleatorios, y la intensidad media y su desviación estándar, se genera la intensidad aleatoria de cada pulso de demanda.
 - c) Usando números aleatorios, la duración media y su desviación estándar, se genera la duración aleatoria de cada pulso de demanda. Los pulsos de demanda pueden traslaparse en este proceso.

- d) Se necesita de cierto cuidado cuando un pulso de demanda pasa de un intervalo de tiempo a otro.
3. Resultado: una serie de demanda aleatoria, cuyos parámetros estadísticos son iguales a los parámetros especificados en los datos de entrada.

Debido al uso de números aleatorios, en cada corrida del modelo PRP se obtendrá una serie de tiempo diferente (una realización diferente) de la demanda, pero los parámetros estadísticos de todas las series generadas se conservan. Esta es la situación real de la demanda doméstica de agua potable: la serie de consumo de agua que existió un día en un domicilio nunca será exactamente la misma al día siguiente (uso aleatorio del agua), sólo sus parámetros estadísticos se mantienen entre un día y otro.

El proceso de simulación descrito es válido para una sola toma y para un grupo de tomas alimentada por una tubería, siempre y cuando se trabaje con los parámetros estadísticos correspondientes. Estos últimos pueden obtenerse por medio de mediciones en la toma, como se hace en el presente estudio. Existen dos posibilidades para obtener tales parámetros para un grupo de tomas:

- a) Medir la variación del gasto en el tubo que alimenta al grupo de tomas.
- b) Medir en una o varias tomas representativas, y calcular los parámetros estadísticos para el grupo de tomas por las expresiones teóricas obtenidas para este fin por Buchberger et al. (2003).

La segunda opción siempre es preferible para una red de tuberías, dado que se mediría solamente en tomas y los resultados pueden ser usados para cualquier grupo de tomas sin tener que medir en los tubos que abastecen a cada grupo.

En este artículo se reporta una parte de los resultados de un estudio llevado a cabo en México sobre la variación estocástica de la demanda doméstica de agua potable (Alcocer et al., 2003). Se instalaron micromedidores con registro electrónico de la demanda en tres hogares de diferente nivel socioeconómico y se registró el consumo de agua potable en esos hogares con resolución temporal de un segundo durante más de tres meses. Lo anterior representa aproximadamente 26 000 000 de registros, con lo cual se tiene el banco de datos más grande de registro de datos de consumo instantáneo de agua potable en América Latina, y el segundo más grande en el mundo, después del trabajo pionero de Buchberger et al. (2003) en los Estados Unidos de América. Los registros se procesaron para obtener la intensidad, duración y frecuencia (esta última expresada

por medio del factor de utilización) de los pulsos de consumo. Aparte de poder ser usados en el modelo PRP para generar series de demanda estocástica para la modelación dinámica de las redes de agua potable, los resultados obtenidos ayudarán a entender mejor la variación de la demanda de agua potable en el día y el comportamiento de las fugas.

Cabe señalar que el objetivo del presente artículo es demostrar, con base en un estudio de campo, la factibilidad de obtener propiamente los parámetros requeridos para la modelación estocástica de la demanda de agua potable, similar al estudio reportado por Buchberger et al. (2003). El presente estudio demuestra que los parámetros necesarios pueden ser obtenidos con equipamiento de medición relativamente económico, y personal propio de un organismo operador. El estudio que se reporta en este artículo no está dirigido a obtener la variación típica de la demanda de agua potable en México, ni de estimar las dotaciones, dado que esos estudios pueden ser realizados con equipos mucho más sencillos (no es necesario registrar el consumo cada segundo), y requieren de una muestra representativa de domicilios con diferentes características, y en diferentes localidades del país. Por otro lado, ya se tienen en el país estudios de dotaciones de ese tipo (CNA-IMTA, 1993).

