



Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

MODELACIÓN Y DISEÑO DE REDES DE AGUA POTABLE CON DEMANDA ESTOCÁSTICA INTEGRADOS CON SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

ETAPA 2

Proyecto contratado: CONACYT – CONAGUA - IMTA
Fondo Sectorial de Investigación y Desarrollo Sobre el Agua
CONAGUA-CONACYT
Clave del proyecto: CONAGUA-2011-165781
Proyecto: 165781

Coordinación de Hidráulica

Clave interna IMTA: HC1334.5

Por el IMTA:
Coordinación de Hidráulica Urbana
Dr. Velitchko G. Tzatchkov
Dr. Víctor Hugo Alcocer Yamanaka

**Gerencia de Calidad del Agua y Secretario Administrativo del Fondo Sectorial CONAGUA –
CONACYT**
Ing. Enrique Mejía Maravilla
Biol. Araceli Chávez Velasco



Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

Contenido

1	INTRODUCCIÓN.....	7
2	ACTIVIDADES, METAS ALCANZADAS Y RESULTADOS.....	9
2.1	Selección de los sitios de aplicación.....	9
2.2	Comparación de los resultados de las mediciones con respecto a las series sintéticas generadas por el esquema estocástico.....	9
2.3	Construcción en el laboratorio del IMTA de un modelo físico de un tanque, una cisterna y un tinaco, y experimentos hidráulicos y de calidad del agua.....	10
2.4	Sistema computacional de análisis y diseño de redes de agua potable integrado con sistema de información geográfica.....	11
2.5	Evaluación de un sistema de desinfección en depósitos intradomicilarios.....	11
3	EXPERIMENTOS DE MEZCLA DEL AGUA EN DEPOSITOS (SERIE 2).....	13
3.1	Área de estudio.....	15
3.2	Materiales.....	16
3.3	Metodología.....	21
3.3.1	Preparación de la solución salina (trazador).....	22
3.3.2	Preparación del modelo físico (Tinaco de acrílico).....	22
3.3.3	Inyección del trazador.....	23
3.3.4	Medición del trazador a la salida.....	25
3.4	Resultados.....	27
4	MODELACIÓN HIDRÁULICA INTEGRADA CON SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG).....	35
4.1	Modelación hidráulica y SIG.....	35
4.2	Integración del SIG y el modelo hidráulico.....	35
4.3	Software comercial de modelación integrada con SIG.....	38
4.4	Aspectos de la aplicación de los sistemas SIG para sistemas de distribución.....	39
4.4.1	Asignación de demanda.....	39
4.4.2	Fuentes de agua potable.....	40
4.4.3	Calidad y edad del agua.....	42
4.4.4	Aplicaciones avanzadas.....	42
5	SISTEMAS DE MODELACIÓN DE REDES DE AGUA POTABLE INTEGRADOS CON INFORMACION GEOGRAFICA.....	45
5.1	Pipelinenet.....	45
5.2	Giswater.....	51

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

5.3	Plex Earth.....	56
5.4	UFC.....	64
6	PROGRAMACION DE UN SISTEMA BASADO EN EPANET CON VISUALIZACIÓN DE INFORMACION GEOGRAFICA (EPANET-IMTA)	73
6.1	Introducción	73
6.2	Conversión de código del motor de cálculo e interfaz de Epanet completo en Visual Basic NET	73
6.3	Interfaz Gráfica mediante plataforma de Sistema de Información Geográfica	74
6.4	Agregar capas de planimetría en formato shape en el proyecto	75
6.5	Conexión a servicios de imagen WMS.....	77
6.6	Trazo de Red de Agua Potable Georreferenciado.....	80
6.7	Importar proyectos EPANET (inp).....	83
6.8	Características de EPANET-IMTA	87
7	APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS INTEGRADOS CON INFORMACIÓN GEOGRAFICA EN TIJUANA, B.C. Y EN XALAPA, VER.	93
7.1	Pipelinenet.....	93
7.2	Giswater	95
7.3	Plex.Earth	97
8	MODELACIÓN DE LA DEMANDA ESTOCÁSTICA Y COMPARACIÓN CON RESULTADOS DE MEDICIONES	99
8.1	Cálculos y resultados de mediciones en Tijuana	99
8.1.1	Cálculo de los coeficientes de variación Máximo Horario y Mínimo Horario, tomando como referencia el gasto medio diario.....	99
8.1.2	Comparativo de los coeficientes de variación media horaria e instantánea .	102
8.1.3	Resultados de los datos experimentales con respecto a los datos teóricos... 110	
8.1.3.1	<i>Datos Experimentales</i>	110
8.1.3.2	<i>Datos teóricos</i>	112
8.2	Cálculos y resultados de mediciones en Xalapa	115
8.2.1	Cálculo de los coeficientes de variación Máximo Horario y Mínimo Horario, tomando como referencia el gasto medio diario.....	115
8.2.2	Comparativo de los coeficientes de variación medida horaria e instantánea	119
9	MEDICIONES CONTINUAS DE DEMANDA ESTOCÁSTICA DE AGUA POTABLE CON RESOLUCIÓN FINA EN MODELO DE LABORATORIO.....	123
9.1	Objetivo.....	123

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

9.2	Justificación	123
9.3	Antecedentes	123
9.4	Metodología	124
9.5	Área de estudio	125
9.6	Materiales.....	125
9.6.1	Sistema de Caudalímetro electromagnético	125
9.6.2	Micromedidor domiciliario normal	127
9.7	Resultados	127
9.8	Álbum fotográfico de las mediciones de demanda	188
10	SECTORIZACIÓN DE REDES DE AGUA BASADA EN LA TEORÍA DE GRAFOS E ÍNDICES DE RENDIMIENTO ENERGÉTICOS.....	207
10.1	Introducción	207
10.2	Metodología	211
10.3	Caso de estudio.....	218
11	EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE DESINFECCION DEL AGUA EN DEPOSITOS INTRADOMICILARIOS	227
11.1	Introducción	227
11.2	Antecedentes	229
11.3	Objetivo.....	231
11.4	Resultados Esperados	231
11.5	Metodología	231
11.6	Resultados	231
11.6.1	Mecanismo de actuación del ion plata sobre los microorganismos.....	231
11.6.2	Funcionamiento el sistema de purificación ION AG	232
11.6.3	Definir la concentración de ion plata que desprende la esfera en un día.....	234
11.6.4	Medición de parámetros de Conductividad eléctrica, Potencial de óxido reducción y pH.....	235
11.6.5	Colecta de muestras de agua para la medición de Ag, en un periodo de tiempo de 24 horas	244
11.6.6	Correlación que existe en el tiempo para el parámetro de ORP.....	244
12	CONCLUSIONES.....	247
13	REFERENCIAS	251



Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

1 INTRODUCCIÓN

Este informe describe el desarrollo de la segunda y última etapa del proyecto MODELACIÓN Y DISEÑO DE REDES DE AGUA POTABLE CON DEMANDA ESTOCÁSTICA INTEGRADOS CON SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA, y los resultados obtenidos, en cumplimiento de los objetivos, metas y actividades originalmente comprometidos. El proyecto se realizó en dos etapas, con una prórroga otorgada por Conacyt en la segunda etapa. La primera etapa del proyecto duró del 15 de mayo al 15 de noviembre del 2013, y la segunda del 16 de noviembre del 2013 al 28 de noviembre del 2014. Se describen a continuación en esta introducción los objetivos de proyecto y sus dos etapas, con las metas comprometidas y actividades inicialmente planteadas. El resto del informe describe los trabajos realizados y los resultados obtenidos. Se ha cumplido en todas las metas, y sobre cumplido en la mayoría de ellas.

Objetivo General:

Desarrollar un sistema computacional que integre un modelo de análisis y diseño de redes de agua potable con sistemas de información geográfica, demanda estocástica, sectorización apoyada en la teoría de los grafos y modelación de los tanques de regulación, e incluya los nuevos adelantos en la materia y las nuevas necesidades de Conagua basadas en su nuevo manual de Modelación Hidráulica y de la Calidad del Agua en Redes de Distribución.

Objetivos Específicos:

- Desarrollar un modelo de análisis y diseño de redes de agua potable.
- Obtener los parámetros que caracterizan la demanda estocástica de agua potable, con análisis e implementación.
- Determinar el comportamiento hidráulico y los procesos de mezclado dentro de tanques de regulación y en los depósitos intradomiciliarios, mediante modelación física y de Mecánica de Fluidos Computacional.
- Determinar los parámetros del tiempo de residencia de agua en tanques de regulación y en depósitos domiciliarios y su impacto sobre el comportamiento del desinfectante.

Etapa 1:

Descripción de la etapa: Medición de campo e implementación de esquemas estocásticos. Durante este periodo se ubicará el sitio del proyecto, y posteriormente se realizarán mediciones de campo del consumo por un periodo y un intervalo de registro (menor de un minuto) por definir. Se trabajará también en el laboratorio del IMTA sobre un modelo

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

físico local de un tanque, una cisterna y un tinaco, para evaluar su influencia sobre el consumo intradomiciliario.

Descripción de la Meta de la etapa: A partir de los registros de medición se realizará el análisis e implementación del esquema estocástico, con el objetivo de conocer las ventajas y desventajas de dicho esquema.

Actividades:

- Selección de los sitios de aplicación.
- Recolección y análisis de información.
- Comparación de los resultados de las mediciones con respecto a las series sintéticas generadas por el esquema estocástico.
- Construcción en el laboratorio del IMTA de un modelo físico de un tanque, una cisterna y un tinaco.
- Trabajar en conjunto con la Segunda Universidad de Nápoles, Italia, donde se tienen avances importantes en el desarrollo y la implementación algorítmica de modelos de sectorización de redes de agua potable.

Productos de la etapa:

- Análisis comparativo entre los resultados del esquema estocástico y las mediciones de campo.
- Modelo físico de tanques, cisternas y tinacos.

Etapa 2:

Descripción de la etapa: En esta etapa se trabajará en las pruebas y aplicación del modelo generado en un organismo operador de agua potable del país que la Comisión Nacional del Agua asigne.

Descripción de la Meta de la etapa: Tener al final de la etapa el modelo computacional de red de agua potable con demanda estocástica probado en un organismo operador de agua potable del país que la Comisión Nacional del Agua asigne, así como el modelo físico de un tanque, una cisterna y un tinaco.

Actividades: Para lograr la meta de esta etapa se trabajará con un organismo operador de agua potable del país que la Comisión Nacional del Agua asigne.

Productos de la etapa:

- Informe del proyecto

2 ACTIVIDADES, METAS ALCANZADAS Y RESULTADOS

2.1 Selección de los sitios de aplicación.

Las actividades del proyecto incluyen pruebas de aplicación en al menos un organismo operador de agua potable del país, definido de común acuerdo con Conagua, que a la vez será beneficiario de dicha aplicación. De acuerdo con los objetivos del proyecto, el organismo operador seleccionado deberá contar con un Sistema de Información Geográfica que contenga la mayoría de los datos que ocuparía un modelo de su red de agua potable, tener en proceso un proyecto de sectorización de su red de distribución, y equipos y personal para mediciones en campo de gasto y presión.

Después de analizar con la Conagua varios posibles ciudades para tal aplicación se propusieron la Comisión Municipal de Agua y Saneamiento (CMAS) de Xalapa, Ver. y la Comisión de Servicios Públicos de Tijuana (CESPT), B.C.

La CMAS de Xalapa, Ver. tiene en proceso un proyecto de sectorización de su red de distribución, y un sistema de información geográfica de reciente creación. El servicio de agua potable en ocasiones es tandeado. Los resultados del presente proyecto pueden beneficiar a la CMAS en un mejor diseño de su sectorización, todavía no bien definida, y con recomendaciones de eventuales afectaciones de la calidad del agua en el servicio intermitente.

La CESPT es reconocida como uno de los organismos operadores más eficientes del país. Fue el primero en México en implementar un sistema de información geográfica, no obstante no tiene un modelo hidráulico y de la calidad del agua de su red de distribución, ligado a ese sistema de información geográfica, por lo que se beneficiaría al ver por la metodología de integrarlo con tal modelo.

Personal del IMTA trabajó con la CMAS en Xalapa, Ver. y con la CESPT en Tijuana, en seguimiento de los acuerdos y en cumplimiento de las actividades, como se describe más abajo en este informe.

2.2 Comparación de los resultados de las mediciones con respecto a las series sintéticas generadas por el esquema estocástico

Con la ayuda de la CESPT se obtuvieron datos de mediciones de caudal durante varios días en sectores aislados de la ciudad de Tijuana, B.C. de diferente población, con resolución de 30 y 60 segundos, donde el servicio de agua potable es continuo. Se realizaron mediciones del caudal que ingresa a dos de los edificios más grandes de Xalapa, Ver.: Torre Halcón (edificio de apartamentos) y Torre Ánimas (edificio de oficinas), durante 72 horas con resolución de 15 segundos, donde el servicio de agua es intermitente.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

Con base en los datos de las mediciones en Tijuana, B.C., y el procedimiento de simulación del consumo se desarrolló una metodología para obtener los siguientes parámetros que caracterizan la demanda estocástica de agua potable, como función de la población servida:

- Coeficiente de la demanda máxima horaria
- Coeficiente de la demanda mínima horaria
- Coeficiente de la demanda máxima instantánea
- Coeficiente de la demanda mínima instantánea

Se obtuvieron ecuaciones para expresar estos parámetros como función de la población servida.

Con fines de obtener los parámetros de la demanda estocástica de agua se realizaron también mediciones repetidas con resolución extrafina (un segundo) de la variación del gasto en el uso de tres accesorios sanitarios domésticos (una llave simple, una ducha y un excusado), obteniéndose que en realidad la demanda no se presenta en pulsos rectangulares, sino que tiene un comportamiento más complejo.

2.3 Construcción en el laboratorio del IMTA de un modelo físico de un tanque, una cisterna y un tinaco, y experimentos hidráulicos y de calidad del agua

Se construyó un tinaco en acrílico en tamaño real para las pruebas experimentales de mezcla y movimiento del agua, en el laboratorio de Hidráulica, perteneciente a la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelos, y se llevaron a cabo experimentos hidráulicos y de mezcla del agua, con que se determinó el comportamiento hidráulico y los procesos de mezclado dentro de tanques de regulación y en los depósitos intradomiciliarios, mediante modelación física y de Mecánica de Fluidos Computacional, así como parámetros del tiempo de residencia del agua y su impacto sobre el comportamiento del desinfectante.

Se evaluó sobre el modelo el sistema de purificación Ion AG+, comercializado recientemente en México, que se basa en desinfección con plata coloidal contenida en el cuerpo de columnas de purificación con esferas cerámicas que aprovechan el movimiento cinético del agua por medio de reacción electrostática.

El modelo se equipó con varios accesorios de uso del agua y se realizaron mediciones del gasto con resolución fina con el objeto de definir el patrón de la demanda para los usos de agua típicos en un domicilio y verificar la hipótesis de forma rectangular de los pulsos de demanda, así como para la determinación de sus parámetros estadísticos. Dichas mediciones servirán también como un inicio para analizar los posibles errores de medición de los micromedidores habitualmente utilizados en México, en presencia de almacenamiento intradomiciliario (tinacos). El caudalímetro se instaló en tres posiciones: después del depósito, antes del depósito, y directamente a los accesorios obviando el depósito; y se realizaron 30 mediciones (10 por cada accesorio) para la determinación de la

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

variación de caudal en el uso del agua con diferentes accesorios individuales. Se realizaron también mediciones por cuatro días de la variación del caudal de suministro con demanda de agua de un domicilio simulada en laboratorio, y comparando con las lecturas de un micromedidor domiciliario normal.

2.4 Sistema computacional de análisis y diseño de redes de agua potable integrado con sistema de información geográfica

Se estudiaron y consiguieron para su uso en México tres sistemas computacionales extranjeros que integran modelos de redes de agua potable y alcantarillado con sistemas de información geográfica (Pipelinenet, Giswater y Plex.Earth), desarrollados en los Estados Unidos de Norteamérica, España y Grecia respectivamente; y un sistema de diseño de redes de agua potable y alcantarillado sanitario y pluvial, y de conducciones (UFC) desarrollado en Brasil. Dos de estos sistemas se entregan sin costo (Pipelinenet y Giswater), el tercero (Plex.Earth) se maneja con pago de una pequeña suscripción anual, y el cuarto es de costo relativamente bajo. Se tradujo al español el manual de UFC (que está en portugués), se llevó a cabo un curso sobre el mismo sistema en el IMTA, y se iniciaron los trámites de un convenio de colaboración con la Universidad Federal de Ceará, Brasil para su comercialización en México por parte del IMTA.

Todos estos sistemas pueden ser transferidos a organismos operadores de agua potable y alcantarillado de México. La información de la redes de agua potable de Xalapa, Ver. y Tijuana, B.C, se introdujo en los sistemas y se efectuaron pruebas de corridas.

Se programó un sistema propio que integra el modelo del mundialmente conocido programa de modelación hidráulica y de calidad del agua en redes de distribución EPANET con la información geográfica de INEGI de todas las ciudades mexicanas, y con Google Maps, Google Earth, Bing y otros servidores de información geográfica mediante Internet.

Se desarrollaron algoritmos de diseño óptimo de la sectorización de redes de agua potable apoyada en la teoría de los grafos y se propuso una sectorización de la red de agua potable de Xalapa, Ver.

2.5 Evaluación de un sistema de desinfección en depósitos intradomicilarios

De común acuerdo con Conagua, se investigó en laboratorio el sistema de purificación del agua en depósitos intradomicilarios (cisternas y tinacos) Ion AG+, basada en los efectos de la plata coloidal, en parámetros que superan los requerimientos de la norma oficial correspondiente NOM-244-SSA1-2008 “Equipos y sustancias germicidas para tratamiento domestico de agua”.



Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

3 EXPERIMENTOS DE MEZCLA DEL AGUA EN DEPOSITOS (SERIE 2)

Los experimentos de la Serie 2 se realizaron con mejor equipamiento, comparado con la Serie 1, usando la metodología de tanques en serie con varios reactores perfectamente mezclados y cortocircuitos (Martin-Domínguez, et al. 2005, Tzatchkov, et al. 2005), como se describe a continuación.

La mezcla de cualquier líquido en algún tipo de recipiente está fuertemente relacionada con la ingeniería de las reacciones químicas. En el diseño de reactores se aplican varios campos como la termodinámica, cinética química, mecánica de fluidos, transferencia de calor, transferencia de masa, y economía (Levenspiel, 1999).

Desde el punto de vista de la calidad del agua, un depósito es un reactor químico y biológico que contribuye a aumentar la edad media del agua que contiene, deteriorando su calidad. Así pues, es muy importante en un modelo de calidad una adecuada modelación de los depósitos. Así pues un depósito puede ser considerado como formado por distintos compartimentos, cada uno de los cuales presenta distintas características desde el punto de vista de la mezcla de aguas de distintas calidades.

Las reacciones químicas se clasifican en homogéneas y heterogéneas. La reacción homogénea es una reacción de una sola fase y la heterogénea es dos fases o más. En sistemas homogéneos la velocidad de reacción está afectada principalmente por la temperatura, la presión y la composición. En los sistemas heterogéneos los factores más importantes son la transferencia de masa y de calor. En los reactores las reacciones químicas ocurren a diferentes velocidades dependiente del tipo de mezcla. (Levenspiel, 1999).

Generalmente se intenta construir modelos reales que se aproximen a lo más ideal posible, es por eso que en la actualidad podemos distinguir tres tipos de reactores o modelos ideales: intermitente, flujo pistón y tanque agitado. En un reactor intermitente o en estado no estacionario donde la composición de todos los componentes están uniformemente mezclados, sin alimentación y sin salida del producto, pero cambian con el tiempo. El modelo flujo en estado estacionario o flujo pistón (denominado algunas veces como reactor de flujo tapón, tubular ideal, continuo de flujo uniforme) se caracteriza con que el fluido en el reactor es regular, donde el producto que entra es el primero en salir, esto es, el fluido pasa a través del reactor sin mezclarse, por lo que el tiempo de residencia en todos los elementos del fluido es el mismo; El modelo de flujo en estado estacionario de tanque agitado (reactor de flujo mezclado o reactor de retromezclado), es aquel donde la mezcla se realiza mecánicamente, con alimentación y salida, para que esta esté uniformemente distribuida dentro y a la salida.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

Para analizar el funcionamiento del tinaco se utilizó el método de estímulo-respuesta, donde el tiempo teórico promedio de retención o residencia del agua se define de la siguiente forma:

$$\tau = V/Q \quad (1)$$

donde τ es el tiempo de residencia en segundos; V es el Volumen del tinaco en m^3 , y; Q es el caudal que circula entre la entrada y salida del tinaco en m^3/seg . El tiempo de residencia real se expresa como sigue:

$$\mu = \frac{\int_0^{\infty} tC(t)dt}{\int_0^{\infty} C(t)dt} = \frac{\sum tC(t)}{C(t)} \quad (2)$$

donde μ es el tiempo medio de residencia real, que puede variar de un fluido a otro; $C(t)$ es la concentración medida o la respuesta del sistema al estímulo aplicado; y t es el tiempo.

La distribución de los tiempos de residencia, $E(t)$, de una corriente de fluido es la probabilidad que tiene las moléculas del fluido en salir del sistema en un intervalo de tiempo Δt y tiene la siguiente expresión:

$$\int_0^{\infty} E(t)dt = 1 \quad (3)$$

Según Levenspiel (1997) la técnica estímulo-respuesta consiste en aplicar un trazador en el flujo de entrada de la unidad de volumen y medir la concentración del mismo a la salida con respecto al tiempo, hasta que no se detecte algún cambio.

Para caracterizar el flujo se hace uso de parámetros adimensionales θ y $E(t)$.

$$E(t) = \frac{C(t)}{C_0} \quad \theta = \frac{t}{\tau} = \frac{tQ}{V} \quad (4)$$

donde C, es la concentración del trazador a la salida de la unidad de volumen, mg/L; C_0 , es la concentración inicial del trazador y que es igual a la cantidad de trazador utilizado, w (mg), dividido por el volumen de la unidad (L).

De acuerdo a Cholette y Cloutier (citados por Roustan M. 1991), la media y la varianza para modelos de este tipo tienen las siguientes características:

$$\mu = M\tau \quad (5)$$

$$\sigma_r^2 = \frac{M^2(2-n)}{nN} \quad (6)$$

donde N es el número de reactores en serie; M es la fracción efectiva de la unidad de volumen, y; n es la fracción del caudal efectivo.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

El trazador utilizado en estos tipos de prueba es la sal común o sal de cocina, donde el método estímulo respuesta consiste inyectar a la entrada del reactor cierta cantidad de trazador en un periodo de tiempo muy corto y medir a la salida la cantidad del trazador en cierto intervalo de tiempos. La cantidad de sal se puede medir como la Conductividad Eléctrica o como Sólidos Disueltos Totales.

La conductividad eléctrica es la capacidad de un cuerpo para permitir el paso de la corriente eléctrica a través de sí. También es definida como la propiedad natural característica que cada cuerpo representa la facilidad con la que los electrones pueden pasar por él y que varía con la temperatura. La conductividad en medios líquidos (disolución) está relacionada con la presencia de sales en solución, cuya disociación genera iones positivos y negativos capaces de transportar la energía eléctrica si se somete el líquido a un campo eléctrico. Estos conductores iónicos se denominan electrolitos o conductores electrolíticos. La conductividad eléctrica se utiliza para determinar la salinidad (contenido de sales) en suelo y agua, ya que se disuelven y se mide la conductividad del medio líquido resultante. Suele estar referenciada a 25 °C y el valor obtenido debe corregirse en función de la temperatura. Coexisten muchas unidades de expresión de la conductividad para este fin, aunque las más utilizadas son dS/m (deciSiemens por metro), mmhos/cm (milimhos por centímetro), según los organismos de normalización europeos mS/m (miliSiemens por metro) o $\mu\text{S/cm}$ (microSiemens por centímetro).

3.1 Área de estudio

Se llevaron a cabo experimentos de trazadores con el fin de determinar el tipo de mezcla, porcentaje de zonas muertas y cortocircuitos, en un modelo físico en tamaño real en acrílico instalado en el laboratorio de hidráulica del posgrado en ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México ubicado en el interior del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). En la Ilustración 1 se muestra la instalación del modelo físico.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



Ilustración 1. Modelo físico en acrílico a escala real.

3.2 Materiales

Se instaló un medidor Contazara para medir el flujo de entrada, tal como se muestra en la Ilustración 2.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



Ilustración 2. Medidor de caudal de entrada.

El medidor Contazara, es de diámetro nominal de 20 mm (modelo CZ3000-20). La siguiente información muestra las características de este medidor:

Los medidores Contazara poseen un sensor electrónico que detecta el giro de la única pieza móvil (turbina) y envía la señal a un microprocesador para que interprete y comunique la información digital a través del visor LCD y los conectores. La información digital almacenada en la memoria del equipo puede ser obtenida a través de una interface que se comunica directamente a cualquier computadora. La curva metrológica de estos medidores se muestra en la Ilustración 3.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

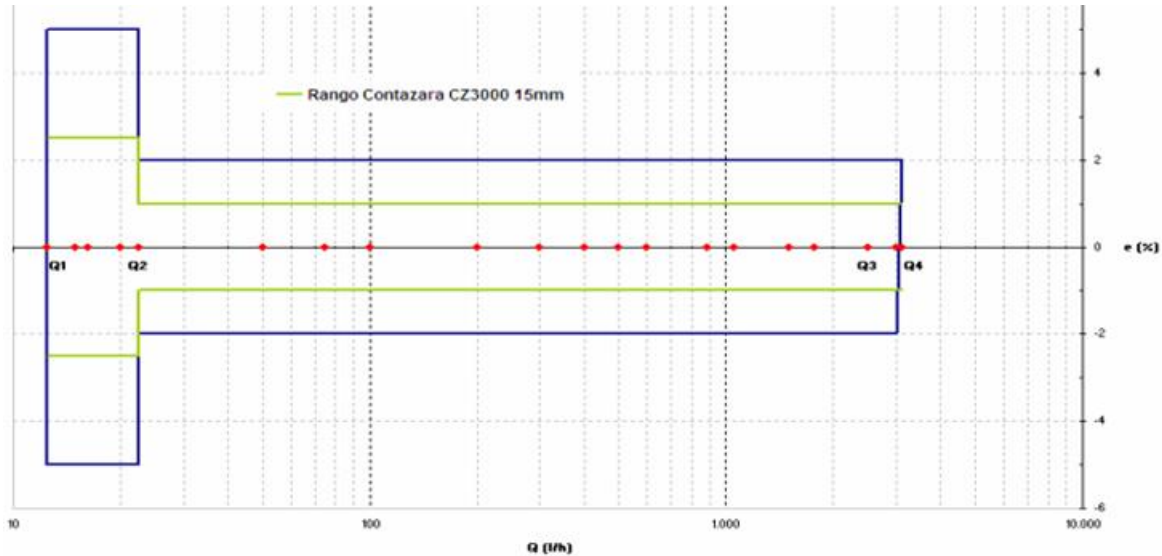


Ilustración 3. Curva metrológica de los medidores Contazara modelo CZ3000.

En el Cuadro 1 se muestran los caudales de funcionamiento.

Cuadro 1. Especificaciones de caudales.

RATIO	MODELO	Q ₁ (l/h)	Q ₂ (l/h)	Q ₃ (l/h)	Q ₄ (l/h)
200	CZ3000-20	20	32	4	5

Los medidores Contazara se pueden instalar en cualquier posición y ángulo, y producen baja pérdida de presión. El intervalo de medición de estos medidores es cada hora, pero se pueden programar para que generen 60 lecturas con intervalos de un minuto cada una. Cuando se realiza una medición los medidores crean un archivo por cada registro, esto equivale a 60 registros por hora o 1440 registros por día.

En los archivos creados por el medidor se registra el índice de la última hora; consumo de las últimas cuatro semanas, meses, bimestres o trimestres; caudal máximo registrado (fecha y hora pico); caudal mínimo registrado; fecha y hora del último arranque.

También en estos medidores se puede obtener el conocimiento de los hábitos de consumo de usuarios, mediante hidrógramas de caudales. Estos hidrógramas crean ocho tramos los cuales que se pueden programar por días, semanas o meses.

El tinaco en acrílico es alimentado por dos tinacos en serie, cada uno de 450 litros. El primero alimenta al segundo, que está a volumen constante, debido a la instalación de un

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

rebosadero para que de una carga constante al tinaco en acrílico. En la Ilustración 4 se muestran ambos tinacos.



Ilustración 4. Alimentación del tinaco de acrílico

Los tinacos en serie son llenados constantemente desde un depósito de 2,000 litros con una bomba sumergible de ½ HP (ver Ilustración 5).

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



Ilustración 5. Depósito de agua de 2,000 litros con bomba sumergible.

Para las pruebas de trazadores con la sal se utilizó el siguiente material:

- Cloruro de sodio NaCl (sal común o sal de cocina)
- Tinaco de acrílico 1,100 litros
- Recipiente de vidrio de 2 litros
- Cronometro
- Conductímetro (multiparamétrico HANNA)
- Jeringa de 60 mL

El equipo para la medición de los Sólidos Disueltos Totales es un Multiparamétrico HANNA HI-9828, tal como se muestra en la Ilustración 6.



Ilustración 6. Multiparamétrico HANNA.

3.3 Metodología

Para los experimentos se eligieron tres caudales (0.05, 0.075 y 0.1 l/s). Estos caudales se determinaron tomando como referencia el caudal medido en un tinaco real en una casa, durante varios días del mes de mayo, donde el caudal de entrada al tinaco, desde la red de distribución, varió entre 0.05 L/s y 0.095 L/s. Por consiguiente se eligieron tres caudales diferentes para las pruebas, 0.05 L/s, 0.075 L/s y 0.1 L/s.

Similarmente se realizaron pruebas con tres volúmenes diferentes en el tinaco: 0.36 m³, 0.72 m³ y 1.00 m³. Con la combinación de tres caudales y tres volúmenes se generaron nueve pruebas diferentes, tal como se observa en el Cuadro 2.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

Cuadro 2. Programa de pruebas

Prueba	Volumen del depósito, m ³	Caudal de entrada y salida, L/s.
1	0.36	0.050
2	0.36	0.075
3	0.36	0.100
4	0.72	0.050
5	0.72	0.075
6	0.72	0.100
7	1.00	0.050
8	1.00	0.075
9	1.00	0.100

3.3.1 Preparación de la solución salina (trazador)

- Se pesó 50 gramos de Cloruro de Sodio, NaCl (sal común o sal de cocina)
- En un recipiente de vidrio con un litro de agua caliente se agregó sal poco a poco hasta que se disolvió bien.
- La sal que quedó se pesó y así se determinó la cantidad de sal agregada y disuelta.

3.3.2 Preparación del modelo físico (Tinaco de acrílico)

- Se dividió el volumen del tinaco en tres partes iguales.
- Se determinó la altura en el tinaco para cada volumen.
- Se hicieron marcas sobre el tinaco para cada altura, para controlar el nivel del agua.

En el Cuadro 3 se muestra el volumen y la altura correspondiente para cada volumen.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

Cuadro 3. Volumen y altura del agua en el tinaco

Vol, m ³	H, m
0.36	0.43
0.72	0.86
1.00	1.3

3.3.3 *Inyección del trazador*

El siguiente procedimiento es similar para todas las pruebas del Cuadro 3:

- Se llenó el tinaco hasta la altura correspondiente, luego se ajustó el caudal de entrada, el cual se midió con el medidor de marca Contazara (ver Ilustración 2).
- Después de ajustado el caudal de entrada, se procedió a ajustar el caudal de salida. Se igualó el caudal de salida con el de entrada mediante la manipulación de la válvula de salida, tomando como referencia el nivel del agua en el tinaco. Para comprobar el caudal de salida se utilizó el método volumétrico, midiendo el caudal con un recipiente de volumen conocido y un cronometro.
- Después que el caudal en el tinaco de acrílico se haya estabilizado ($Q_{\text{entrada}} = Q_{\text{salida}}$) se procedió a realizar las pruebas.
- Con una jeringa de 60 ml se tomó 50 mL de la solución preparada y se aplicó directamente en forma instantánea a la entrada de flujo (Ilustración 7).
- Antes de aplicar el trazador se empezó a medir los SDT con el conductímetro y se tomó el tiempo desde el inicio de la medición hasta la aplicación del trazador.
- La prueba terminó cuando el valor de SDT alcanzó el valor inicial.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

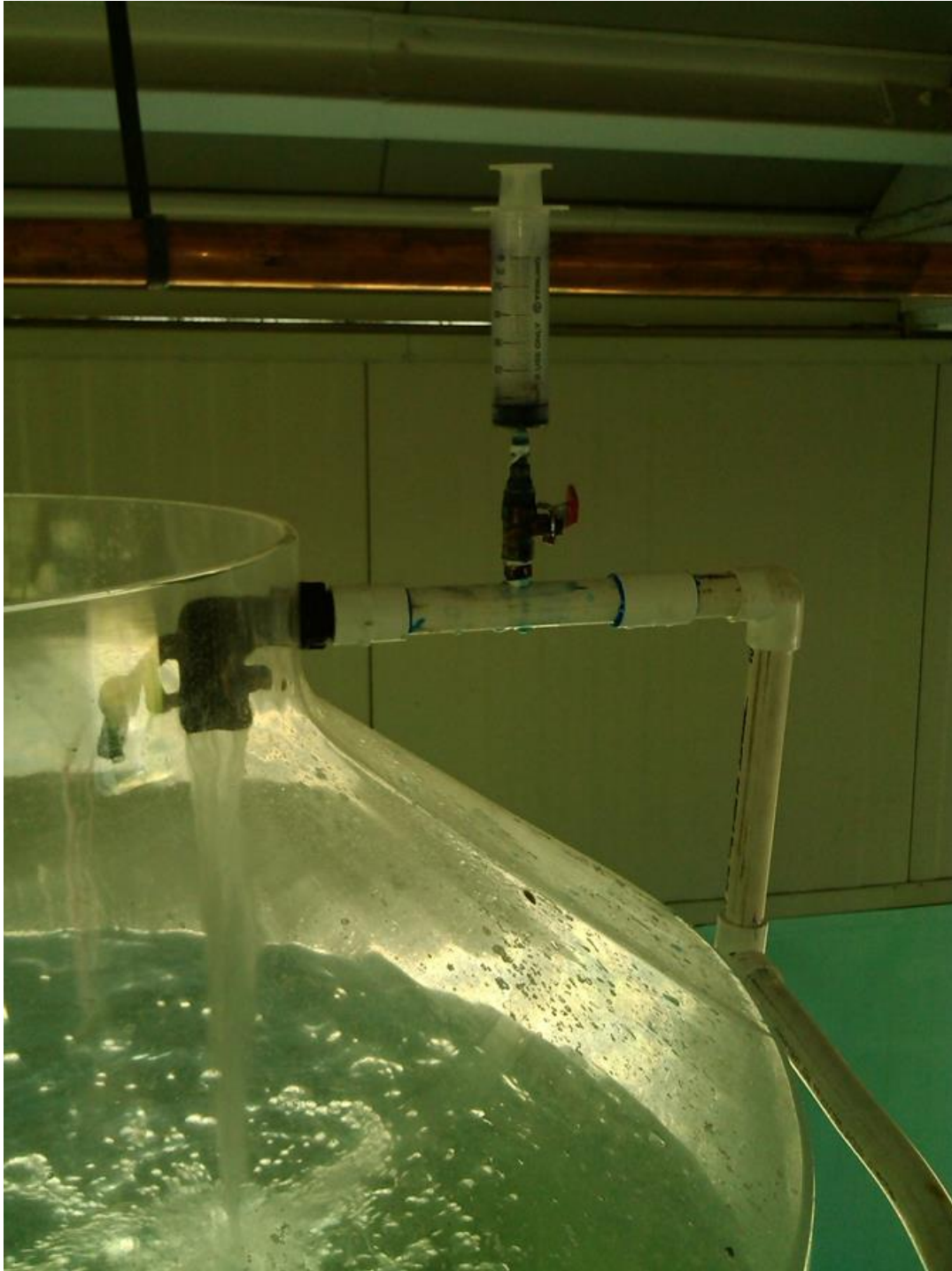


Ilustración 7. Inicio de la inyección del trazador.



Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

3.3.4 *Medición del trazador a la salida*

Se puso el sensor del conductímetro sobre el caudal de salida para tomar los valores de Sólidos Disueltos Totales (SDT) (ver Ilustración 8). Este sensor permaneció sumergido hasta el final de la prueba. El equipo guarda la información durante el tiempo que duró la prueba (ver ilustración 9), después se recuperan los datos que son copiados a un archivo tipo CVS.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



Ilustración 8. Sensor del multiparamétrico en la salida del tinaco.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



Ilustración 9. Conductímetro para la medida de Sólidos Disueltos Totales.

3.4 Resultados

A continuación se muestran los resultados de cada una de las pruebas con el trazador.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

Los datos de entrada y los datos de SDT obtenidos con el multiparamétrico fueron alimentados a una hoja de Excel, donde la Dra. Alejandra Martín Domínguez creó un modelo (implementado en una macro de Visual Basic para Excel) para la determinación de los parámetros hidráulicos, el tipo de mezcla, porcentaje de zonas muertas y cortocircuitos.

En el Cuadro 4 se muestran los resultados de las nueve pruebas donde V es el volumen del tinaco; Q es el caudal de entrada y salida del tinaco; SDT son los Sólidos Disueltos Totales inicial, antes de la inyección del trazador; τ es el tiempo de retención teórico; A es el área bajo la curva; Co es la concentración inicial del trazador; m es la cantidad de trazador agregado medido; m2 es la cantidad de trazador agregado; C es la concentración del trazador agregado; μ es el tiempo medio de residencia; μ^2 es la varianza de la curva de distribución; μ_2 es la varianza reducida; N es el número de reactores en serie; ZM es el porcentaje de zonas muertas y; CC son los cortocircuitos dentro del tinaco.

Cuadro 4. Datos de entrada y resultados para cada una de las pruebas.

Parámetro	Prueba								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
V, m ³	0.36	0.36	0.36	0.72	0.72	0.72	1.0	1.0	1.0
Q, L/s	0.05	0.075	0.1	0.05	0.075	0.1	0.05	0.075	0.1
SDT, mg/L	211.0	225.0	196.0	210.0	215.0	237.0	210.0	213.0	226.0
τ , min	120.6	80.4	60.3	241.2	160.8	120.6	334.9	223.2	167.4
A, mg.min/L	3,710	2,757	2,065	2,727	2,315	1,928	2,285	1,528	1,396
Co, mg/L	30.8	34.3	34.2	11.3	14.4	16.0	6.8	6.8	8.3
m, mg/L	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
m2, mg/L	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
C, mg/L	41.5	41.5	41.5	20.7	20.7	20.7	14.9	14.9	14.9
μ , min	64.7	53.8	48.0	70.3	75.6	68.4	108.5	66.1	58.8
μ^2	2,381	1,628	1,374	3,815	3,717	2,617	6,667	3,098	2,135
μ_2	0.2	0.3	0.4	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1
N	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ZM, %	40	25	20	50	40	40	60	55	50
CC, %	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

En las Ilustraciones 10 a la 18 se muestran las curvas de concentración teórica y experimental correspondientes a cada una de las pruebas realizadas.

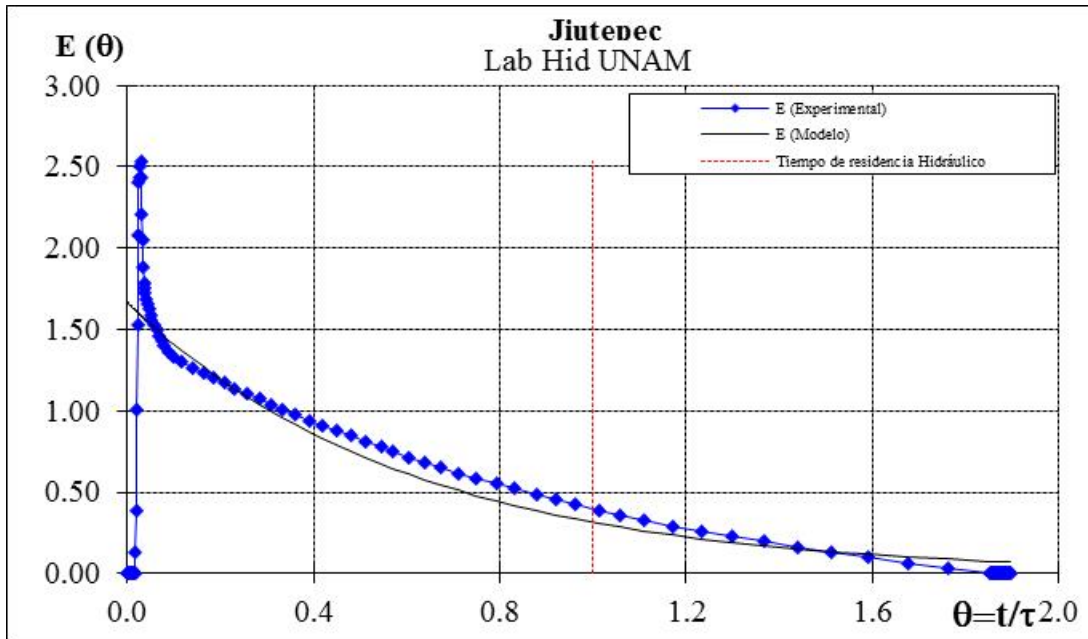


Ilustración 10. Resultado de la prueba 1.

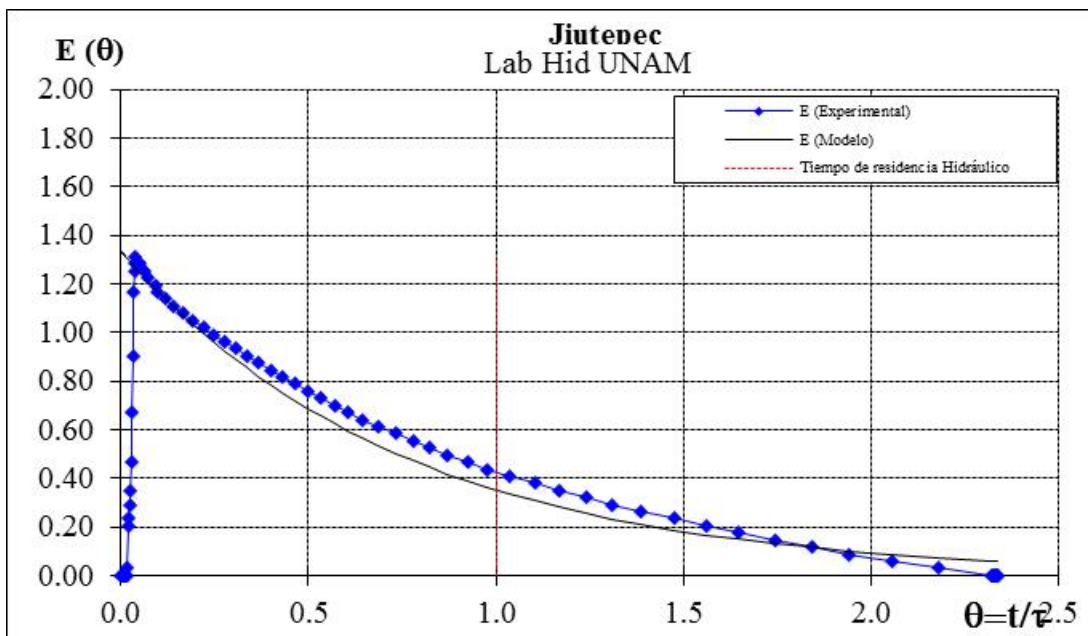


Ilustración 11. Resultado de la prueba 2.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

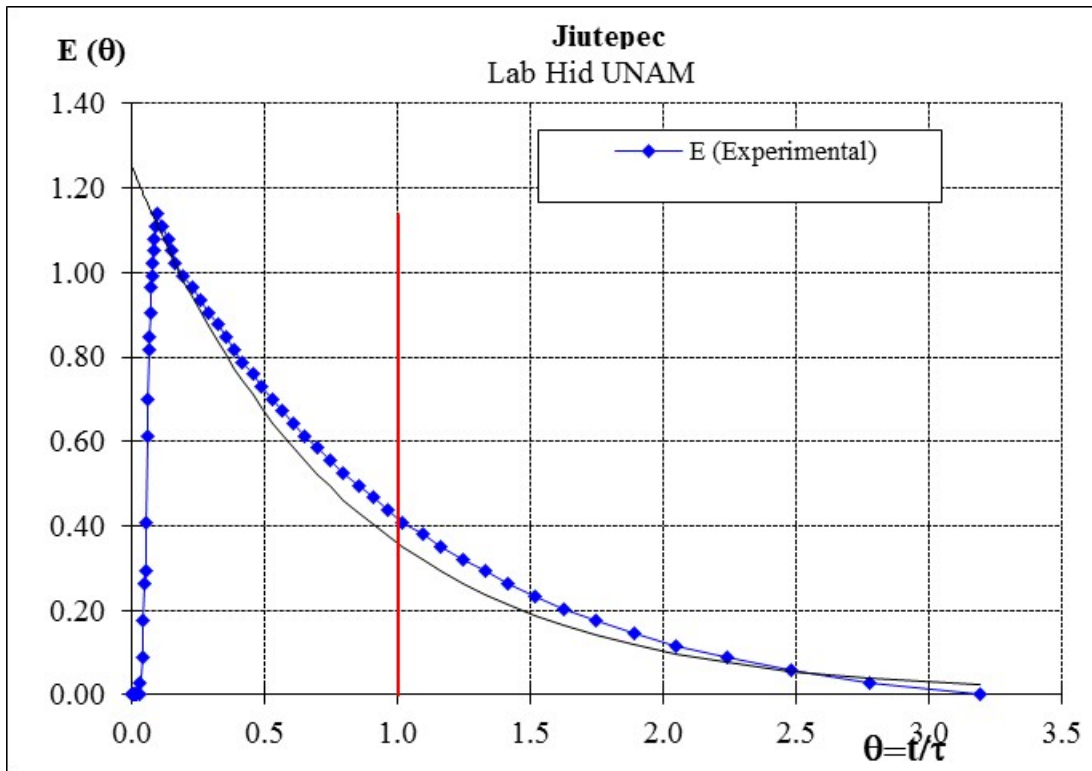


Ilustración 12. Resultado de la prueba 3.