Metodología y puntos de medición

Equipo empleado

Con el objeto de medir y registrar en forma digital el consumo instantáneo, en cada punto de medición se emplearon tres dispositivos:

1. Micromedidor de tipo disco nutante termoplástico 5/8", marca BadgerMeter®.
2. Sensor magnético de los impulsos generados por el micromedidor modelo MS200, marca RADCOM Technologies®. Este dispositivo capta la señal proveniente del micromedidor volumétrico y la envía al registrador (*data logger*) de impulsos.
3. Registrador de los impulsos magnéticos, marca RADCOM Technologies®. Comúnmente conocido como *data logger*, almacena los registros de los impulsos enviados por el sensor magnético.

La ilustración 2 muestra el arreglo de estos tres dispositivos en uno de los domicilios.

El micromedidor utilizado tiene las siguientes especificaciones:

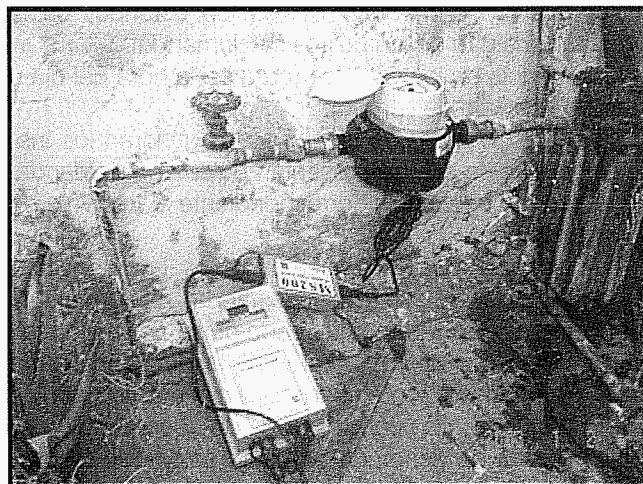
Rango de operación típico:	0.5 - 25 GPM (1.90 a 95 l/min) (100% ± 1.5%)
Gasto mínimo:	0.25 GPM (1.0 l/min)
Gasto máximo continuo:	15GPM (57 l/min)
Pérdida de presión:	3.5 PSI a 15 GPM (0.24 bar a 57 l/min)

Cada lectura de micromedidor consiste en cierto número de impulsos o unidades; las lecturas se obtienen y contabilizan cada segundo. Un solo impulso corresponde aproximadamente a 1 l/min. Si el gasto medido no es múltiplo a 1 l/min, la lectura oscila entre los dos números consecutivos correspondientes; por ejemplo, si el gasto fuera de 3.40 l/min, la lectura oscilaría entre tres y cuatro unidades, con una mayor frecuencia de tres. Para gastos menores de 1 l/min (el gasto mínimo) el medidor genera una señal intermitente, es decir, varias lecturas de cero seguidas por una lectura instantánea de una unidad (1 l/min) y nuevamente lecturas de cero.

El registrador tiene la capacidad de almacenar más de 250 000 datos (casi tres días con un intervalo de un segundo), consistentes en fecha, hora y número de impulsos. Los datos almacenados pueden ser vaciados en una computadora empleando el *software*.

Con una cierta periodicidad establecida, personal de la Junta de Agua Potable de la ciudad llegaba a los puntos de medición para vaciar los datos almacenados a una computadora portátil y configurar un nuevo ciclo de registro.

Ilustración 2. Arreglo de medición usado, compuesto de micromedidor, sensor magnético de impulsos y registrador.



Puntos de medición

Los puntos de medición se ubicaron en tres viviendas de diferentes colonias de la zona Humaya de la ciudad de Culiacán, Sinaloa. El cuadro 1 muestra los datos principales de esos domicilios. En cada uno de ellos se cambió el micromedidor existente por un micromedidor nuevo y se instaló el resto del equipamiento mostrado en la ilustración 2.