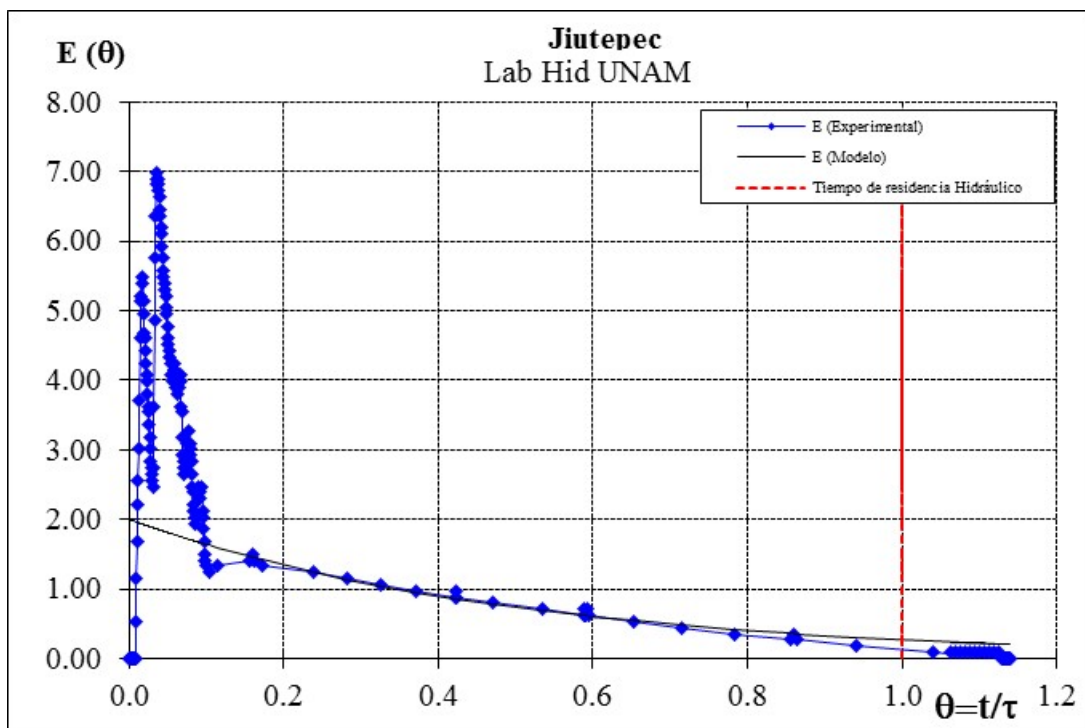


Ilustración 13. Resultado de la prueba 4.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

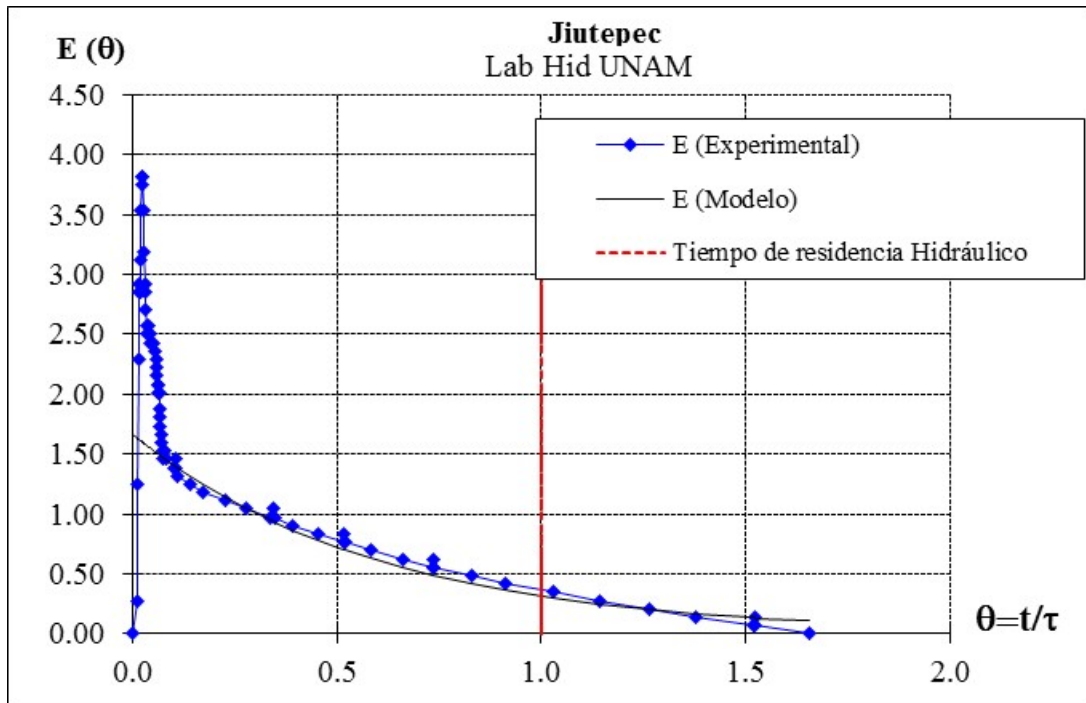


Ilustración 14. Resultado de la prueba 5

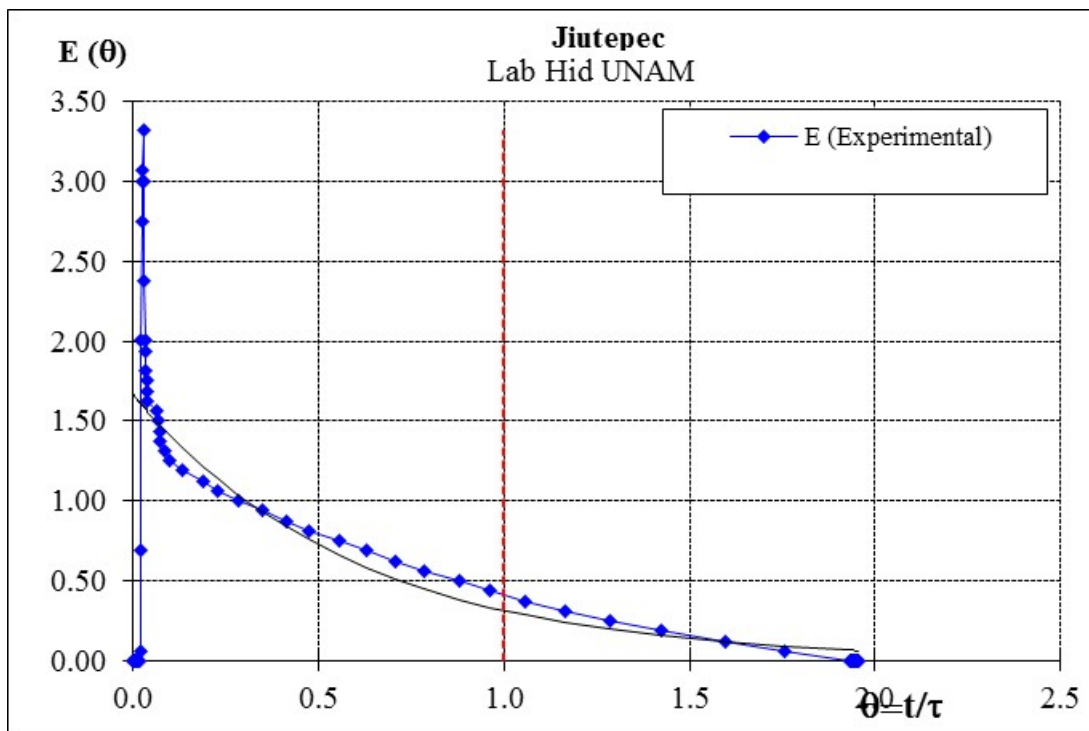


Ilustración 15. Resultado de la prueba 6.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

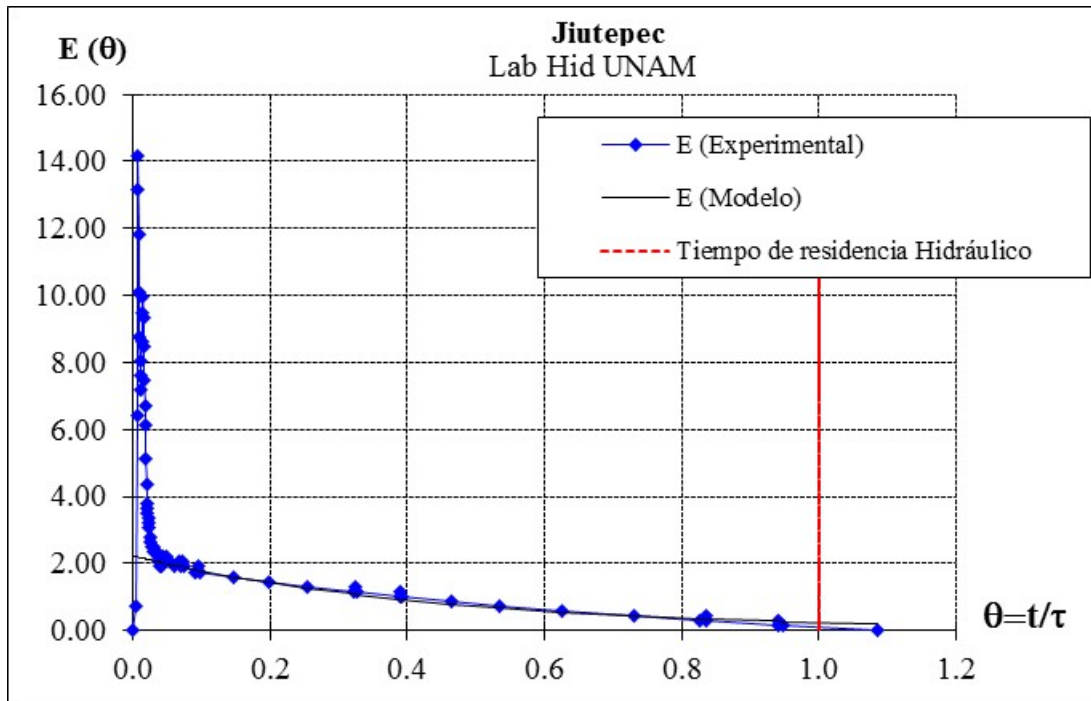


Ilustración 16. Resultado de la prueba 7

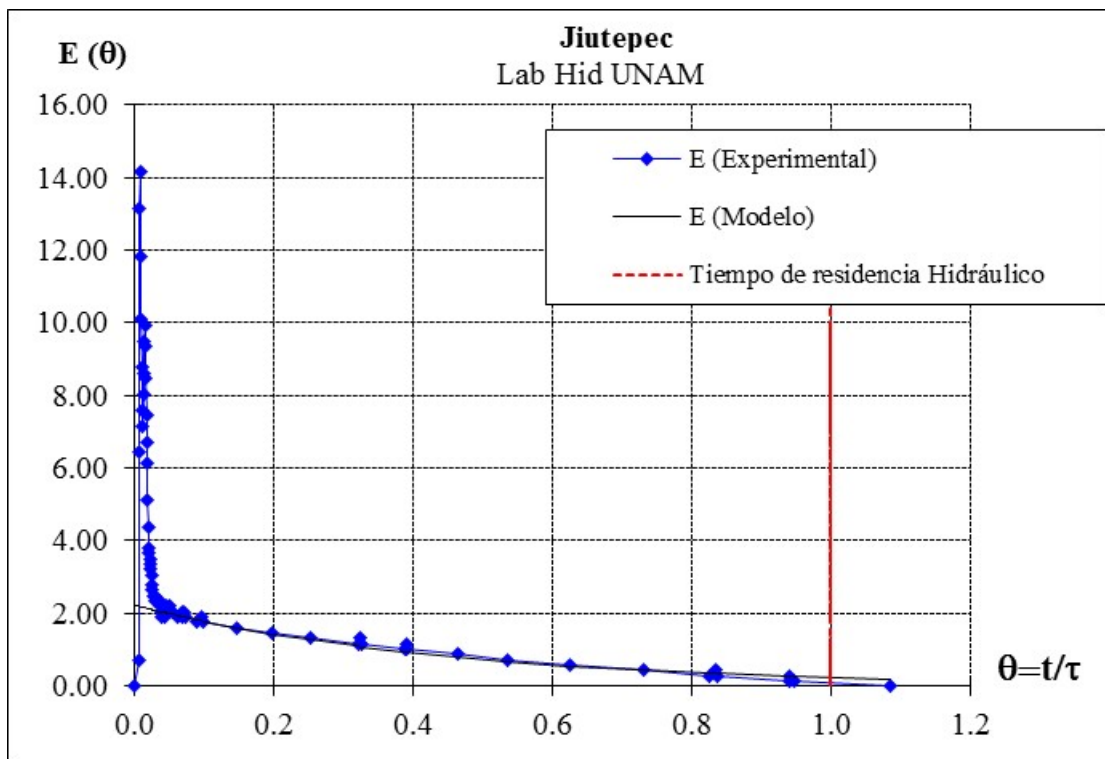


Ilustración 17. Resultado de la prueba 8

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

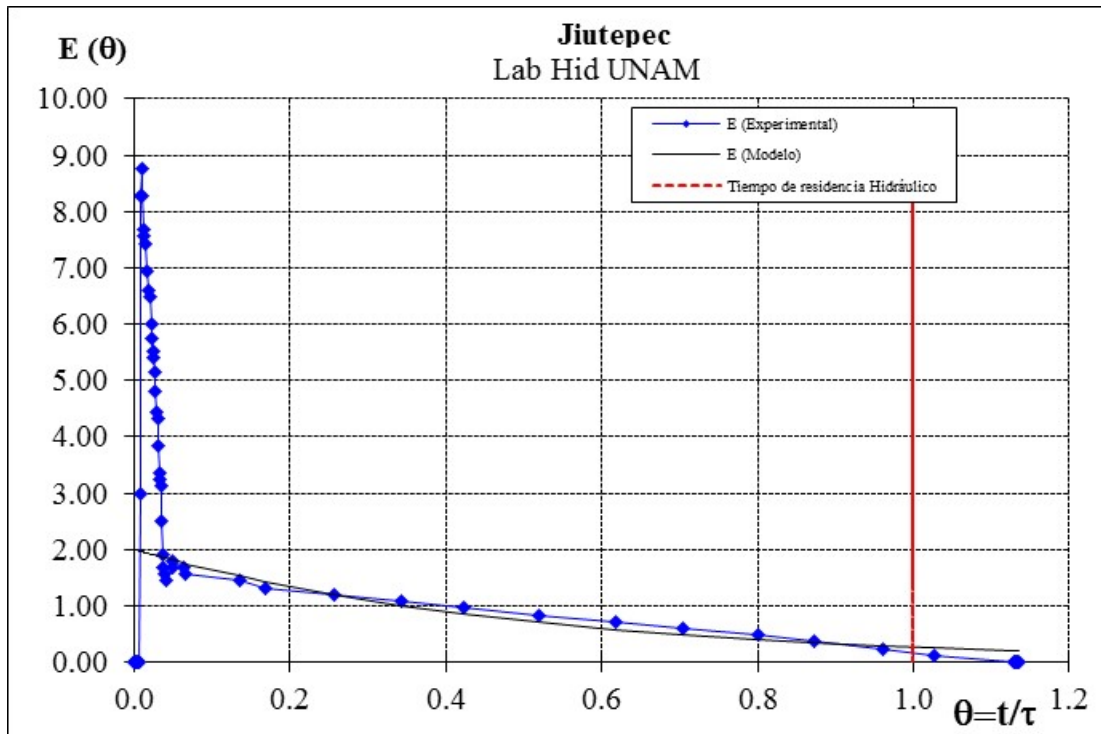


Ilustración 18. Resultado de la prueba 9.

Con las pruebas de trazadores se pudo comprobar que a diferentes volúmenes y caudales, la mezcla en los tinacos tiene un comportamiento similar a mezcla completa con zonas muertas entre el 40 y 60 %, y con 0% de cortocircuitos. La teoría de los reactores en serie no se aplica para este tipo de depósitos, ya que en todos los casos el número de reactores fue 1.



Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

4 MODELACIÓN HIDRÁULICA INTEGRADA CON SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

A continuación se explican las ventajas de utilizar el SIG con la modelación hidráulica.

4.1 Modelación hidráulica y SIG

Originalmente, la función principal de un SIG (Sistema de Información Geográfica) para agua potable o alcantarillado era visualizar mapas de la infraestructura. Sin embargo, un SIG es mucho más que solo una aplicación de mapas—que ofrece un extenso conjunto de herramientas para el análisis espacial y manejo de datos que, cuando se integra con un modelo hidráulico pueden proporcionar enormes ventajas. Los análisis hidráulicos, tales como la determinación de las capacidades del sistema, desarrollo de escenarios teóricos, y la planificación de las eficiencias, se han efectuado independientemente de un SIG. Dando a los planificadores y técnicos la posibilidad de acceder a información más segura, actualizada y reciente, la integración de un SIG con un modelo hidráulico permite obtener el máximo rendimiento de la inversión en el SIG. La integración proporciona información reciente, reducción del tiempo a mostrar los resultados, y acceso a elementos de modelación y a las herramientas y funcionalidad del SIG.

El SIG debe ser un componente importante de cualquier modelación hidráulica. El uso actual y correcto del SIG permite a planificadores y operadores obtener información más confiable en la evaluación de deficiencias existentes, servicio a los desarrollos potenciales, calidad del agua y operación. Históricamente, los modelos hidráulicos se actualizaban cada varios años, y a menudo con intervalos muchos más largos, dependiendo de la necesidad temporal (por ejemplo en un plan maestro o en diagnóstico integral (DIP) que realiza el organismo operador). La actualización del modelo hidráulico se considera un proceso indispensable pero laborioso, ya que el mantenimiento del modelo, a menudo, no se considera en un plan maestro. Antes del desarrollo de la integración con un SIG, el uso del SIG para la modelación hidráulica se limitaba a tomar de la base de datos la información para el modelo y usarlo para un análisis hidráulico válido en este momento. A medida que los modelos hidráulicos han aumentado su complejidad y ahora se usan con más frecuencia, los organismos operadores de agua pueden acceder a métodos más rentables para tener siempre actualizados sus modelos utilizando la última información del SIG.

4.2 Integración del SIG y el modelo hidráulico.

La integración del SIG y el modelo hidráulico es el proceso mediante el cual elementos nuevos, actualizados o eliminados son sincronizados entre la base de datos del SIG y el modelo hidráulico. Programas para el modelado hidráulico basados en los SIGs han sido desarrollados en los últimos años, abriendo puertas para la integración sostenible de los dos sistemas. Típicamente, la base de datos de los SIG's es más actual que el modelo hidráulico, ya que los SIG's soportan una variedad de aplicaciones (cartografía, planificación, análisis espacial, gestión de recursos, etc.), requeridos de los servicios.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

Tradicionalmente, los modelos hidráulicos eran desarrollados en un instante estático con un complemento de los SIG's (frecuentemente para propósitos de planeación general a pocos años o para determinar que pasaba en diferentes escenarios), y eran actualizados con poca frecuencia. Con un enfoque de integración, las actualizaciones de los modelos hidráulicos pueden ocurrir con más frecuencia, porque lo laborioso de la transferencia de datos, limpieza y construcción de modelos puede ser eliminado o al menos en gran medida reducido (Ilustración 19). Para que un modelo hidráulico sea sostenible y al día con respecto a los cambios dinámicos del sistema, es esencial un enfoque integrado.



Ilustración 19. Integración de una base de datos y un modelo hidráulico. Los datos del SIG están fácilmente disponibles para el análisis de modelos y los datos del modelo se pueden migrar de nuevo al SIG como se desee para su uso en futuras ejecuciones de modelación.

Un enfoque integrado elimina la necesidad de actualizar manualmente los conjuntos de datos separados del modelo hidráulico y la base de datos del SIG. Esto, sucesivamente, libera a los que realizan modelos hidráulicos de la investigación de datos y la captura de datos asociados con cada uno de los cambios de la red física. Utilizando un modelo hidráulico sobre la base actualizada de un SIG, producirá información más segura para evaluar ineficiencias existentes, servicio a usuarios potenciales, calidad de agua y operaciones. Aplicaciones para la modelación hidráulica basados en SIG proporcionan sofisticadas herramientas para hacer frente a los problemas de mantenimiento. Otros datos operativos y de negocios, a menudo disponibles en el SIG (o vinculados a través de él), tal como quejas de usuarios, antecedentes y datos operacionales, están fácilmente disponibles para ser revisados por el ingeniero de modelación. Por último, los resultados del modelo pueden ser más fácilmente devueltos al SIG para su análisis más preciso y detallado. La Ilustración 20 muestra el ciclo de la vida de un modelo hidráulico sostenible.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

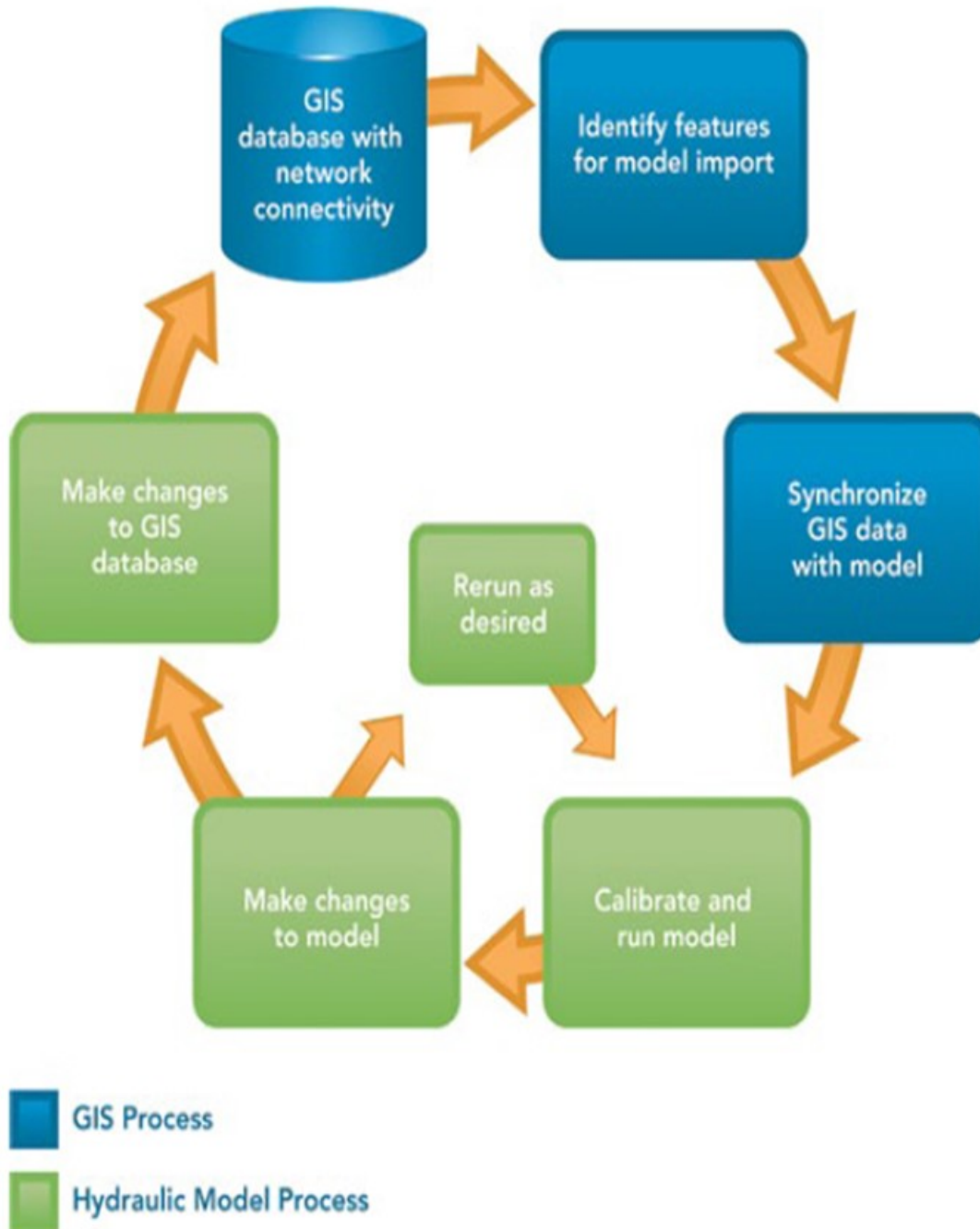


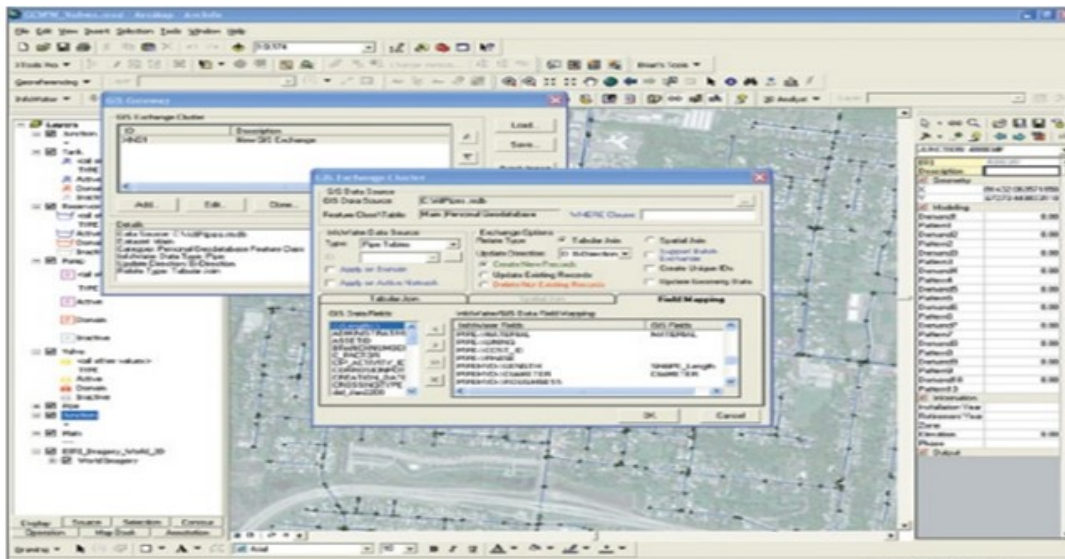
Ilustración 20. Ciclo de vida de un modelo hidráulico sostenible. Una utilidad puede iniciar el ciclo desde el SIG o desde el modelo hidráulico.

4.3 Software comercial de modelación integrada con SIG

Los principales vendedores de software para la modelación hidráulica ofrecen distintas soluciones centradas en el SIG, que utilizan formatos shapefile o geodatabase como el depósito principal de los componentes de un modelo hidráulico espacial. Por ejemplo InfoWater de Innowyze (anteriormente MWH Soft) (Ilustración 21) y WaterGEM de Bentley manejan la geometría de las tuberías y nodos (tomas de agua, tanques, embalses, bombas y válvulas) en una base de datos geográficos.

MIKE URBAN, producto de DHI's para modelar redes de distribución y recolección de agua, utiliza una base de datos geográficos ESRI como principal almacenamiento para todas las características.

El software hace que sea fácil visualizar y comparar datos originales del SIG con los datos del modelo en el mismo mapa y usa las herramientas del SIG para diferentes mapas. Sin embargo, a pesar de que los formatos de almacenamiento del SIG y del modelo hidráulico son los mismos (la base de datos geográficos), los datos todavía se duplican, dado que los sistemas de modelación requieren de datos en una estructura especial. De esta forma, aun cuando los modelos basados en SIG intercambian los datos más fácilmente, no descartan los problemas lógicos involucrados en la sincronización de las dos representaciones.



Otra de las complicaciones se encuentra en las diferencias de la terminología que se refiere a la forma en que los datos describen el mundo real. Por ejemplo, las propiedades como el material y el tipo de tubería pueden ser introducidas de manera diferente en el SIG y en el modelo. Los procedimientos deben ser adecuados para llevar a cabo esta conversión de datos al mover la información entre el SIG y el modelo. Algunos sistemas de modelado

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

incluyen esta parte en el proceso de importar y exportar. Si no, las opciones pueden creadas.

Independientemente de la estructura de datos geospaciales, la mayoría de las aplicaciones de modelado hidráulico proporcionan herramientas avanzadas que permiten la interoperabilidad entre la base de datos del SIG del organismo operador y el modelo hidráulico. Por ejemplo, Infoworks WS de Innowyze incluye un Centro de Importación de Información Abierta, que permite a los usuarios establecer un enlace directo a la información del SIG para la construcción y actualización de modelos. Para automatizar las actualizaciones del modelo desde el SIG, Infoworks WS mantiene un registro de identificadores (IDs) para cada elemento - uno para el modelo y otro para el SIG. InfoWater incluye herramientas que pueden ser usadas para sincronizar las características del SIG con los elementos del modelo de forma tal que si se realiza un cambio en una característica o en la geometría del modelo hidráulico (por ejemplo cambio del diámetro de la tubería), la modificación se puede reflejar automáticamente en la base de datos del GIS. A su vez, los cambios realizados en el SIG pueden reflejarse automáticamente en el modelo hidráulico. Por ejemplo, las características de las tuberías y nodos que no se toman en cuenta en la base de datos del SIG pueden ser identificadas y eliminadas automáticamente del modelo hidráulico.

4.4 Aspectos de la aplicación de los sistemas SIG para sistemas de distribución

Datos de SIG se han utilizado ampliamente para una variedad de aplicaciones relacionadas con la el desarrollo de modelos hidráulicos y análisis. Tradicionalmente, estos análisis han sido realizados por el GIS utilizando datos exportados del modelo hidráulico. Sin embargo, el uso de software de modelado hidráulico basado en SIG puede eliminar la necesidad de exportar los datos del modelo de ida y vuelta entre el modelo hidráulico y el SIG.

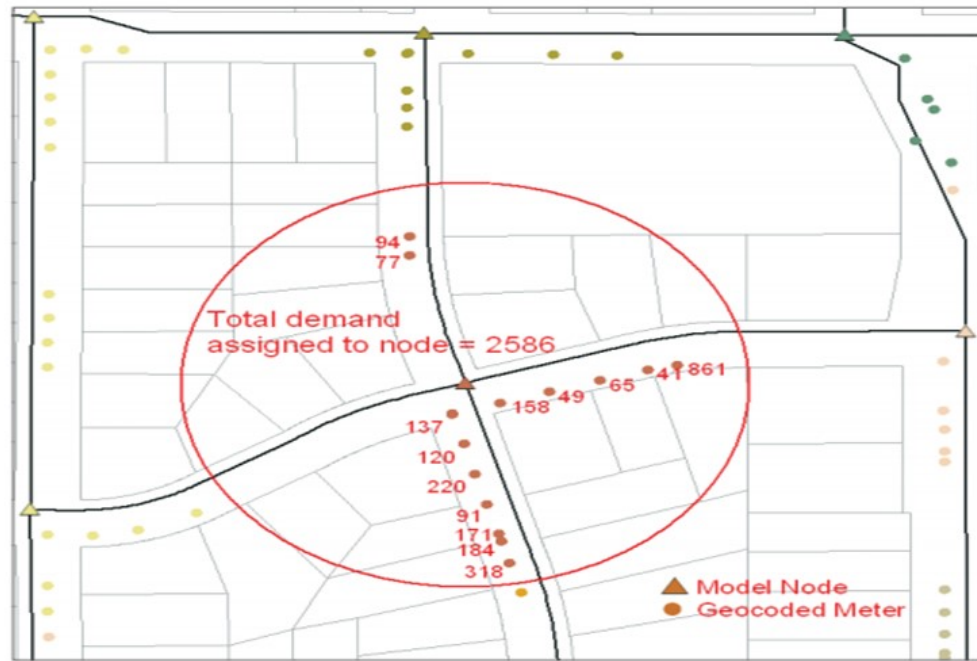
4.4.1 *Asignación de demanda*

Los primeros pasos en el desarrollo de un modelo hidráulico típicamente involucran la asignación espacial de las demandas existentes y futuras, que se utilizan con coeficientes de variación o patrones diurnos. Los datos de la demanda de agua pueden obtenerse de varias fuentes, desde los consumos facturados por predio hasta la dotación por cápita o por unida de área. Independientemente de la fuente, la información debe tener un campo espacialmente para que la demanda pueda ser asignada a un nodo del modelo hidráulico.

Lo ideal sería que la demanda de agua existente se asignara a partir de datos de los micromedidores de agua asignados a estos puntos (más comúnmente a una posición x, y basada en un centroide del sector), interpolación a lo largo de la calle, etc. Los métodos más comunes de la asignación de demanda son por de puntos y por áreas.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

- Por puntos.** Los datos de facturación de los usuarios están vinculados a puntos, centroides o direcciones de calles. El consumo de agua se asigna al nodo más cercano. Este método funciona bien para los barrios establecidos. La Ilustración 22 muestra un ejemplo de medidores geocodificados donde la demanda de cada medidor se asignó al nodo más cercano del modelo.



- Por área.** La demanda puede derivarse indirectamente con base en datos de población y uso del suelo. El SIG relaciona la demográfica y estima valores de la demanda de agua para cada uso del suelo por polígonos. Este método es útil en la predicción del uso del agua en áreas de crecimiento futuro.

La asignación de la demanda tradicional implica la utilización de herramientas de análisis espacial en el software SIG. Sin embargo, la mayoría de las aplicaciones de modelado por GIS incluyen herramientas que realizan diversos procesos de asignación de la demanda. Por ejemplo, MIKE URBAN, InfoWater, WS InfoWorks y WaterGEMS tienen rutinas que pueden asignar una proporción de la demanda de un medidor al tubo o nodo más cercano utilizando distancia ponderada. El nodo más cercano recibirá un mayor porcentaje de la demanda.

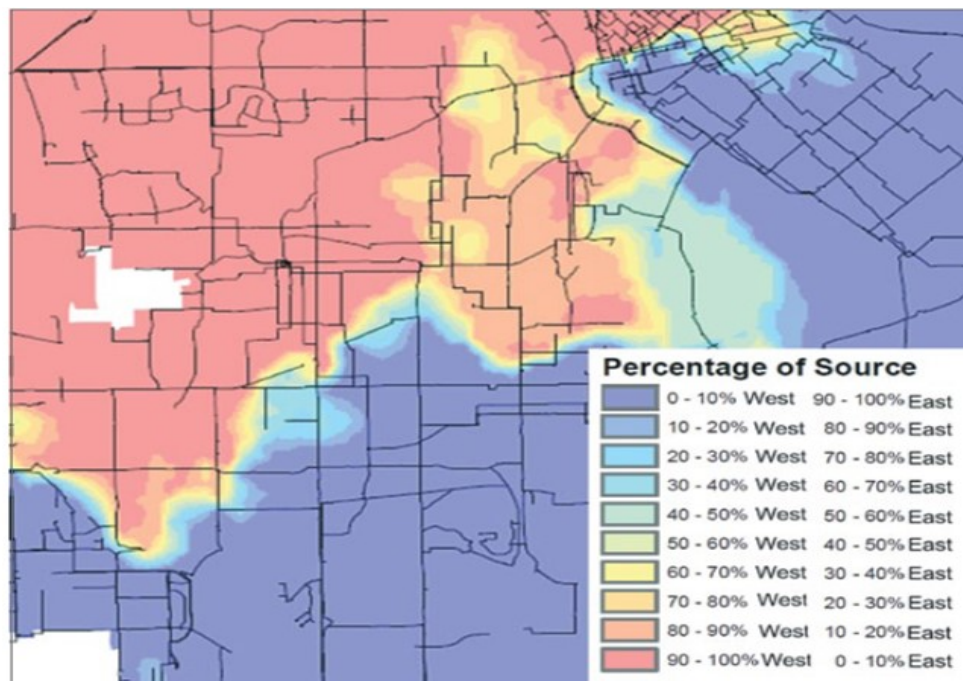
4.4.2 Fuentes de agua potable

Puede ser necesario entender cómo se mezcla el agua a lo largo del sistema de distribución. Esto es especialmente importante si la calidad de algunas fuentes es menos deseable que la

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

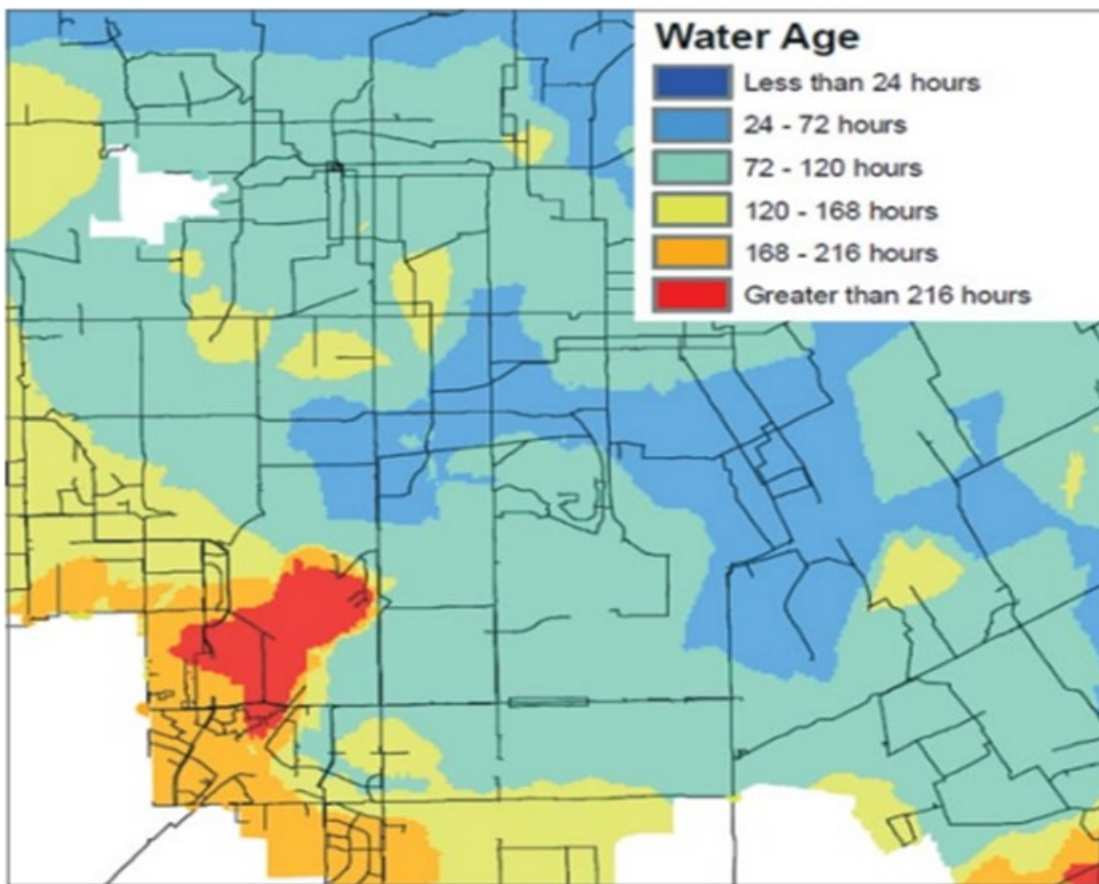
de otras. Los usuarios pueden querer conocer de qué fuente proviene su agua. Sin embargo, en el tiempo un usuario puede ser servido de un número de fuentes, y la mezcla proporcional de varias fuentes puede estar en constante cambio. Una mezcla a largo plazo proporcional (o porcentual), de fuentes de agua puede ser un buen indicador de la calidad de agua de un usuario en general.

El modelo de Simulación en Períodos Extendidos (EPS por sus siglas en inglés, Extended Period Simulation), puede ser usado para identificar las zonas de mezcla de varias fuentes en el sistema de distribución. El rastreo de las fuentes es útil para entender el reparto de agua de dos o más fuentes a lo largo del sistema de distribución. También puede mostrar en qué grado el agua de una fuente dada se mezcla con otras y como el patrón espacial de esta mezcla cambia con el tiempo. Para un escenario de operación específico, el modelo hidráulico puede calcular el porcentaje de la demanda total suministrada para cada fuente de alimentación de agua dentro del sistema para cada locación a lo largo de la red de distribución. Como se muestra en la Ilustración 23, usando SIG, cierto porcentaje de la superficie puede ser servido por cada fuente. Superponiendo este dato sobre un mapa digital de calles o parcelas, las direcciones de las calles pueden estar correlacionadas al porcentaje de polígonos de fuentes y puede ser determinado el porcentaje aproximado de agua a usuarios que viene de cada fuente.



4.4.3 *Calidad y edad del agua*

La calidad del agua puede ser modelada usando EPS para analizar cambios hidráulicos en el movimiento del agua a medida que viaja a través del sistema de distribución. Un modelo EPS puede calcular el tiempo que permanece el agua a lo largo del sistema de distribución, que puede servir como un indicador de la calidad del agua. El cálculo del tiempo del agua se puede utilizar para la evaluación del desinfectante residual. La visualización del tiempo del agua y calidad del agua es un componente importante en la comprensión de los resultados del modelo hidráulico para situaciones específicas de funcionamiento. Como se muestra en la Ilustración 24 un modelo hidráulico y un Software de SIG bien calibrados, pueden ser usados para mostrar diferentes resultados del tiempo del agua y fuentes de rastreo e identificar posibles deficiencias dentro de un sistema de distribución.



4.4.4 *Aplicaciones avanzadas*

Aplicaciones que van más allá de los usos tradicionales de los modelos hidráulicos pueden ayudar a los organismos operadores maximizar el retorno de su inversión en un SIG. El

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

análisis crítico utiliza el modelo hidráulico para identificar las secciones más críticas en el sistema. Junto con SIG, el análisis crítico puede ayudar a identificar a los usuarios que se verían afectados por una ruptura potencial de la tubería y calcular el tiempo que duraría la interrupción. Varias capas de los datos SIG pueden ser analizados como parte de la planeación para ayudar al mismo operador establecer prioridades en la planeación de los costos. Algunas aplicaciones basadas en SIG que se pueden usar para mejorar el análisis, diseño y operación de las redes son las siguientes:

- Desarrollo y/o optimización de los límites de presión.
- Localización de sitios potenciales para instalaciones.
- La identificación de la distancia más corta para el flujo de agua.
- Rastreo de contaminantes de vuelta al origen.
- Análisis hidráulico de factibilidad de tomas nuevas.
- Localización de sitios potenciales para equipos de monitoreo.
- Identificación de usuarios que están fuera de servicio con base en una simulación de un corte de suministro de las instalaciones.



Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

5 SISTEMAS DE MODELACIÓN DE REDES DE AGUA POTABLE INTEGRADOS CON INFORMACION GEOGRAFICA

El software comercial de modelación hidráulica integrada con SIG, presentado en el capítulo anterior, como InfoWater de Innovyze (anteriormente MWH Soft), WaterGEM de Bentley, y MIKE URBAN de DHI, es muy caro, sumado con el hecho que aparte de pagar una cantidad inicial por adquisición, los usuarios tienen que pagar una importante anualidad por mantenimiento y actualizaciones. Aun cuando algunos organismos operadores de agua potable y alcantarillado en México los han comprado, para ser usados en algún proyecto, pronto han quedado en desuso por la dificultad, ante todo administrativa, de seguir pagando cada año por el mantenimiento. A continuación se presentan tres sistemas computacionales que integran modelos de redes de agua potable y alcantarillado con sistemas de información geográfica, y un sistema de diseño integrado con AutoCAD. Todos estos sistemas se estudiaron y consiguieron con vistas de su aplicación en México. Dos de ellos son libres, y los otros dos son de bajo costo.

5.1 Pipelinet

PipelineNet es un sistema basado en SIG y EPANET que ocupa datos del modelo de la infraestructura hidráulica en formato de archivo Shape de ArcView. Los datos del modelo hidráulico contienen nodos, tanques, depósitos, tuberías, bombas y válvulas. PipelineNet opera desde una plataforma SIG y necesita todos los datos de entrada en un formato compatible con el SIG. Tiene una herramienta de importación que convierte el archivo de datos de entrada del programa EPANET *.inp en archivos Shape de ArcView para PipelineNet (ver Ilustraciones 25 y 26). Cruces, tanques, depósitos, tuberías, bombas y válvulas son los seis parámetros de distribución de agua necesarios para PipelineNet.