El servicio de agua potable en la zona Humaya es continuo, igual que en toda la ciudad de Culiacán. Ninguna de las tres viviendas tiene almacenamiento intradomiciliario (cisterna o tinaco). Esto garantiza que las lecturas del micromedidor representen directamente el consumo instantáneo de agua potable, de acuerdo con los objetivos de este estudio. La presencia de cisterna o tinaco en el domicilio alteraría la situación, dado que la lectura del medidor se vería afectada por el llenado del tinaco o la cisterna. El modelo PRP se originó en los Estados Unidos de América, donde el servicio de agua potable es continuo y las condiciones climáticas no favorecen el uso de cisternas y tinacos. El modelo puede ser adaptado para considerar cisternas y tinacos.

Calibración de los equipos de medición y registro

Dado que el equipo registra solamente unidades (impulsos), expresadas en números enteros, para obtener el gasto medido fue necesario obtener a qué gasto corresponde una unidad; en otras palabras, calibrar el equipo; para ello se usó el siguiente procedimiento simplificado:

- a) Se utiliza un recipiente de volumen conocido (de preferencia de veinte litros, como en Ochoa y Bourguett, 1996) con graduación.

- b) Con la ayuda de un cronómetro se mide el tiempo de llenado del recipiente. Vale la pena señalar que el tiempo de las pruebas se relaciona con el horario que señala el propio registrador (data logger).
- c) De forma simultánea al llenado del recipiente se revisa que el medidor señale el volumen empleado durante la actividad.
- d) Finalmente se exportan los datos desde el registrador a la computadora, empleando el *software* y se aplica la expresión siguiente:

$$F = \frac{V_c}{V_{data}} \quad (1)$$

donde:

- F = factor de conversión de un impulso a gasto medido.
- V_c = volumen del recipiente.
- V_{data} = total de unidades registradas.

La ilustración 3 muestra un ejemplo de la variación de las lecturas del equipo en una calibración. En este ejemplo, el tiempo de llenado del recipiente de veinte litros fue de 148 segundos y el total de impulsos registrados, de 1 064, por lo que el factor de corrección es igual a $20/1\ 064 = 0.01879$ l/s por cada impulso marcado por el equipo. El gasto que fluyó a través del medidor fue de $20/148 = 0.1351$ l/s, correspondiente a 7.19 impulsos. Dado que el equipo sólo registra números enteros, las lecturas oscilaron entre siete y ocho impulsos con una predominancia de siete.

Para el domicilio P₁, se obtuvo un factor $F=0.019588639$; para el domicilio P₂, se obtuvo $F=0.018165304$, y para el domicilio P₃, $F=0.01879699$. Como se puede observar, el factor de calibración es prácticamente el mismo en los tres domicilios.

Cuadro 1. Datos de los domicilios donde se midió.

Punto	Ubicación	Nivel socioeconómico	Habitantes
P ₁	Nevado de Toluca, Colonia Pradera Dorada	Alto	2 adultos
P ₂	De la Virtud entre Voluntad y Temple, Fracc. Horizontes	Medio	5 (2 adultos + 3 menores)
P ₃	Avenida Internacional entre Chile y Brasil, Colonia Humaya	Bajo	3 (2 adultos + 1 menor)

Medición de la demanda

El registro continuo de la demanda instantánea en las tres viviendas mencionadas se llevó a cabo durante 101 días (del 20 de agosto al 29 de noviembre de 2003), generándose más de 8 700 000 registros por vivienda. Cada registro contiene fecha, hora con minutos y segundos, y número de unidades registrado en ese instante. La mayor parte de los registros (más de 95%) contiene cero unidades, dado el carácter esporádico de la demanda. La ilustración 4 muestra el comportamiento típico de los registros para un periodo de ocho horas y 47 minutos, aproximadamente.

Ilustración 3. Lecturas en la calibración del equipo en un volumen de veinte litros.