Todas las operaciones de modelado de PipelineNet requieren de un conjunto de capas de SIG espaciales que representan la red de tuberías (es decir, tuberías y nodos) y un modelo hidráulico que caracteriza el sistema de tuberías de distribución correspondiente. Las capas de SIG se manejan como archivos Shape y el modelo hidráulico está contenido en un archivo de texto *.inp de EPANET estándar. Las redes resultantes pueden ser proyectadas en cualquiera de los sistemas de coordenadas de la norma ESRI.

El modelo PipelineNet fue desarrollado por la EPA ante todo para apoyar y aumentar las capacidades de detección y respuesta que resultan de eventos de contaminación deliberada en los sistemas de suministro de agua, primeramente para su aplicación durante los Juegos Olímpicos de Salt Lake City a principios de 2002 (Samuels y Bahadur 2001). El modelo tiene no obstante todas las facilidades de modelación hidráulica de las redes, por lo que puede ser usado para estudios y diseño de redes. Es libre, en el sentido que no se vende, pero para obtenerlo hay que escribir a un funcionario de la EPA, quién proporciona los archivos de instalación, algo que se hizo en el presente proyecto para obtenerlo.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

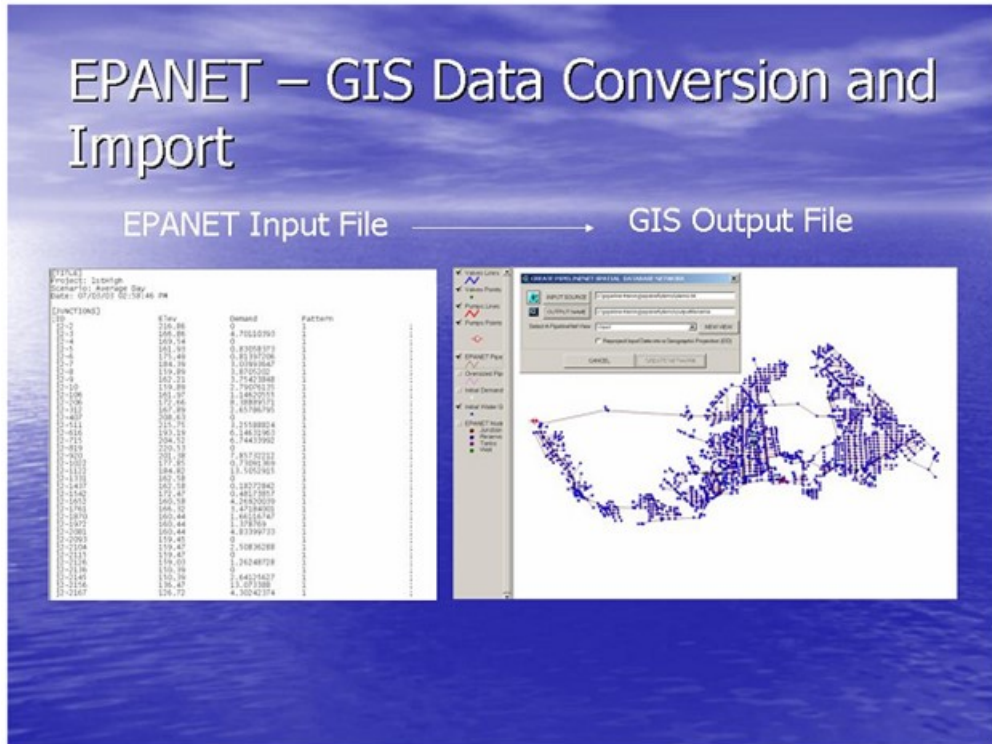


Ilustración 25. Conversión de archivo de datos de entrada a la salida EPANET SIG para su uso en PipelineNet.

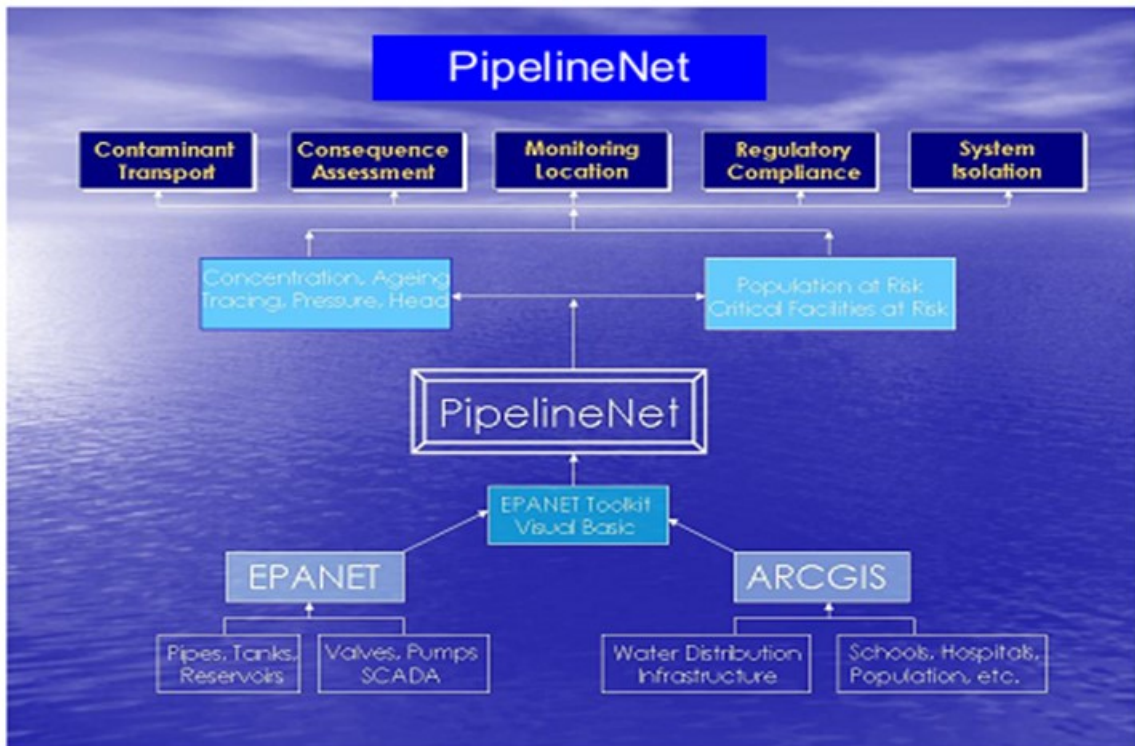


Ilustración 26. Pipeline diagrama esquemático.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

El sistema se basa en jerarquía de capas, donde cada capa representa una función hidráulica o de otro tipo relacionados con el sistema de distribución de agua. La capa inferior en la jerarquía contiene el modelo de distribución de agua completa. Cada capa posterior elimina algunos nodos, que no están disponibles para el monitoreo, basado en criterios predefinidos. La capa superior contiene la mayoría de los nodos, que están disponibles para el monitoreo. Estos nodos también se pueden seleccionar por cualquier combinación de capas, dependiendo de los requisitos de seguimiento. La Ilustración 27 muestra la conceptualización de un método para la localización de los puntos de monitoreo. El lado izquierdo de la Ilustración 27 se muestra la jerarquía de los criterios utilizados para seleccionar los lugares de control y la parte derecha de la Ilustración muestra la interfaz PipelineNet (base de datos espaciales Tool Display) desarrollado para interpretar este concepto. Las capas en la jerarquía se dividen en tres categorías:

- Categoría 1 muestra las capas de la salida de simulación de período extendido, por ejemplo, presión, caudal, la demanda y la calidad del agua. Estos pueden además ser seleccionados en base a un período de tiempo particular o un rango de valor.
- Categoría 2 muestra capas de los parámetros de entrada del modelo, por ejemplo, punto de intrusión (fuentes de contaminación), la demanda y la calidad del agua.
- Categoría 3 tiene capas de datos auxiliares, por ejemplo, SIG e infraestructura de datos.

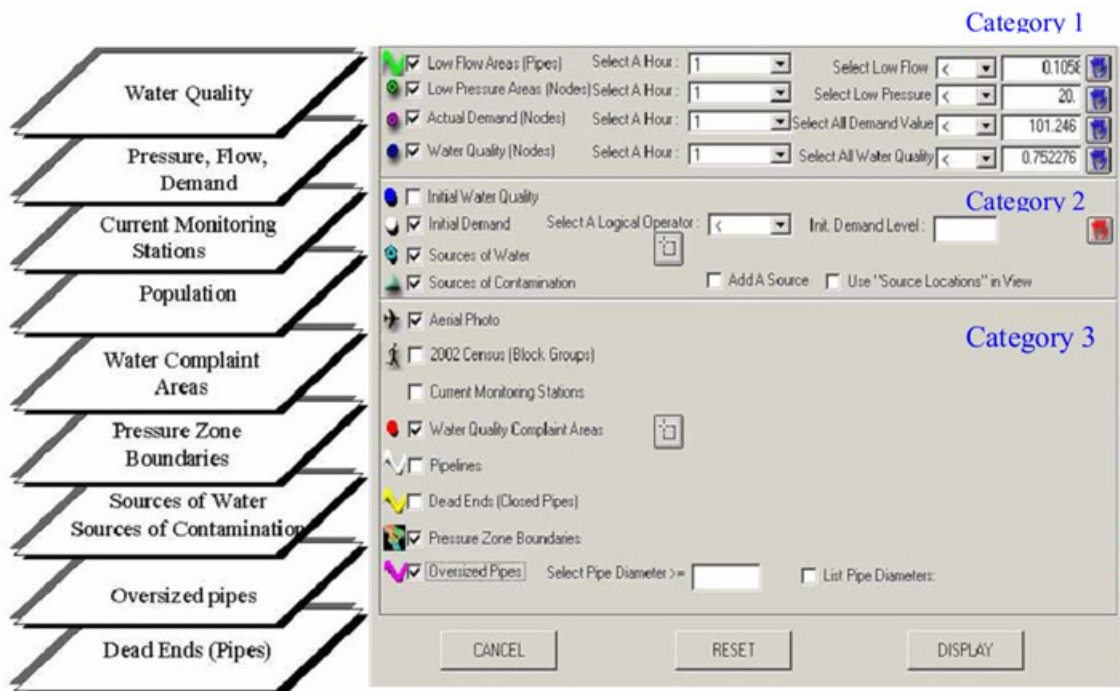


Ilustración 27. Concepto y una interfaz para determinar la ubicación de puntos de control.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

La adaptación a PipelineNet de los datos del modelo de un organismo de servicios públicos de agua en ArcGIS es una de las principales modificaciones de base de datos en este proyecto (SAIC 2004). El modelo de datos reemplaza tanto los archivos de forma (archivos Shape) del SIG que actualmente representan la red espacial y el modelo hidráulico que caracteriza el sistema de tuberías de distribución (ver Ilustración 28), con un estándar establecido que incluye un conjunto esencial de las clases de objetos y propiedades y un conjunto de reglas y relaciones que definen los comportamientos de objetos. En consecuencia, todos los parámetros necesarios para ejecutar el análisis y espacialmente ilustrar la red se incluyen en un solo modelo.

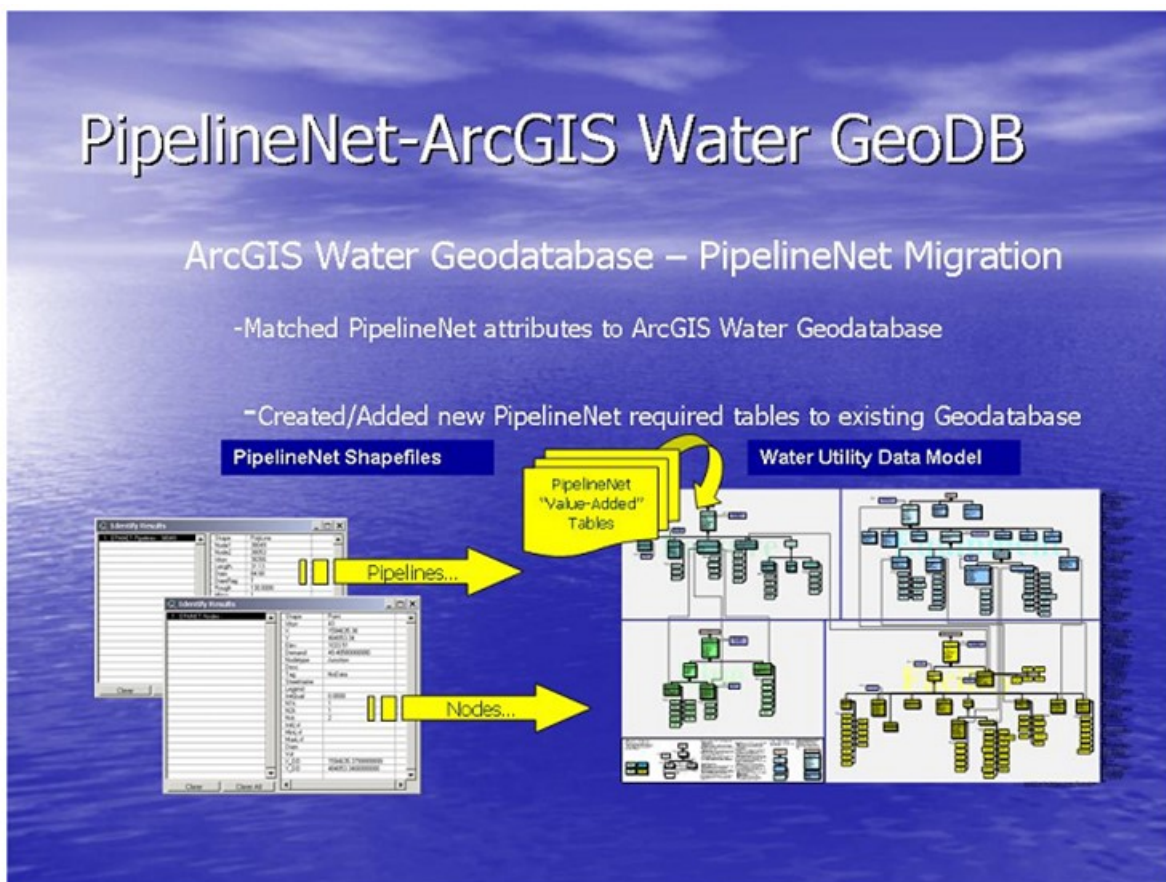


Ilustración 28. Conversión de archivos de forma PipelineNet en el modelo de datos de los servicios del agua.

Los datos del organismo operador de agua (ver Ilustración 29) se tienen que ampliar para permitir el almacenamiento de parámetros de modelado hidráulicos requeridos por EPANET. Básicamente para cada sección del archivo de entrada EPANET, se crea una tabla de atributos en la base de datos geográficos.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

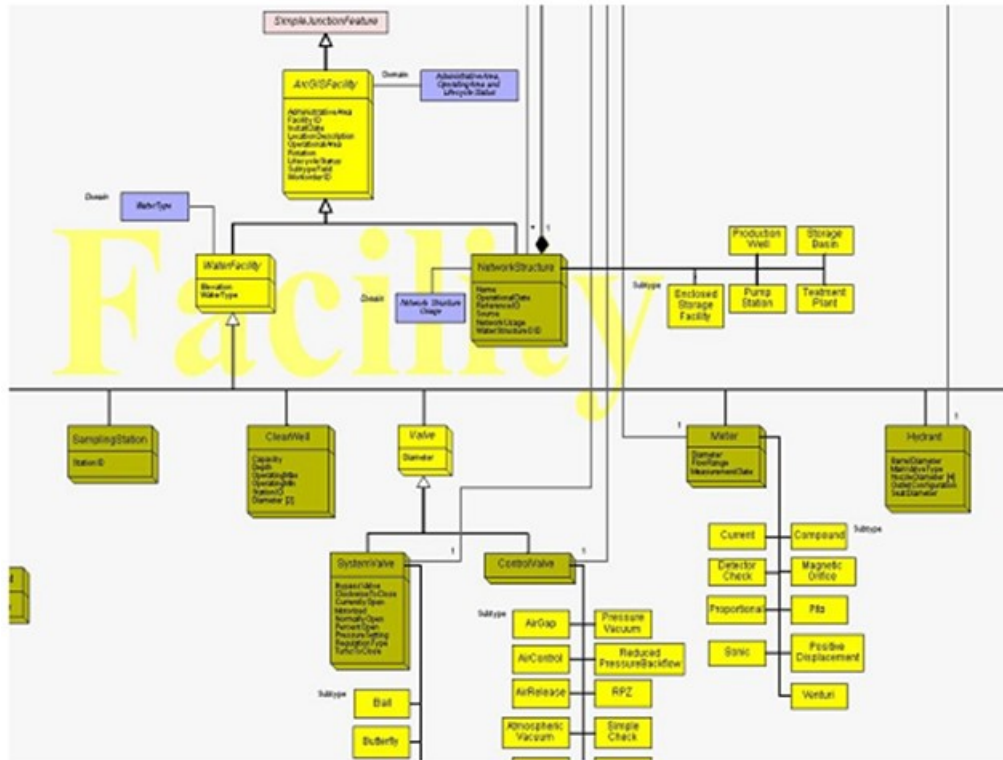


Ilustración 29. Parte del modelo de datos de los servicios del agua para información de las instalaciones

En la Ilustración 30 se muestra la interfaz gráfica de usuario (GUI) y la representación de una red de distribución de agua en ArcGIS, organizada en una serie de pestañas que permiten la importación de datos y conversión, análisis (concentración, edad del agua, datos hidráulicos, evaluación de las consecuencias, etc.), corriendo EPANET en modo autónomo. Un ejemplo de resultados de la concentración de la calidad del agua se muestra en la Ilustración 31.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

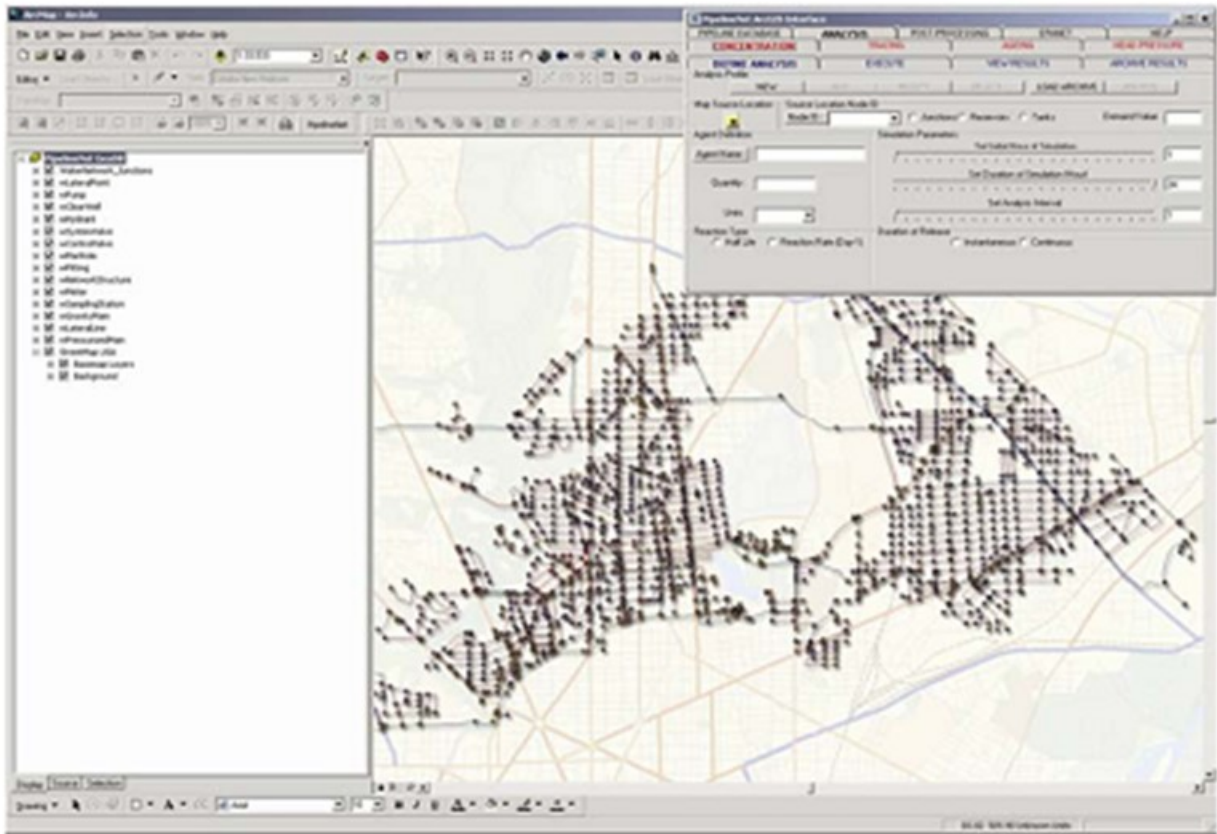


Ilustración 30. Versión ARCGIS de PipelineNet.

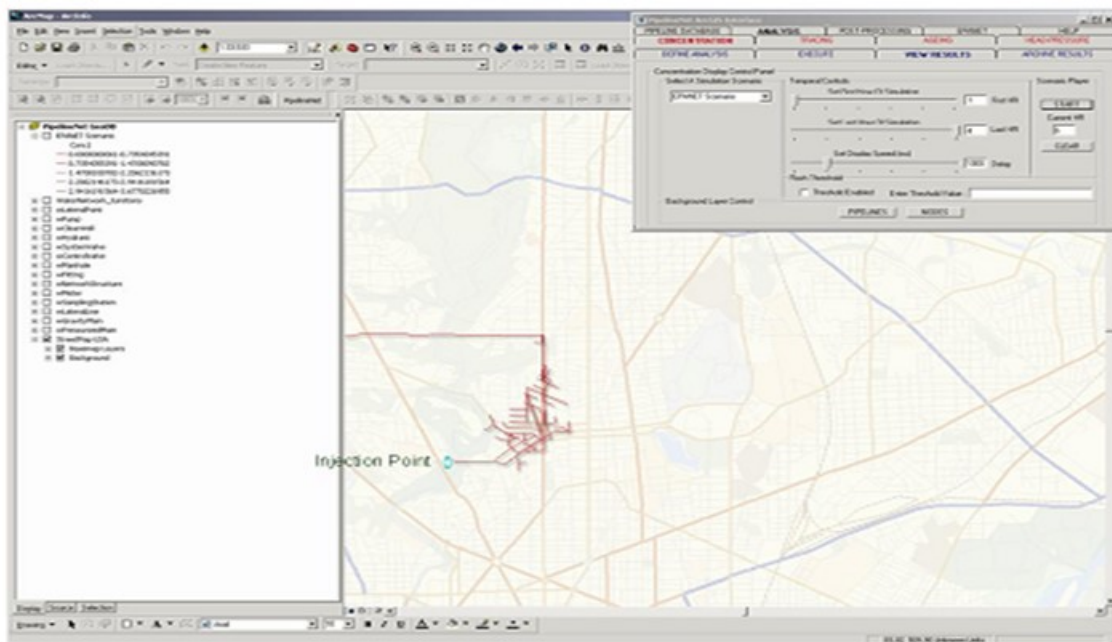


Ilustración 31. Ejemplo de simulación de la calidad del agua en PipelineNet.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

La evaluación de consecuencias puede llevarse a cabo después de ejecutar una simulación de la calidad del agua para estimar la población y las instalaciones críticas (hospitales y escuelas) en situación de riesgo (ver Ilustración 32). Capas adicionales y mapa de fondo, tales como fotografías aéreas e imágenes de satélite se pueden agregar a la vista para mejorar la visualización de salida.



Ilustración 32. Evaluación de las consecuencias utilizando PipelineNet.

5.2 Giswater

Es un conector que une los SIG (Sistema de Información Geográfica) con bases de datos y modelos matemáticos de agua, con el objeto de construir un ambiente de tecnologías libres para la gestión de agua. Con ello Giswater integra en un solo ambiente los conceptos de 'Gestión del agua', 'SIG', 'Modelos Hidráulicos', 'Base de datos' y 'Computación en nube', ofreciendo una excelente plataforma tecnológica de gestión.

Este modelo surge de la jornada de SIG Libre, donde la Universidad Politécnica de Catalunya ubicada en Barcelona decidió emprender el trabajo de compartir el conocimiento como elemento de generación de riqueza, donde se lograran comunicar software libres en el mundo de la hidráulica EPANET, EPA SWMM y HEC- RAS a través de una base de datos PostgreSQL con su extensión espacial de PostGIS, con cualquier Sistema de Información Geográfica que tenga la capacidad de conectar con esta.

Una visualización del ambiente de Giswater tenemos en la Ilustración 33, donde se pueden visualizar como pivotando alrededor de una base de datos, conviven diferentes tipos de tecnologías con potencial para la gestión.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

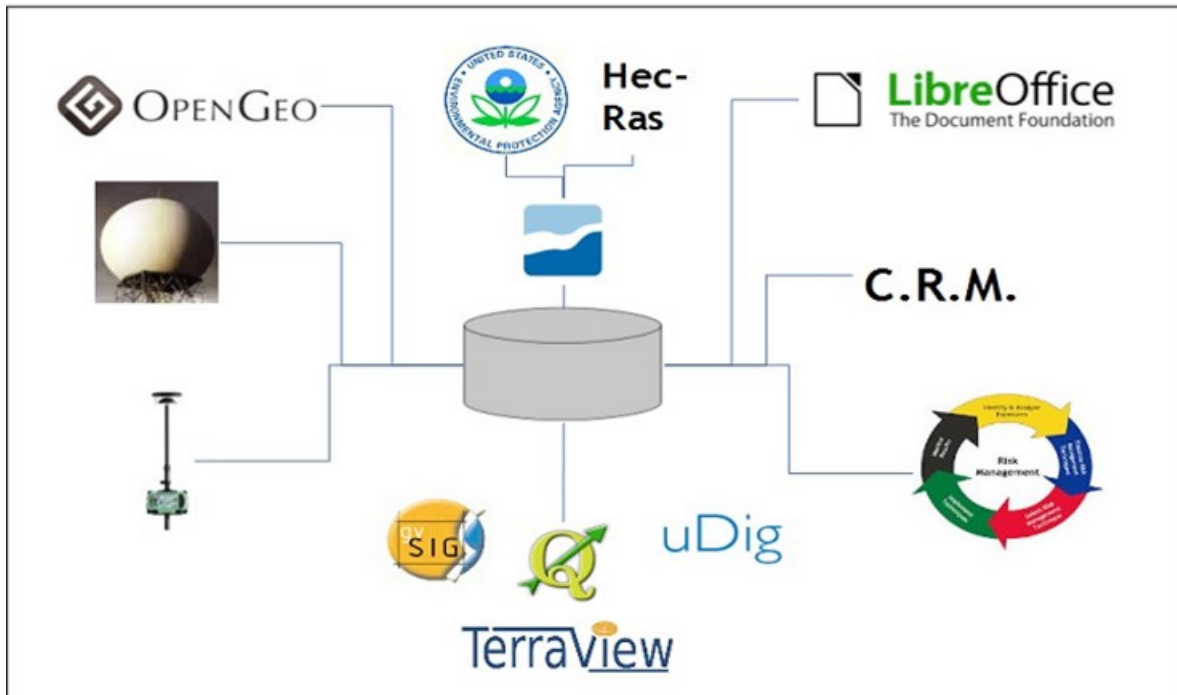


Ilustración 33. Esquema de integración de tecnologías.

Giswater, un proyecto de software libre basado en compartir el conocimiento como elemento de generación de riqueza, con la que se pretende mejorar la gestión del ciclo integral de agua aprovechando todo el ambiente de tecnologías de código libre disponibles en la actualidad.

Las tecnologías de código libre son aquellas aplicaciones informáticas en que las fuentes son liberadas -solo es libre aquel software que se libera- y lo son mediante licencias que cumplan el principio de las cuatro libertades:

- Libertad de uso. Se puede usar una y tantas veces como se quiera durante todo el tiempo que se quiera.
- Libertad de difusión. Se pueden repartir a quien se quiera el número de copias que se quieran.
- Libertad de estudio. El código fuente está disponible. Se puede estudiar cómo se ha hecho y comprender su estructura en toda su totalidad.
- Libertad de modificación. Como se tiene acceso al código, este se puede modificar para mejoras o personalizaciones, siendo igualmente libre el código resultante.

La única restricción que impone el software libre, es que NO se puede privatizar.

Hay que destacar que hay multitud de ejemplos de software libre, desde la tecnología para servidores Apache a sistemas operativos como Linux, bases de datos como MySQL,

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

Postgre SQL, programas de escritorio como LibreOffice, gvSIG o Mozilla Firefox, así como otros muchos más. Son una realidad del presente, pero más importante aún son la opción del futuro. Una opción que nos va a permitir poner esfuerzos en lo realmente importante. En este sentido el software con el que se manejará la información no será tan relevante como los datos gestionados. Sin lugar a dudas, en el futuro, lo importante van a ser los datos.

Como son fuentes libres y cumplen con estándares de interoperabilidad, nos dan independencia del proveedor y de esta manera tenemos a nuestra disposición una amplia estructura profesional que nos ofrecerá siempre el mejor servicio técnico posible. Gracias a ello y a la potente comunidad internacional que pivota alrededor del software libre se puede afirmar que en el campo de la geo-información, el mismo ha llegado ya a su madurez tecnológica.

Como son fuentes libres, permiten una implementación escalable, con lo que nos van a permitir migraciones no convulsas, conviviendo con modelos privativos y otorgar a quien los uso soberanía tecnológica. Adicionalmente podremos alinear las funcionalidades al servicio necesario, con lo que vamos a tener un software adaptado a nuestras necesidades.

A la vista de lo expuesto, Giswater permite la gestión, diseño y análisis de infraestructuras y riesgo asociado para redes de abastecimiento, redes de saneamiento y drenaje urbano, así como permite la gestión del riesgo de inundabilidad desde la óptica de software libre. Los tres modelos matemáticos, así como su trayectoria, uso masivo en todo el mundo y confiabilidad contrastada en el cálculo son un buen referente de software de hidráulica a los que realmente les faltaba todo lo que Giswater le aporta.

- **Almacenamiento de la información**

Sin lugar a dudas, el gran objetivo de Giswater es habilitar el máximo número de posibilidades de almacenaje de la información. En este sentido la herramienta nace en su versión 1.0 con la posibilidad de almacenaje en formato DBF así como también en formato base de datos tipo PostgreSQL. Para posteriores versiones de la base de datos, está previsto que también sea posible realizar conectar otras bases de datos tipo ORACLE, MSServer o Spatialite. El objetivo de diversificar los tipos de formato de almacenaje de información es conseguir que cualquier SIG pueda conectar y gestionar la información. En este sentido los SIG que leen archivos Shape File son todos, y los SIG que se conectan a una base de datos tipo PostgreSQL son precisamente los que más funcionalidades y potencial disponen.

- **Sistema operativo**

El único sistema operativo soportado hasta la fecha por Giswater es Windows. Ello es debido a la imposibilidad por el momento de mantener más de una versión de S/O a la vez que HEC-RAS no está diseñado bajo entorno Windows. De todas maneras, el hecho que

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

Giswater se haya desarrollado bajo un entorno multiplataforma como es Java y el hecho que los programas de la EPA sí que es posible de tenerlos bajo sistema operativo LINUX hacen prever la posibilidad que en un futuro se puedan desarrollar versiones de Giswater con las funcionalidades de los EPA bajo este entorno de trabajo tan interesante como es LINUX.

- **Estructura de la base de datos**

Es sin lugar a dudas la clave de la aproximación tecnológica de Giswater. Hay diversos motivos que merece la pena destacar, entre los cuales:

- Robustez de la base de datos, con relaciones entre elementos (claves primarias y claves foráneas) que permiten otorgar coherencia a la información introducida, a la vez que una cierta flexibilidad con los datos que son introducidos.
- Arquitectura basada en la topología arco-nodo, lo cual permite garantizar la coherencia topológica necesaria para el modelo matemático así como habilitar las posibilidades de otro tipo de algoritmos para la gestión. En este sentido cabe destacar la extensión PGrouting, que seguramente puede ser de mucha utilidad en el análisis de redes urbanas y que en un futuro próximo Giswater pueda interactuar con él.
- Escalabilidad del modelo de datos. Gracias a que el modelo de datos pivota sobre las tablas de arco y nodo, es posible vincular a ellas más información como por ejemplo datos necesarios en la gestión. Cabe destacar que al modelo se le pueden incorporar tantas tablas de datos como se considere necesario, desde tablas de información de estado de conservación de los elementos de red, niveles de sedimentos u otro tipo de información no necesaria para el modelo matemático pero muy interesante para la gestión.
- Uso de funciones geoespaciales. PostGIS dispone de más de ochocientas (+800) funciones geoespaciales tanto para ráster como para vector, con las que es posible hacer cualquier tipo de análisis espacial. Sin lugar a dudas, el GIS ya está dentro de la base de datos.
- Uso del lenguaje PLSQL para programación de funciones y triggers necesarios. Se trata de un lenguaje que incorporan las bases de datos más importantes y que permite llegar más lejos con programación que el propio lenguaje SQL standard. Gracias a ello es posible de realizar funciones complejas como los disparadores con cardinalidad n-2 de la tabla arco.

- **Comunicación bi-direccional**

Una de las funcionalidades que incorpora Giswater, es la capacidad de escribir y leer en archivos de texto, mediante los que se comunica con los programas de modelado matemático.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

Es importante mencionar que los programas con los que Giswater tiene habilitada esta funcionalidad de lectura/escritura son por el momento los dos de la EPA: EPANET y EPA SWMM. Para el caso de HEC-RAS la comunicación solo es unidireccional. Esto significa que solo se realiza de forma parcial de la base de datos hacia el modelo matemático, y no en sentido contrario. En un futuro se preveen ir añadiendo funcionalidades en una dirección, y el equipo de trabajo de Giswater está valorando la posibilidad de leer los datos de la simulación o no. De momento, esta funcionalidad no está habilitada.

Para el caso de los EPA la comunicación se produce de la siguiente manera:

1. Cada tipo de información es almacenada en tablas diferentes con el objetivo de optimizar el almacenaje de los datos. En este sentido, hay tablas de almacenaje de información para todos los tipos de datos que gestionan tanto EPANET como EPA SWMM, como pueden ser datos de modelo de calidad, aguas subterráneas, patrones, curvas o series temporales entre otros.
2. Mediante una selección establecida con la tabla SECTOR_SELECTION, se seleccionan aquellos sectores de red cuyos datos quieran ser exportados.
3. La exportación se realiza a ficheros de texto tipo INP, según formato estándar de la EPA para que el software pueda leer la información que se le entrega.
4. Se ejecutan los programas de la EPA desde línea de comando, sin necesidad de abrir la GUI de Windows, mediante los cuales se genera el archivo de resultados RPT.
5. Se leen los resultados del archivo RPT y se almacenan en tablas vinculados a arco y nodo (tablas RPT).
6. La visualización de los resultados se puede realizar desde los SIG que conectan y visualizan la información geoespacial, puesto que los resultados están vinculados con los arcos y nodos sobre los que han sido generados.

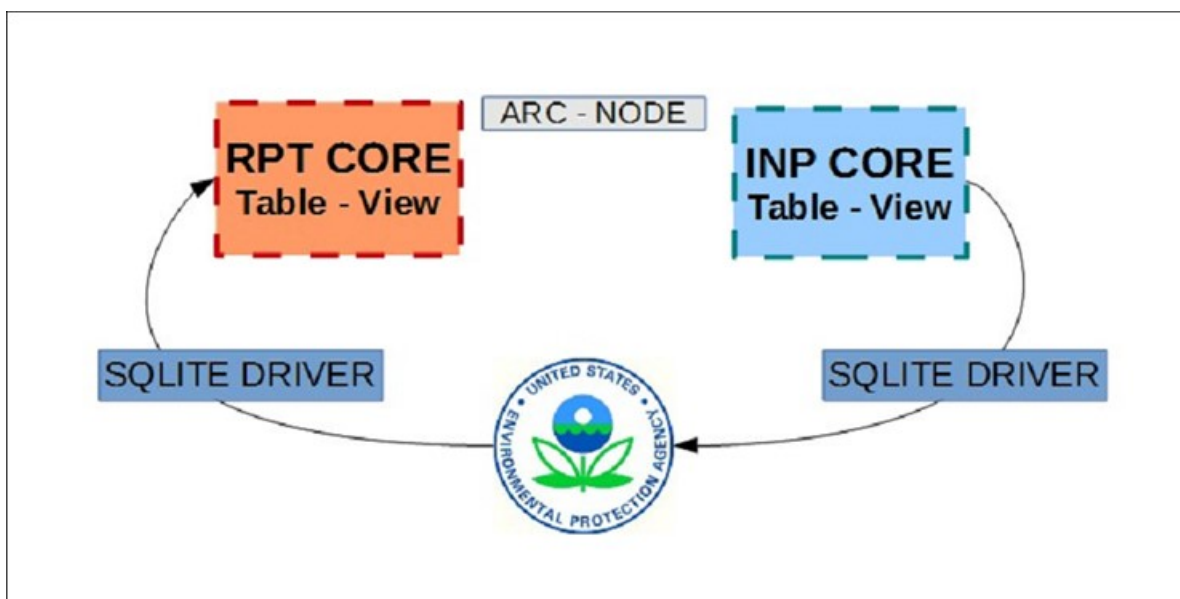


Ilustración 34. Muestra representativa del modelo comunicativo de Giswater con los 'EPA'.

5.3 Plex Earth

Plex.Earth interactúa con AutoCAD desde el Internet, permitiéndole la comunicación y el intercambio de datos con Google Earth. El usuario puede sincronizar los dos programas, importar imágenes aéreas y la información del terreno en sus dibujos y publicar sus proyectos en Google Earth.

Puede conectar los diseños de ingeniería con Bing Maps, Google Earth/Google Maps, OpenStreetMap, USGS, o cualquier otro proveedor de servicios WMS. Plex.Earth es una producción de Plexscape[®], creado en 2009 por Lambros Kaliakatsos, un ingeniero civil y especialista en software.

Es un software fácil de usar y muy gráfico, el cual brinda una prueba gratis por 14 días, de ahí en adelante debe de pagar una licencia ya sea mensual o anual según sea la necesidad del usuario.

Para el uso de este programa solo basta con tener una computadora de 32 o 64 bits, la versión de AutoCAD puede ser a partir del 2007 o versión más reciente.

Este programa surge a partir de la necesidad de mostrar de una manera dinámica y grafica los proyectos ejecutados en AutoCAD para que los proyectistas pudieran representar con mejor calidad la ejecución de sus proyectos. Por este motivo Plex Earth crea una interfaz para así poder colocar la información real y basada en datos geográficos. Antes de empezar a usar el programa deberá configuración algunos de ellos de acuerdo a las especificaciones de su proyecto, como son:

- Zona: Seleccione la zona en la que se encuentra su proyecto. Puede elegir entre países individuales (y sub-regiones entre las más importantes) y áreas más amplias como continentes.
- Cuadrícula: El sistema específica coordenadas de su proyecto que ha construido. Si el que está utilizando no está en Plex.Earth puede ponerse en contacto con Plexscape para añadirlo a su lista. Sin embargo si el proyecto no se basa en una red disponible en las opciones hay muy pocas funciones que se pueden utilizar.
- Unidades: Las unidades por defecto utilizadas por Plex.Earth son metros. Si el dibujo utiliza un diferente sistema métrico se debe cambiar en “Configuraciones”.

Por lo general lo primero que debe hacer después de la creación de Plex.Earth es tener Google Earth zoom en el área donde se encuentra su proyecto. Para ello, basta con utilizar el comando "Sincronizar Google Earth":

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

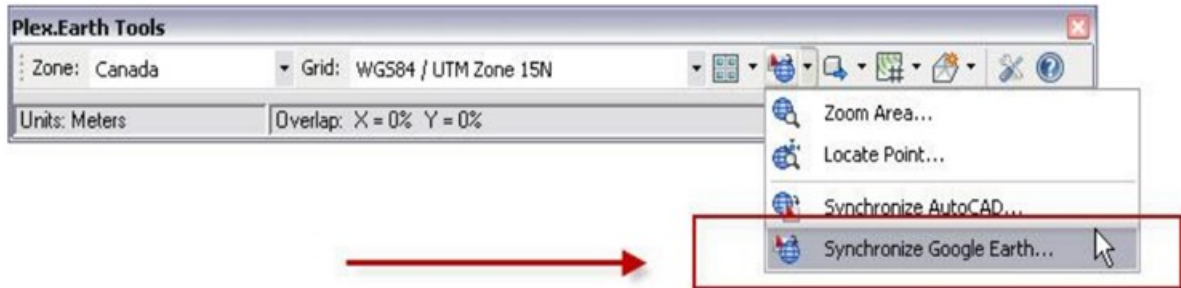


Ilustración 35. Sincronización de Google Earth

Google Earth se abrirá automáticamente (si no lo está utilizando ya) y lo acercará al área que aparece en la ventana de AutoCAD. Ahora puede proceder a inspeccionar la región circundante y decidir qué partes de ella desea importar en el dibujo.



Ilustración 36. Grupos que conforman a Plex Earth

Las funciones Plex.Earth se dividen en cinco grupos que se muestran arriba:

- Trabajar con Imágenes:** Contiene todas las diferentes opciones con las que se pueden importar imágenes de Google Earth en su proyecto.
- Zoom y sincronización:** Proporciona el conjunto de herramientas para sincronizar cualquiera de los dos programas con el otro antes de utilizar las funciones más avanzadas.
- Importación y exportación:** Incluye las opciones para importar archivos KML, exportar su proyectarse en Google Earth y crear marcas de posición desde dentro de AutoCAD.
- Terreno y Contornos:** Este menú ofrece las funciones para importar información del terreno de Google Earth y utilizarlo para crear contornos.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

Trabajar con Superficies:

Es el conjunto de herramientas que permiten la creación de superficie estructuradas en su proyecto y el cálculo de varias de sus propiedades.

Importación de imágenes

La función más popular en Plex.Earth es importar imágenes aéreas en su proyecto de AutoCAD, con los comandos básicos que se muestran a continuación:

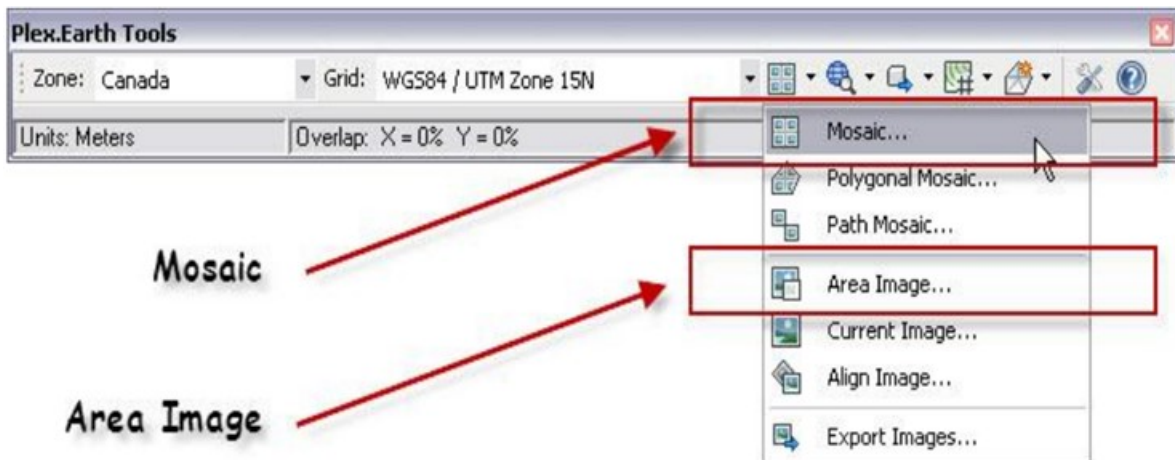


Ilustración 37. Comandos básicos de importación.