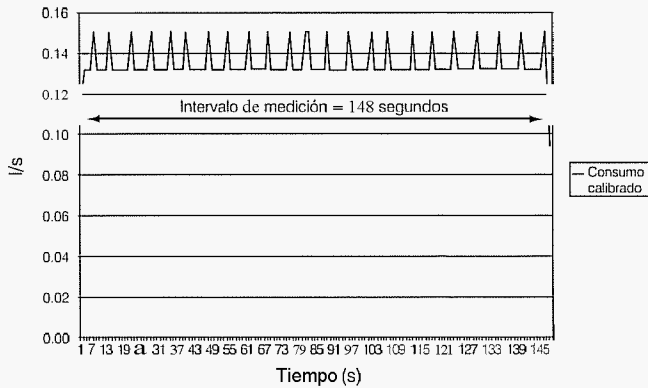
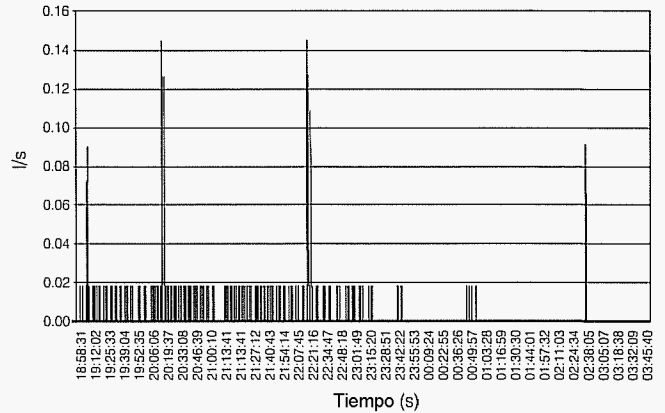


Ilustración 4. Variación de la demanda en la casa habitación número dos.



Se observaron los siguientes patrones en los registros:

- Periodos largos con lecturas de cero, interrumpidos por pulsos de consumo de diferente intensidad. Este patrón corresponde a una vivienda donde no hay fugas. La ilustración 5 muestra el comportamiento del consumo en un periodo de tres minutos y 56 segundos, dentro del cual se presentaron cuatro pulsos. El primero de ellos presentó 0.206 litros de volumen y una duración de 15 segundos. El siguiente pulso mostró 32 segundos de duración y un volumen de 3.036 litros. El tercer pulso tuvo una duración de 14 segundos y un volumen total de 0.640 litros; y el último pulso, con volumen de 3.670 litros y duración de 1:06 minutos, fue el mayor de todos. En el principio de cada pulso la intensidad se incrementa abruptamente (debida a la aceleración inicial del flujo al iniciar el uso del agua), luego baja y oscila por un tiempo (correspondiente a un gasto constante), y termina con un decremento brusco.
- Lecturas aisladas de una unidad, seguidas por varias lecturas de cero. En la ilustración 4, por ejemplo, se observa ese comportamiento en el intervalo de 00:36:26 a 01:03:28 horas. Este patrón de demanda se explica por la presencia de fugas muy bajas en la vivienda, como las causadas por goteras. Dado que el gasto que generan esas fugas es muy pequeño, comparado con el gasto correspondiente de una unidad de lectura (que es de 1 l/min, aproximadamente), el medidor registra una lectura de una unidad cada vez que se acumule

la cantidad de agua correspondiente en su depósito de medición.

- Lecturas mantenidas de una unidad, continuas o interrumpidas por intervalos cortos, con eventuales pulsos esporádicos de mayor intensidad. Este patrón de demanda corresponde a una fuga permanente en la vivienda debida a una llave o válvula que no quedó bien cerrada, o un desperfecto en las tuberías o sus juntas. En la ilustración 6, por ejemplo, se observa este comportamiento registrado en una de las viviendas.

Procesamiento de los datos de la medición

Los datos (8 700 000 registros por vivienda) se introdujeron en una base de datos de *MSAccess*, y se programaron varias rutinas en *Visual Basic* para revisarlos y procesarlos. La cantidad de datos se reduce sustancialmente (alrededor de veinte veces) después de eliminar los registros de lectura cero, pero éstos no podían eliminarse antes de revisar la continuidad de los registros en el tiempo; es decir, antes de asegurarse de que no faltaban registros por errores o porque el personal encargado de vaciar periódicamente los datos del registrador no saltó algún grupo de registros. Cada vez, en el momento de configurar el registrador para un nuevo ciclo de registro, también era posible perder las lecturas por varios minutos. Se utilizó entonces el siguiente procedimiento:

- El registrador genera archivos de texto con los registros de fecha, hora y lectura, en un renglón por cada registro. Estos archivos se importan a una

Ilustración 5. Comportamiento del consumo en cuatro pulsos de demanda.

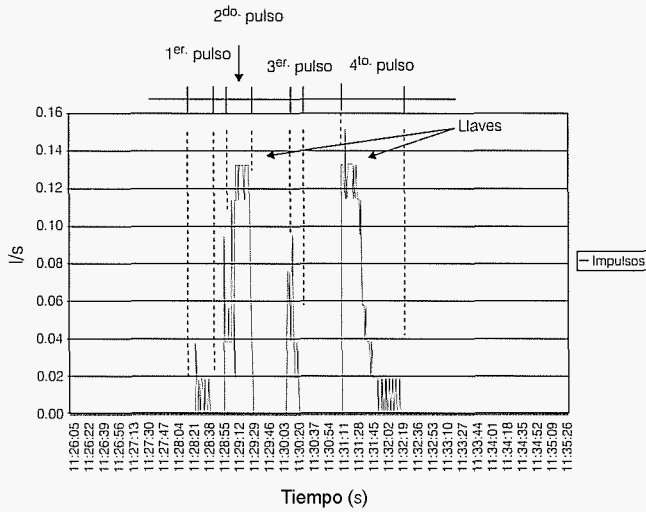
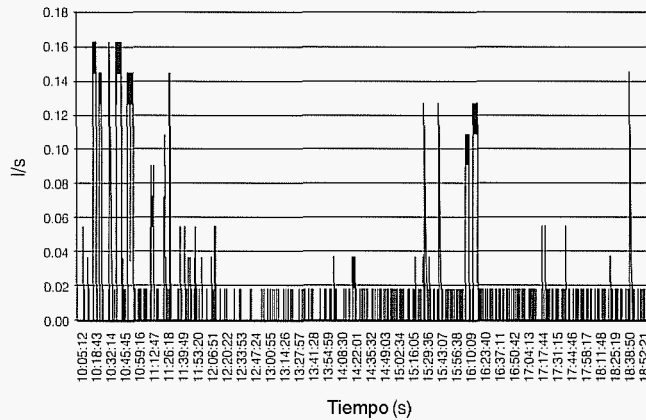


Ilustración 6. Variación de consumo en una vivienda con fuga. Fecha: 20 de agosto de 2003.



base de datos de *MSAccess* y se ordenan por fecha y hora. Se programan rutinas que revisan si la hora de los registros va en forma consecutiva de segundo a segundo. De esta manera se detecta una serie de errores que, independientemente de su origen, se manifiesta en registros faltantes, registros repetidos y registros insertados fuera de su lugar. En algunos casos faltan días completos en los registros. Los datos se ordenan y los faltantes se completan con datos de otras fechas del mismo día de la semana.

b) Una vez que se asegura que no faltan datos (y que no haya datos repetidos), se ejecuta una rutina que

calcula el intervalo de tiempo entre los pulsos de demanda consecutivos registrados.

- c) Se eliminan los registros de lectura cero.
- d) La información obtenida en el punto (b) anterior se utiliza para separar los pulsos que representan fugas pequeñas (como goteras) de los verdaderos pulsos de demanda o fugas importantes, con base en el criterio descrito anteriormente; es decir, si el pulso estaba aislado (con duración de un segundo y ciertos intervalos de tiempo después del pulso anterior y antes del pulso siguiente) y tiene una intensidad de una unidad, se considera que reflejaba una fuga muy pequeña que se acumula en el intervalo entre cada pulso consecutivo de este tipo. En la casa habitación número uno, por ejemplo, para todo el intervalo de medición de 8 690 347 segundos, se presentaron 43 113 pulsos de este tipo.
- e) Las lecturas restantes corresponden a pulsos de demanda (o fugas pronunciadas si se mantienen por largo tiempo). Cada grupo de lecturas consecutivas diferentes de cero corresponde a un pulso de demanda con cierta duración, o a un grupo de pulsos de demanda.