Mosaico

A diferencia de **imagen área** que solo importara una imagen, **Mosaico** le permite importar una serie de imágenes para llenar un área rectangular específica, la creación de una cuadrícula de imágenes aéreas, tomadas con el zoom en el nivel con que Google Earth está configurado actualmente.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

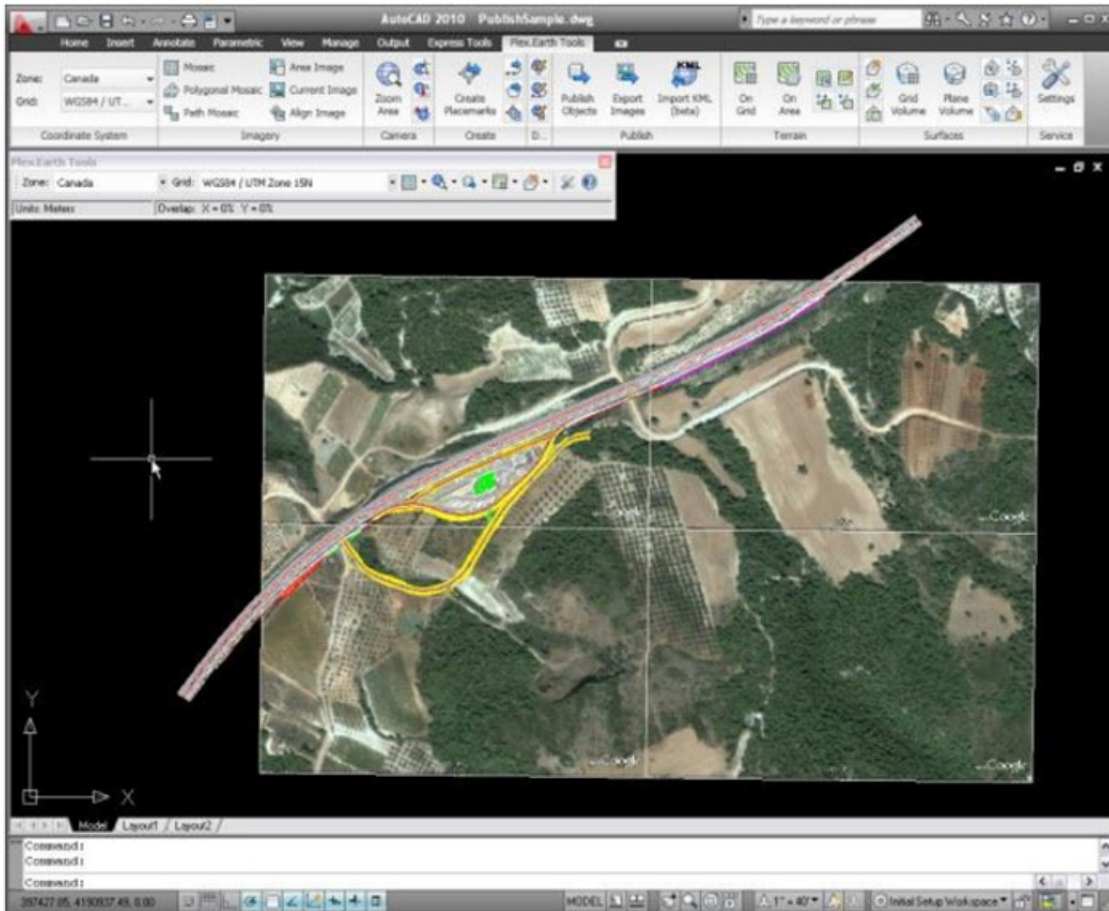


Ilustración 38. Ejemplo de importación de imagen.

Área de la imagen

Utilice "área de la imagen" para rellenar un área rectangular especificada en el dibujo con una **sola** imagen de Google Earth. Cuando se define la región deseada Google Earth hará zoom en /fuera automáticamente para hacer la captura apropiada que luego se importa en su dibujo.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

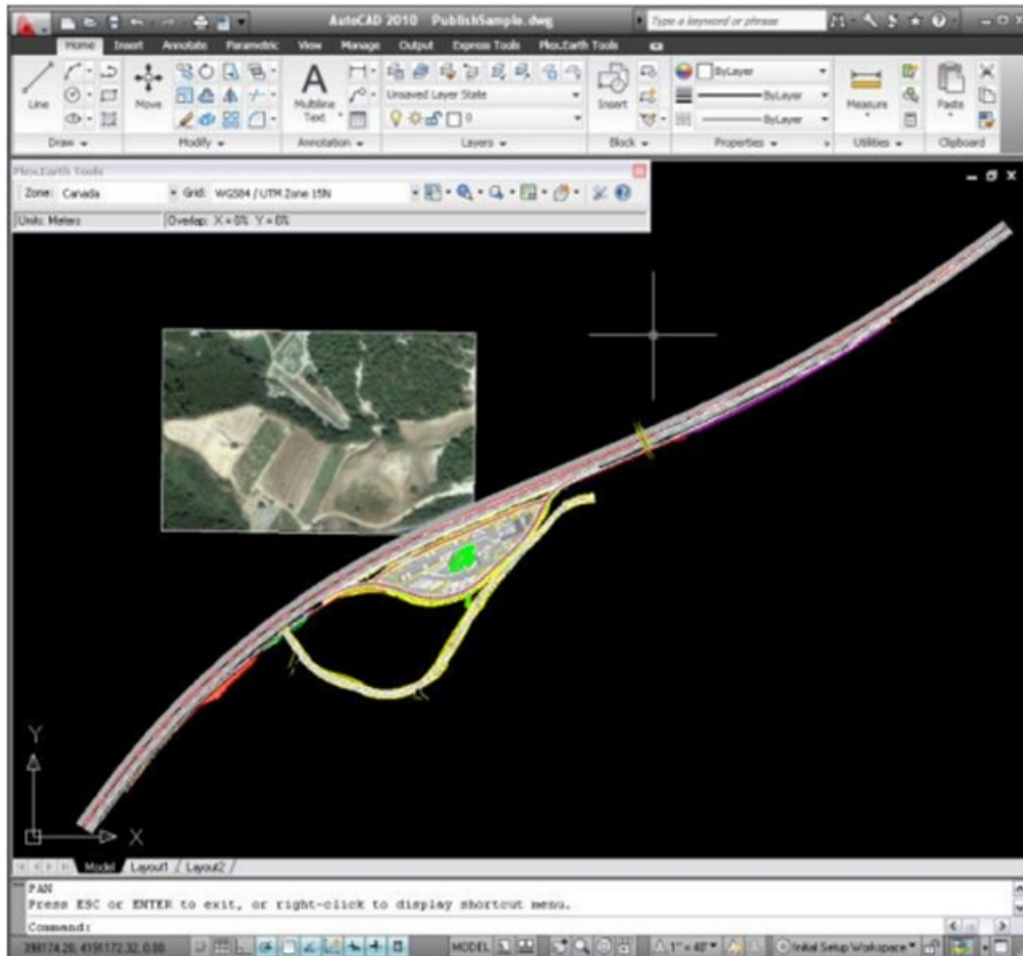
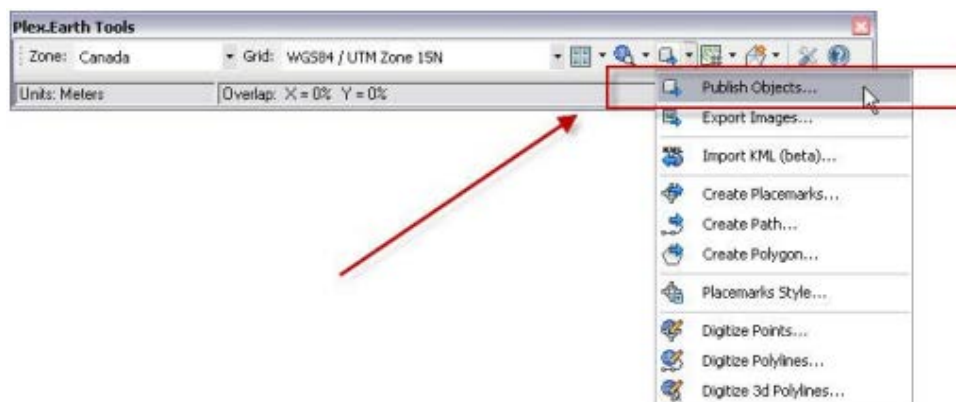


Ilustración 39. Ejemplo de importación de área como imagen.

Exportar su proyecto en Google Earth.

Con el fin de crear una presentación rápida de su trabajo directamente en Google Earth se puede utilizar el comando **Publicar Objetos**:



Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

Se le pedirá que seleccione los objetos que desea exportar así como el modo altitud. Su proyecto aparecerá dentro de Google Earth, sus componentes agrupados en lugares temporales.

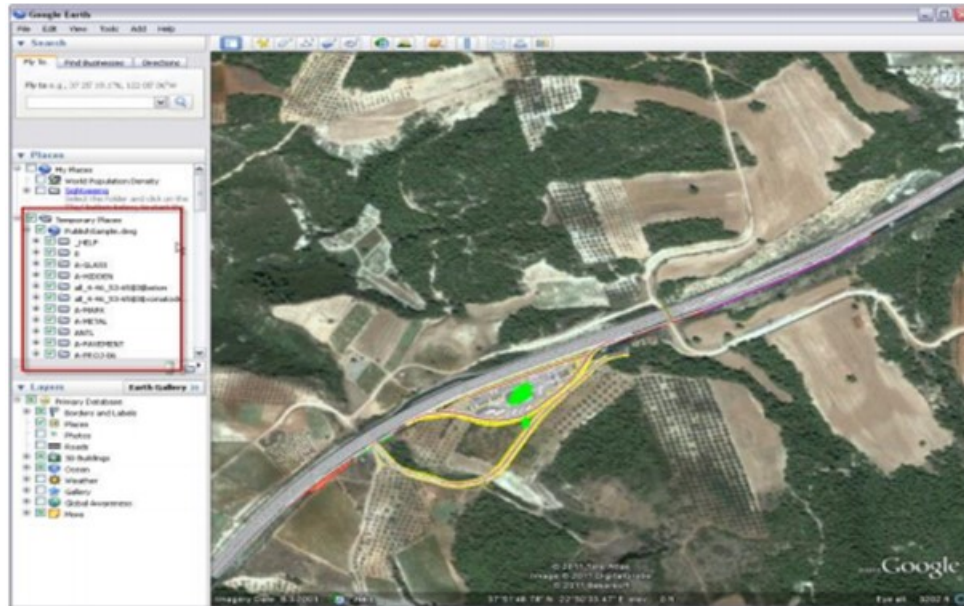
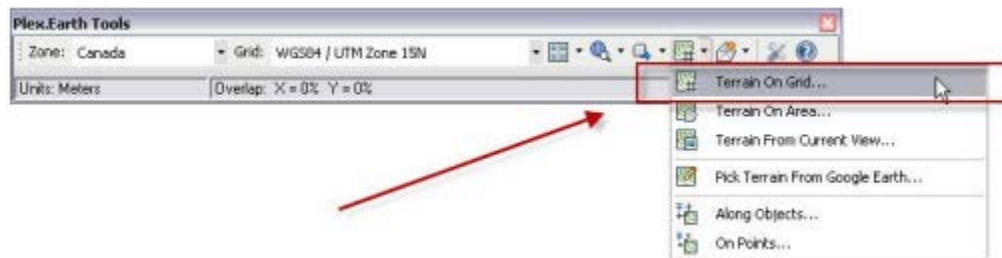


Ilustración 40. Ejemplo de cómo exportar su proyecto en Google Earth.

Este menú incluye todas las funciones de exportar los elementos de su proyecto directamente en Google Earth como objetos, imágenes, marcas de posición, rutas y polígonos. También soporta la capacidad de importar archivos KML y 3D para obtener los datos directamente desde Google Earth en forma de puntos y polilíneas.

Importación de Terreno y Contornos

Otro uso popular de Plex.Earth es ir a buscar información sobre el terreno de Google Earth a través de una red de puntos de 3 dimensiones y usarlo para crear contornos. Seleccione el comando de "Terreno en Cuadrícula":



Se le pedirá que introduzca lo siguiente:

- Cuadrícula punto base: la esquina inferior izquierda de la cuadrícula.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

- Rotación de Cuadrícula: la orientación de la cuadrícula.
- X Separación: la distancia entre los puntos importados a lo largo del eje X.
- Y Separación: la distancia entre los puntos importados a lo largo del eje Y.
- Esquina superior derecha: la esquina superior derecha de la cuadrícula.

Terreno

Permite al usuario seleccionar el elemento (o combinación de elementos) para importar, cuando se utilizan los comandos del terreno. Las opciones son:

- Puntos
- Contornos
- Objeto de superficie (TIN)

Marque "importación terreno optimizado" para protegerse de las grandes discrepancias entre los puntos del terreno debido a las elevaciones de Google Earth no haber importados terminan con la suficiente rapidez. (Usted puede haber notado que se crea la capa superficial poco a poco cuando se mueve a un nuevo punto en el espacio). Sin embargo esta optimización se traduce en un procedimiento lento en general, así como el agotamiento rápido de los aproximadamente 5K puntos por sesión que Permite Google Earth.

Contornos

Establece los atributos que definirá la formación de los contornos. A saber:

Elevación de la Base

Específica la base de los intervalos relativos de elevación de contorno. El contorno en la elevación de la base es un contador principal.

Intervalo menor

Específica la distancia entre los contornos de menor importancia. El intervalo es relativo al valor de elevación de la base.

Intervalo mayor

Específica la distancia entre los contornos mayores. El valor introducido aquí es divisible por el intervalo menor. El intervalo es relativo al valor de elevación de la base.

Trabajando con superficies

Plex.Earth luego importará todos los puntos necesarios para crear la red y, posteriormente, utilizará los datos para crear contornos. Con esta opción el usuario puede crear una superficie 3D de cualquier conjunto de puntos que elige usar. El método de triangulación de Delaunay se utiliza para producir la superficie que va a ser una malla poligonal.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

Cuando el comando se invoca la ventana Crear Superficie pop-up aparecerá que permite al usuario seleccionar los puntos de los que se creará la superficie, así como añadir restricciones en la forma de líneas de ruptura y las fronteras. Al hacer clic en el símbolo "+" en la parte superior de la pestaña definición trae las opciones disponibles. Utilice:

- **Añadir punto:** Para hacer la selección de puntos que se utiliza para formar la superficie 3D.
- **Añadir líneas de rotura:** Para agregar líneas de rotura a la creación de la superficie 3D.

Las líneas de corte se definen en los bordes, donde ocurren los cambios de pendiente bruscos, como los lados de la carretera y el borde de la pared del acantilado, y la adición de la construcción de los bloques de las reglas de superficie 3D y mayor representación del modelo.

- **Añadir límite exterior:** Para limitar la superficie en la zona mencionada.
- **Añadir fronteras internas:** Para excluir zonas específicas de la superficie interna que se creará.
- **Analizar el texto y puntos:** Para agregar objetos de texto de puntos 3D proporcionado la etiqueta de elevación.

La pestaña **Contorno** le permite crear automáticamente los contornos de la superficie creada.

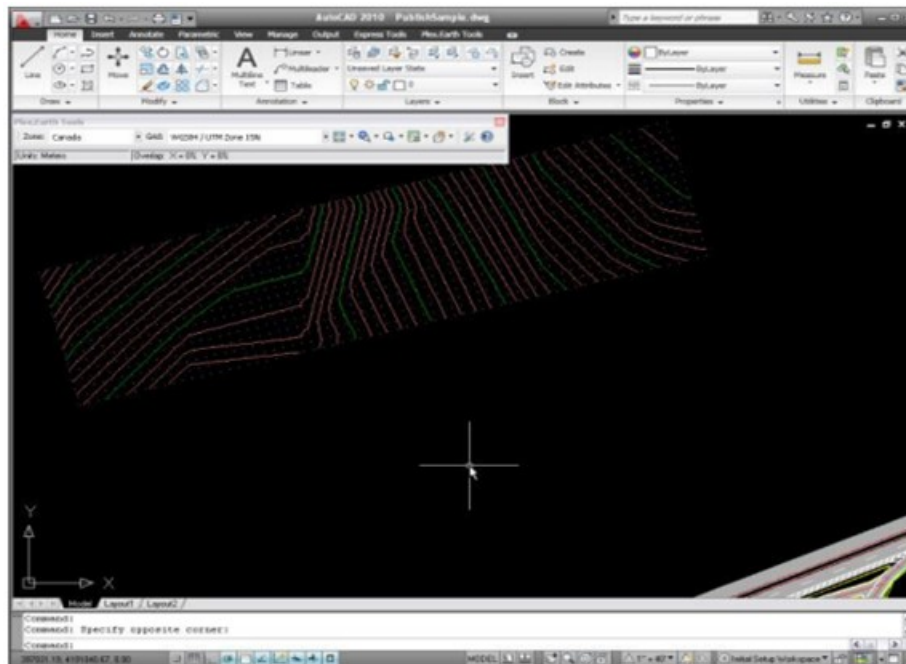


Ilustración 41. Cuadrícula con contorno.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

Este menú contiene comandos que permite al usuario crear superficies 3D, obtener varias características clave y calcular volúmenes entre ellos, entre otras cosas.

5.4 UFC

Fue creado en Brasil en la Universidad Federal de Ceará, de donde lleva su nombre. Es un conjunto de software escrito en diferentes lenguajes de programación que realiza todas las tareas relacionadas con el trazado y el dimensionamiento hidráulico de las redes de abastecimiento de agua, líneas de conducción y redes de alcantarillado sanitario. Los componentes del sistema de UFC son:

- UFC2 - Módulo del Diseño y / o línea de conducción en AutoCAD y la Interface AutoCAD / EPANET;
- UFC3 - Módulo de inserción de Conexiones, numeración de nodos y tramos y elaboración de dos redes cuantitativas de distribución de agua;
- UFC4 - Módulo de Dimensionamiento de redes de abastecimiento de agua;
- UFC5 - Módulo de Selección de Bombas hidráulicas;
- UFC6 - Módulo para el análisis y la simulación computacional del golpe de ariete en líneas de conducción;
- UFC8 - Módulo de Dimensionamiento de Redes de micro-drenaje Urbano;
- UFC9 - Módulo para trazado y dimensionamiento hidráulico de redes de alcantarillado sanitario y estaciones de bombeo de aguas residuales.

Cualquier proyecto elaborado con UFC empieza con cargar en AutoCAD las curvas de nivel y la planimetría del lugar que son la base para desarrollar cualquier proyecto de abastecimiento. La interfaz entre lo trazado en Autocad y el EPANET se realiza por medio del siguiente menú de iconos:



Ilustración 42. Iconos UFC2 y sub-ícono EPANET.

Para insertar el tanque con nivel de agua variable son necesarios los siguientes datos:

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

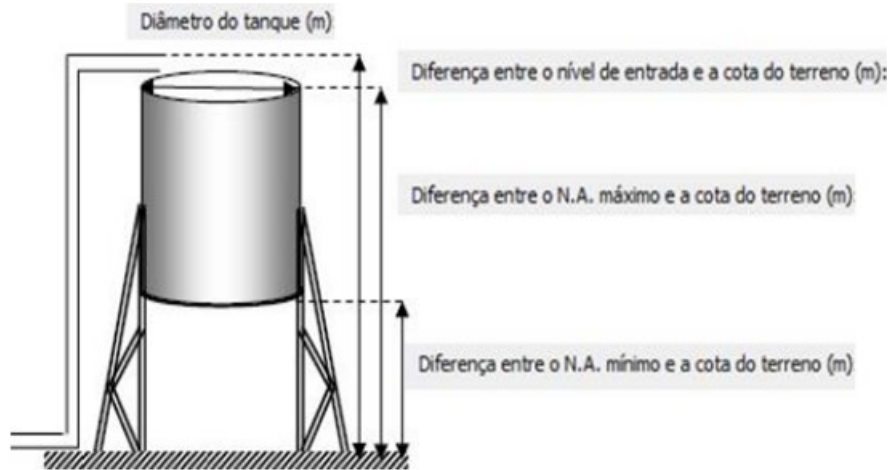


Ilustración 43. Modelo del tanque.

- Diferencia de N.A. mínima y la elevación del terreno (m)
- Diferencia de N.A. máximo y la elevación del terreno (m)
- Diferencia entre el nivel de entrada y la elevación del terreno (m)
- Diámetro del tanque (m)
- Altura inicial (%)
- Altura mínima de las bombas (%)

Para entender mejor los datos que se solicitan, observe la ilustración del sistema de abastecimiento de agua y conducción.

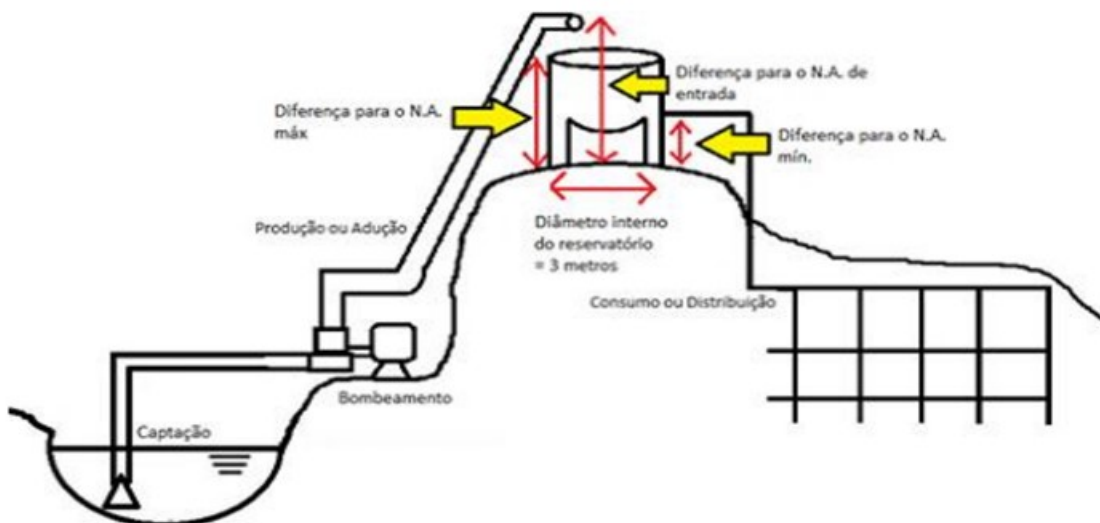


Ilustración 44. Sistema de abastecimiento (Conducción y consumo).

El sistema determina las demandas nodales con base en la siguiente secuencia de cálculo:

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

$$Q_{\text{máx día}} = \frac{P c K_1 K_2}{86.400} \quad (7)$$

dónde

P = Población del Proyecto

c = Consumo per cápita [L / (día. hab)]

K_1 = Coeficiente de incremento diario

K_2 = Coeficiente de incremento diario

$Q_{\text{Máx día}}$ = Gasto Máximo (L / s)

Después de que el programa calcula el valor de $Q_{\text{Máx día}}$, se determina el valor del gasto unitario de entrega en ruta q :

$$q = \frac{Q_{\text{máx día}}}{\sum L_i} \quad (8)$$

dónde $\sum L_i$ es la longitud total de todos los tramos de la red.