De acuerdo con el comportamiento hidráulico mostrado en la ilustración 5, se definieron los pulsos de demanda y su intensidad de la manera siguiente:

- Al iniciar cada grupo de lecturas consecutivas diferentes de cero, las primeras dos lecturas no se toman en cuenta (dado que el flujo se establece en esos primeros dos segundos). A partir de la tercera lectura se monitorea la magnitud de la lectura. Si las siguientes oscilan entre dos valores consecutivos, como en la ilustración 3, esto significa que se mantiene un pulso de demanda de intensidad constante. En el momento en que la magnitud de la lectura se reduce en más de una unidad comienza la parte final del pulso, que se asume puede durar hasta tres segundos, después de lo cual puede comenzar un nuevo pulso con otra intensidad. De igual forma, un incremento brusco en la lectura significa el fin del pulso y comienzo de un nuevo pulso. Una vez definidos los instantes de inicio y fin del pulso de demanda, y con esto su duración, se calcula su intensidad media.
- Se calcula la suma de la duración de todos los pulsos de demanda. Esta suma, dividida entre la duración de periodo total de medición, proporciona el factor de utilización.

- Se calculan los parámetros estadísticos de las series de pulsos de demanda y de fugas, como valor mínimo y máximo, promedio, desviación estándar y coeficiente de variación.

Resultados

El cuadro 2 muestra los parámetros de consumo de la serie de pulsos de demanda calculados. Los cuadros 3 a 5 muestran los parámetros estadísticos del volumen, duración e intensidad de los pulsos de demanda, y el cuadro 6, los parámetros estadísticos de las microfugas.

Conclusiones

El conocimiento detallado en forma espacial y temporal de los consumos es una aportación realizada en el estudio. Con un intervalo de un solo segundo durante 101 días, aproximadamente, se almacenaron registros de consumo; lo anterior representa más 26 000 000 de datos, teniendo el banco de información más grande registrado en México y América Latina, y uno de los más grandes en el ámbito internacional.

A partir de estos estudios se concluye que únicamente del 3 al 5% del total del día se destina a

Cuadro 2 Resultados de consumo obtenidos en los tres domicilios para el periodo de medición de 101 días.

Domicilio	Volumen total de consumo (l)	Volumen total de microfugas (l)	Microfugas con relación al volumen total de consumo γ	Volumen total de consumo con microfugas (l)	Consumo medio diario (l/día)	Consumo medio diario con microfugas (l/día)
P ₁	42 241	776	1.83	43 017	414.00	422.00
P ₂	29 359	2 651	9.02	32 009	287.80	313.80
P ₃	42 035	543	1.29	42 578	412.10	417.40

Domicilio	Consumo medio por habitante (l/hab/día)	Consumo medio por habitante con microfugas (l/hab/día)	Factor de utilización promedio (%)	Total de pulsos de consumo
	207.00	210.86	5.32	21 780
	57.60	62.80	3.43	24 639
	137.40	139.10	4.45	31 524

Cuadro 3. Parámetros estadísticos del volumen de los pulsos de consumo obtenidos en los tres domicilios para el periodo de medición de 101 días.

Domicilio	Promedio (l)	Mínimo (l)	Máximo (l)	Desviación estándar (l)	Varianza (l ²)
P ₁	1.94	0.018	213.60	7.05	49.78
P ₂	1.19	0.018	80.86	4.33	18.72
P ₃	1.33	0.018	123.90	4.42	19.55

Cuadro 4. Parámetros estadísticos de la intensidad de los pulsos de consumo obtenidos en los tres domicilios para el periodo de medición de 101 días.

Domicilio	Promedio (l/min)	Mínimo (l/min)	Máximo (l/min)	Desviación estándar (l/min)	Varianza (l/min) ²
P ₁	4.40	1.08	18.36	2.56	6.54
P ₂	4.04	1.08	37.44	3.29	10.80
P ₃	5.57	1.08	17.43	3.56	12.67

Cuadro 5. Parámetros estadísticos de la duración de los pulsos de consumo obtenidos en los tres domicilios para el periodo de medición de 101 días.

Domicilio	Promedio (s)	Mínimo (s)	Máximo (s)	Desviación estándar (s)	Varianza (s ²)
P ₁	21.22	1	3 086	74.16	5 500
P ₂	12.23	1	1 148	36.27	1 316
P ₃	12.38	1	993	33.97	1 154

Cuadro 6. Parámetros estadísticos de la intensidad de las microfugas obtenidos en los tres domicilios para el periodo de medición de 101 días.

Domicilio	Promedio (l/hora)	Mínimo (l/hora)	Máximo (l/hora)	Desviación estándar (l/hora)	Varianza (l/hora) ²
P ₁	7.48	0.002	32.40	10.59	112.09
P ₂	3.95	0.0009	32.40	6.46	41.74
P ₃	10.80	0.001	32.40	11.25	126.67

actividades de consumo de agua. También contribuye en la proposición de nuevos estudios sobre la curva de la variación de la demanda, la cual, en los estudios existentes, presenta la principal desventaja de incluir las fugas en la red, situación irreal al intentar representar la demanda de los usuarios.

Las fugas dentro de la casa habitación presentan, en relación con el consumo total, porcentajes menores al 2%, salvo en la casa habitación número dos, con un 9.02%. También es importante señalar que la magnitud del consumo contrasta considerablemente con los estándares manejados en el país para el caso en particular de la ciudad de Culiacán, donde predomina el clima cálido (Ochoa et al., 1994).

El análisis anterior presenta nuevos horizontes en el campo de la modelación en sistemas de distribución en los próximos años.

Agradecimientos

Se reconoce el apoyo de la Junta de Agua Potable y Alcantarillado de la ciudad de Culiacán (JAPAC), Sinaloa, específicamente al contador público Wilfredo Acosta Salazar (gerente general), a los ingenieros Joel Félix Díaz, Alfonso Olmeda, Rubén Servín, Manuel Luna, Jorge Beltrán, Giovanni Saraco y, en general, a todo el personal de la Gerencia de Operación del propio organismo.

Nota

En el presente trabajo los autores manifiestan que se empleó el punto decimal en vez de la coma decimal como lo señala la Normal Oficial de Unidades de Medida, por facilidad hacia los lectores interesados en el presente artículo.

Recibido: 11/01/2004

Aprobado: 13/04/2004

Referencias

- ALCOCER, V., TZATCHKOV, V., FELICIANO, D., MARAVILLA, E. y MARTÍNEZ, E. Modelo de transporte de sustancias en flujo no permanente en redes de agua potable. Informe final. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua-Comisión Nacional del Agua, 2003, 119 pp.
- ALCOCER, V., TZATCHKOV, V., BUCHBERGER, S.G., ARREGUÍN, F.I., FELICIANO, D. *Stochastic residential water demand characterization*. World Water & Environmental Resources Congress, 6th, Annual Symposium on Water Distribution System Analysis. Salt Lake City, Utah, junio, 2004.
- BUCHBERGER, S.G. y WU, L. Model for instantaneous residential water demand. *Journal of hydraulic engineering*. ASCE. 1995, pp. 232- 245.
- BUCHBERGER, S.G. y WELLS, L. Intensity, duration, and frequency of residential water demands. *Journal of hydraulic engineering*. ASCE. 1996, pp. 11- 19.
- BUCHBERGER, S.G. y LEE, Y. Evidence supporting the Poisson pulse hypothesis for residential water demands. *Water industry systems: modeling and optimization applications*. Vol. 1. Savic, D. y Walters, G. (editores). Baldock, Reino Unido: Research Studies Press Ltd., 1999, pp. 215-227.
- BUCHBERGER, S.G., CARTER, J.T., LEE, Y. y SCHADE, T.G. *Random demands, travel times, and water quality in deadends*. Denver, EUA: AWWA Research Foundation. 2003.
- CNA-IMTA. Estudio de actualización de dotaciones en el país. Informe final. Jiutepec, México: Comisión Nacional del Agua e Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 1993.
- OCHOA, L. y BOURGUETT, V. (editores). *Reducción integral de pérdidas de agua potable*. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 1996.
- OCHOA, L., RANGEL, J., RODRÍGUEZ, J., DELGADO, J. y VÁZQUEZ, A. Datos básicos. Manual de *diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. México, D.F.: Subdirección General de Infraestructura Hidráulica Urbana e Industrial-Gerencia de Normas Técnicas-Comisión Nacional del Agua-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 1994, 89 pp.
- TZATCHKOV, V.G., ALDAMA, A.A., ARREGUÍN, F.I., BUCHBERGER, S.G. y LEE, Y. Advection-dispersion transport in water distribution networks with intermittent flow. *Water resources management*. Boston: WIT Press, Southampton, 2001, pp. 217-226.

Abstract

TZATCHKOV, V., ALCOCER-YAMANAKA, V.H., ARREGUÍN-CORTÉS, F.I. & FELICIANO-GARCÍA, D. *Measurement and stochastic characterization of instantaneous water demand. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XX, no. 1, January-March, 2005, pp. 67-76.*

This paper reports an ultrafine time resolution study of real and instantaneous residential water demand behavior. Instrument packs composed of new water meters, impulse signal sensors and data loggers, able to measure and register flow every second, were installed on the service lines of three homes in the city of Culiacán, Sin. This way, the real water demand was recorded every second during 101 days (more than 8'700,000 registers per home). Water demand occurs in the form of pulses of random duration and intensity. The data were processed to obtain the statistical parameters of these pulses, including duration, intensity and volume and their average, standard deviation, and coefficient of variation. The average utilization factor (the ratio of the time water was used to the total measuring time) is between 3 and 5 %. These parameters can be used in the Buchberger and Wu Poisson Rectangular Pulse (PRP) model to generate water demand series for dynamic distribution network models, and for other uses. The findings also help to define more precisely daily residential water use and to have a better understanding of real water use patterns.

Keywords: *water demand, water consumption, dynamic models, water distribution networks, demand variation, demand measurements, stochastic demand, distribution network simulation, demand simulation.*

Dirección institucional de los autores:

Dr. Velitchko Tzatchkov

*Especialista en hidráulica.
Subcoordinación de Hidráulica Rural y Urbana,
Coordinación de Tecnología Hidráulica,
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua,
Paseo Cuauhnáhuac 8532,
colonia Progreso,
62550 Jiutepec, Morelos, México,
teléfono: + (52) (777) 3 29 36 00, extensión 898,
velitchk@tlaloc.imta.mx*

M. en I. Víctor Hugo Alcocer-Yamanaka

*Especialista en hidráulica.
Subcoordinación de Hidráulica Rural y Urbana,
Coordinación de Tecnología Hidráulica,
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua,
Paseo Cuauhnáhuac 8532.*

*colonia Progreso,
62550 Jiutepec, Morelos, México,
teléfono: + (52) (777) 3 29 36 00, extensión 206,
valcocer@tlaloc.imta.mx*

Dr. Felipe Ignacio Arreguín-Cortés

*Subdirector general Técnico
Comisión Nacional del Agua,
Insurgentes Sur 2416, colonia Copilco El Bajo,
Delegación Coyoacán, 04340 México, D.F.,
teléfono: + (52) (55) 51 74 44 00, extensiones 1620 y 1621,
felipe.arreguin@cna.gob.mx*

Ing. Daniel Feliciano García

*Estudiante de maestría.
División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería,
Universidad Nacional Autónoma de México,
Pirù 9, colonia Villas del Descanso, 62550 Jiutepec, Morelos, México,
teléfono: + (52) (777) 3 19 04 85,
danfel@hotmail.com*