Por último, el programa calcula los valores de consumo nodal basado en la longitud de influencia de cada nodo de la red de la siguiente manera:

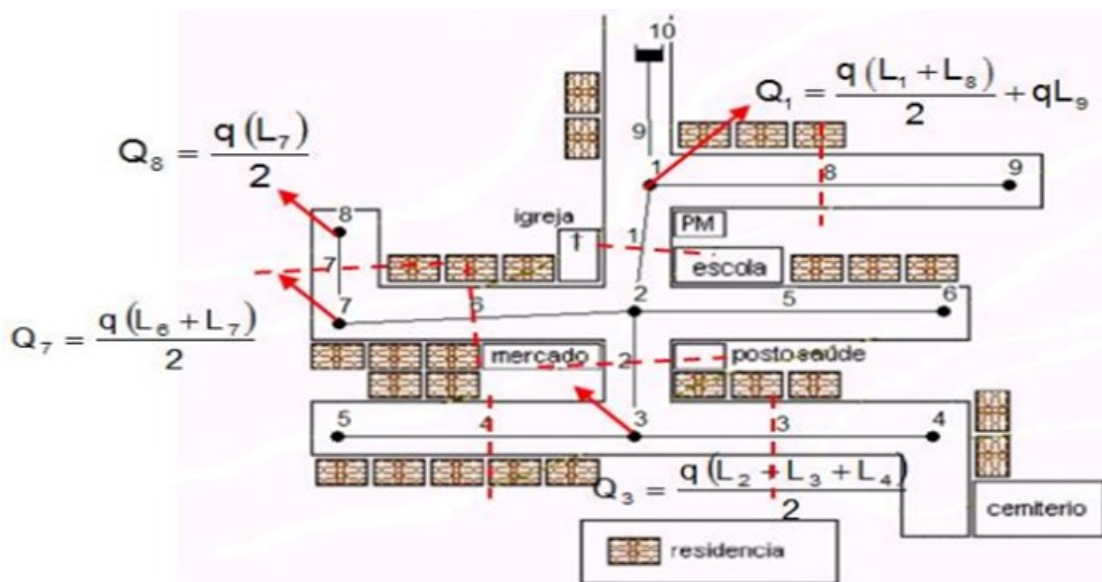


Ilustración 45. Consumo nodal basado en longitud.

Así se determinan y se transporta a EPANET los consumos nodales:

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

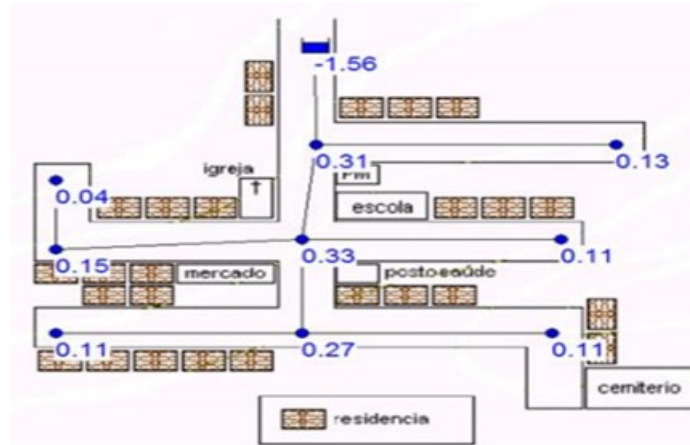


Ilustración 46. Ya en EPANET se tienen los consumos nodales.

Hay que recordar que las demandas nodales de una red basada en una población, presentada anteriormente, es una forma en que distribuye homogéneamente y uniformemente las demandas nodales. Sin embargo normalmente en una red real se tienen "**puntos de demanda especial**", también conocidos como "**Demandas puntuales o concentradas**", por ejemplo, grandes edificios, centros comerciales, escuelas, universidades, hospitales, industrias, condominios cerrados, etc. En este caso la demanda no se debe distribuir basada en población.

Aparte de la modelación de la red con diámetros dados, como lo hace Epanet, el sistema UFC puede hacer un dimensionamiento de la red, es decir, determinar el conjunto de diámetros que componen la red más barata usando Algoritmos Genéticos, con restricciones en de los valores de presión mínima o valor límite para la pérdida de carga unitaria. Para ello es necesario dar el material, los diámetros disponibles para el dimensionamiento y el costo unitario de cada diámetro disponible. Esta información está disponible en un archivo de texto. El Algoritmo Genético que es un método de optimización basado en una generación de una serie de redes de diversos diámetros y posterior selección de la red más económica, por lo que es absolutamente esencial que, después de ejecutar el proceso de optimización, el usuario verifique el gráfico de Costo Mínimo de la Red por generación (Ilustración 47).

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

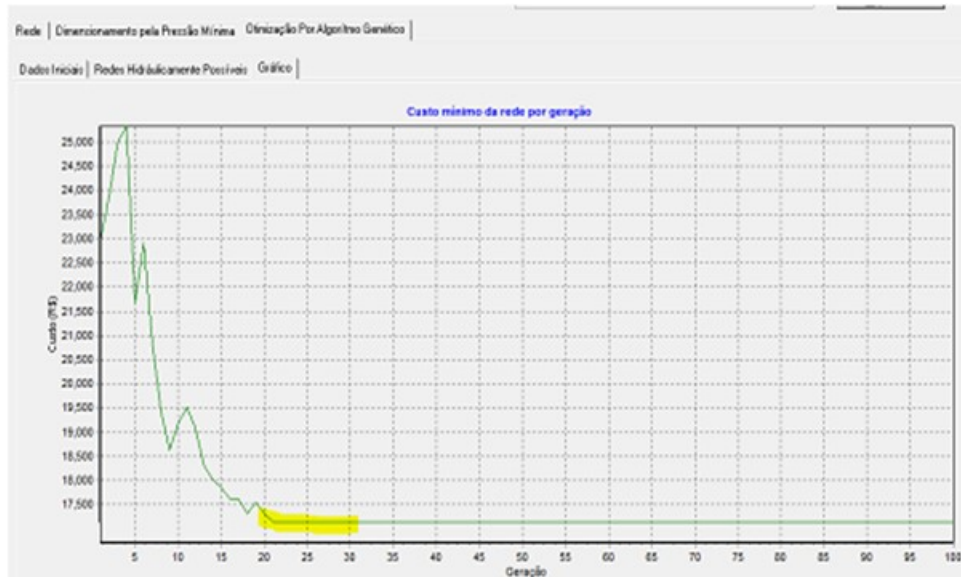


Ilustración 47. Mínimo para así conseguir la red de costo mínimo.

Las Ilustraciones 48 y 49 muestran la información de cuantificación de piezas y cantidades de obra que genera UFC en formato Excel.

UFC3 - Quantitativos de Rede de Abastecimento de Água

Arquivo Modificar Quantitativos

C P T R

UFC3 - Software para Inserção de Conexões e Quantitativos em rede de Abastecimento de Água
Universidade Federal do Ceará - Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental
Autora: Renata Shirley de Andrade Valdivino - Orientador: Marco Aurélio Holanda de Castro

DESCRIÇÃO	UNIDADE	QUANTIDADE
REDE DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA		
CONSTRUÇÃO DO CANTEIRO DA OBRA		
Barracão para escritório tipo A1	un.	1,00
Cerca c/ estacas de madeira - 6 fios de arame farpado	m	60,00
Mobilização e desmobilização de equipamentos em caminhão equipado c/ guindaste	km	300,00
Instalações provisórias de luz, força, telefone e lógica	un.	1,00
Instalações provisórias de água	un.	1,00
Fossa sumidouro para barracão	un.	1,00
Placa padrão de obra	m²	12,00
CADASTRO		
Cadastro de rede de água (MEIO MAGNÉTICO)	m	619,94
LOCAÇÃO		
Locação de rede de água	m	619,94
TRÂNSITO, SEGURANÇA E TRAVESSIA		
Passadiços com pranchas em madeira	m²	31,00
Sinalização noturna de trânsito com barreiras	m	309,97
Sinalização de advertência	un.	3,00
MOVIMENTO DE TERRA		
Escavação com profundidade até 2 metros	m³	384,29
Reaterro de valas	m³	381,81
Bota-fora	m³	2,48
ASSENTAMENTO DE TUBOS E CONEXÕES		
Assentamento de tubos e conexões em PEAD DN 50 mm	m	435,02
Assentamento de tubos e conexões em PEAD DN 100 mm	m	104,01
Assentamento de tubos e conexões em PEAD DN 75 mm	m	46,68
FORNECIMENTO DE MATERIAL		
ADAPTADOR JE PEADxFe 150	un.	1,00

Ilustración 48. Plantilla de Cuantificación de la red de Abastecimiento de Agua.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

A	B	C	D	E	F
23 MOVIMIENTO DE TERRA					
24 Escavación con profundidad até 2 metros	m³	367.21			
25 Reaterro de valas	m³	364.82			
26 Bota-fora	m³	2.39			
27 ASSENTAMENTO DE TUBOS E CONEXÕES					
28 Assentamento de tubos e conexões em PVC- DN 50 mm	m	499.71			
29 Assentamento de tubos e conexões em PVC- DN 100 mm	m	100.41			
30 Assentamento de tubos e conexões em DEFF DN 150 mm	m	35.11			
31 FORNECIMENTO DE MATERIAL					
32 ADAPTADOR JE PVCxPvc 150	un.	1			
33 REDUÇÃO JE PVC 150x100	un.	1			
34 CURVA BB JE 22.5° PVC DN 50 mm	un.	1			
35 TÊ BBB JE RD 150x50 PVC DN 150 mm	un.	1			
36 CAP PVC 50 mm	un.	2			
37 TÊ BBB JE PVC DN 50 mm	un.	1			
38 REDUÇÃO JE PVC 100x50	un.	1			
39 CURVA BB JE 22.5° PVC DN 100 mm	un.	1			
40 TÊ BBB JE PVC DN 100 mm	un.	1			
41 CURVA PB JE 90° PVC DN 50 mm	un.	1			
42 Tubo PVC- DN 50 mm	m	524.7			
43 Quant. de Tubo PVC- DN 50 mm L = 6m	un.	88			
44 Tubo PVC- DN 100 mm	m	105.43			
45 Quant. de Tubo PVC- DN 100 mm L = 6m	un.	18			
46 Tubo DEFF DN 150 mm	m	36.87			
47 Quant. de Tubo DEFF DN 150 mm L = 6m	un.	7			

Ilustración 49. Plantilla en Excel de Cuantificación de la red de abastecimiento agua.

El Módulo UFC2 permite dos tipos de captación de agua: la **Estación de Bombeo** y la captación mediante **Pozo profundo**.

La captación por **Estación de bombeo**, donde la **captación es superficial**, debe tener un nivel mínimo de agua en la fuente (**N.A. mínimo**).

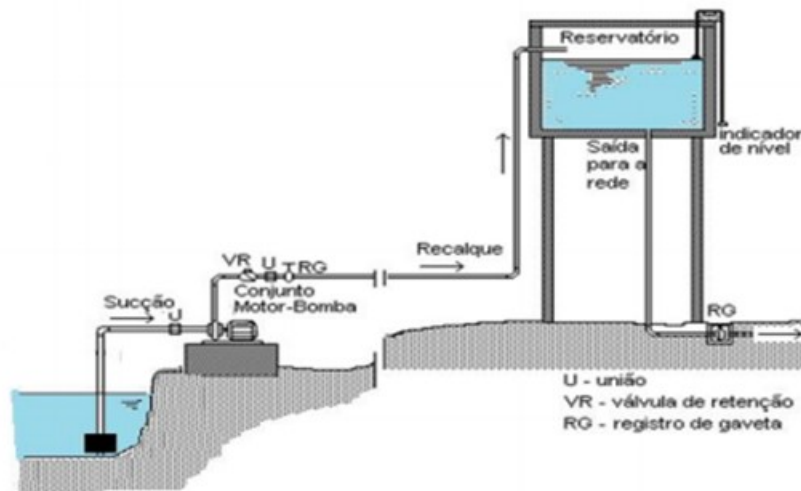


Ilustración 50. Estación de bombeo.

Para colocar la estación de bombeo se requiere insertar la siguiente información:

- Nivel de agua de la Fuente o tanque (m).
- Diferencia entre la elevación de la bomba y el N.A. del manantial (m).
- Número de horas de funcionamiento de la bomba.
- Número de bombas en paralelo.
- Material de los tubos de succión.
- Coeficiente de pérdida de carga Localizada (ΣK_L).
- Longitud de las tuberías de succión de (m). Material de la tubería de impulsión.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

- Fórmula Bresse: $D = k \sqrt{Q}$
- Nombre de la fuente o tanque
- Tanque de Destino.

Introducidos los datos necesarios se dimensiona la red y el programa calcula: Gasto de conducción (L/S), diámetro nominal de la tubería de succión y de impulsión, gasto mínimo y máximo para las curvas del sistema.

El gasto mínimo y máximo para las curvas del sistema se calculan con la siguiente formula:

$$Q_{Min} = 0.2 Q_{Aducción} \text{ e } Q_{Máx} = 1.5 Q_{Aducción} \quad (9)$$

Para seleccionar una bomba, se hace clic en el icono UFC5. A partir de los valores de Q y de H_{man} , se elige una bomba que cumpla con estos pre-requisitos. La UFC5 también le permite ver la línea piezométrica (Ilustración 51).

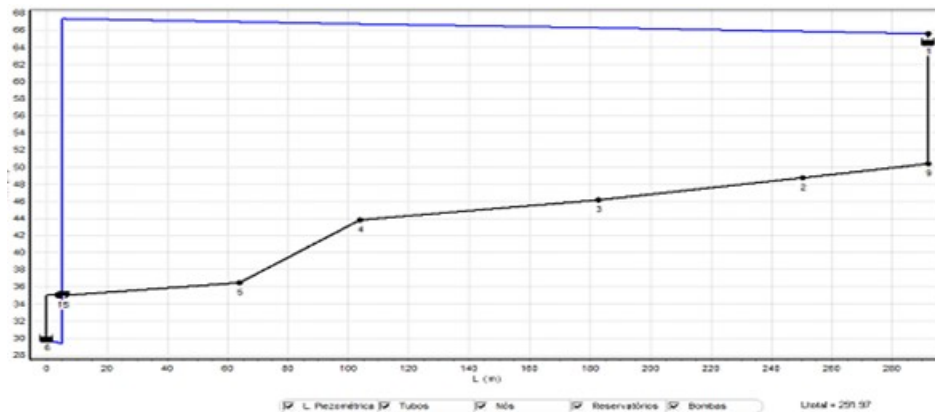


Ilustración 51. Perfil de la línea piezométrica del terreno.

Una vez seleccionada la bomba, se recurre a la simulación de la línea de conducción con la bomba seleccionada en EPANET.

El UFC6 permite la determinación de las presiones máximas y mínimas derivadas de los golpes de ariete causados por el paro abrupto de la bomba (falla en la energía eléctrica). Se puede verificar lo que sucede con el Golpe de Ariete a través de una animación.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

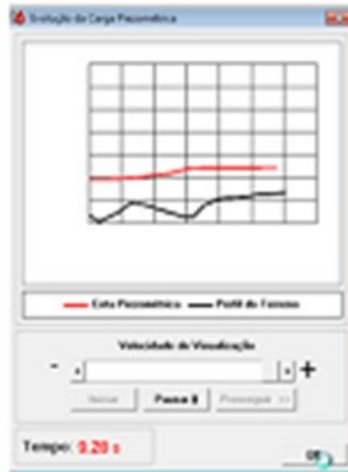


Ilustración 52. Animación para demostrar la evolución de carga piezométrica a través del tiempo.

Con la ayuda del programa UFC pueden agrupar todos los datos necesarios para construir una red en un archivo gráfico (Ilustración 53), que es exportado, sencillo y rápido, al archivo de entrada para la simulación en EPANET a través del módulo UFC3 (Ilustración 54).

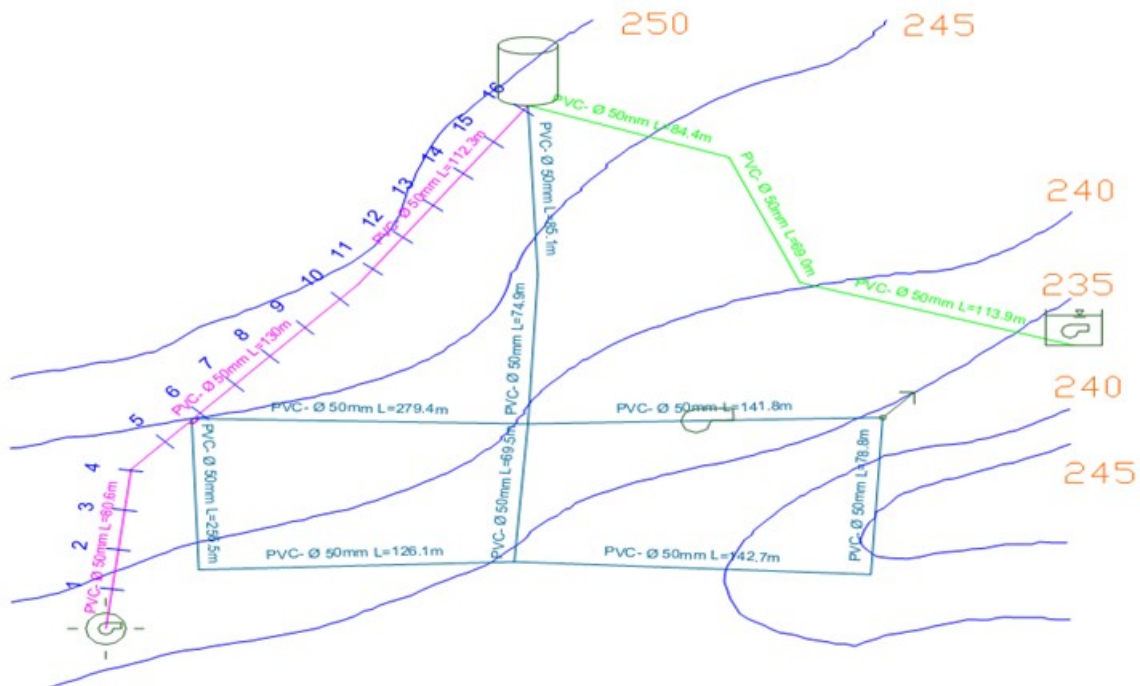


Ilustración 53. Expediente completo para transponer los datos.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

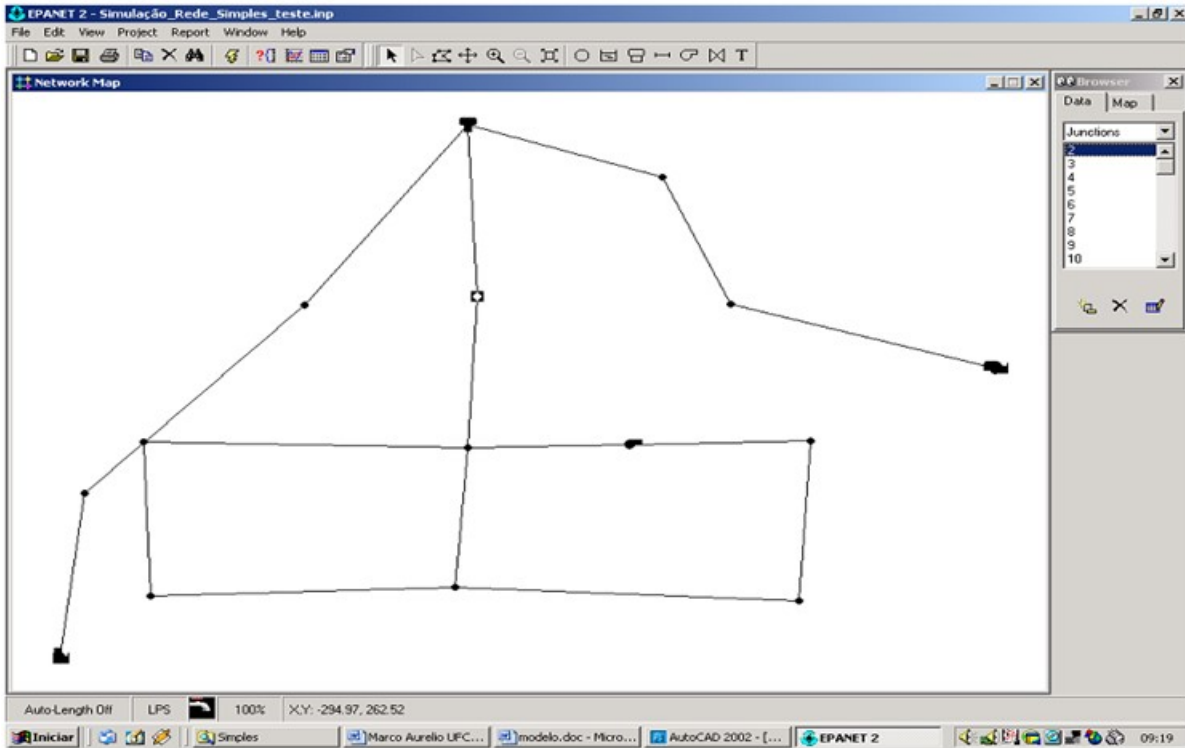


Ilustración 54. Creado desde el archivo gráfico en simulación del Modelo en EPANET.

Con el objeto de difundir en México el sistema UFC se tradujo en español su manual de UFC y se realizó un curso en el IMTA sobre este sistema, para lo cual se invitó de Brasil su principal creador, el Dr. Marco Aurelio Holanda de Castro. Participaron en el curso 11 personas, del IMTA, la AMH y la Universidad Autónoma de Baja California. Se iniciaron los trámites de un convenio entre el IMTA y la UFC, que incluirá la comercialización de UFC en español por parte del IMTA.

6 PROGRAMACION DE UN SISTEMA BASADO EN EPANET CON VISUALIZACIÓN DE INFORMACION GEOGRAFICA (EPANET-IMTA)

6.1 Introducción

Actualmente los sistemas de información geográfica (SIG) son una gran herramienta para el desarrollo y mejora de la productividad en las empresas, que proveen de herramientas necesarias para la captura, organización, manipulación y uso de la información para resolver problemas complejos de planificación y gestión.

Cualquier información que se genere o sea objeto de estudio se debe integrar en un sistema de información geográfica, para mantenerlo actualizado y vigente, esto permitirá que en cualquier momento que se requiera realizar un análisis o planeación, tendremos variables adicionales para tomar decisiones con mayor certidumbre.

6.2 Conversión de código del motor de cálculo e interfaz de Epanet completo en Visual Basic NET{ XE "1.- Elaboración de Layout o tira marginal de planos." }

Se realizó la conversión del código del sistema Epanet, que originalmente está dividido en motor de cálculo (programado en ANSI C) y parte de interfaz gráfica (programada en Borland Delphi), a Visual Basic .Net, el cual es un lenguaje orientado a objetos. Al código convertido se agregó la interacción del módulo de cálculo con el manejo de capas de información geográfica.

La programación se realizó implementando clases para cada uno de los elementos que conforman la red de agua potable y estas se utilizan en combinación con los módulos elaborados para el manejo bajo ambiente de sistemas de información geográfica, esto ayuda a que el usuario interactúe con la interfaz gráfica de una forma sencilla y amigable.

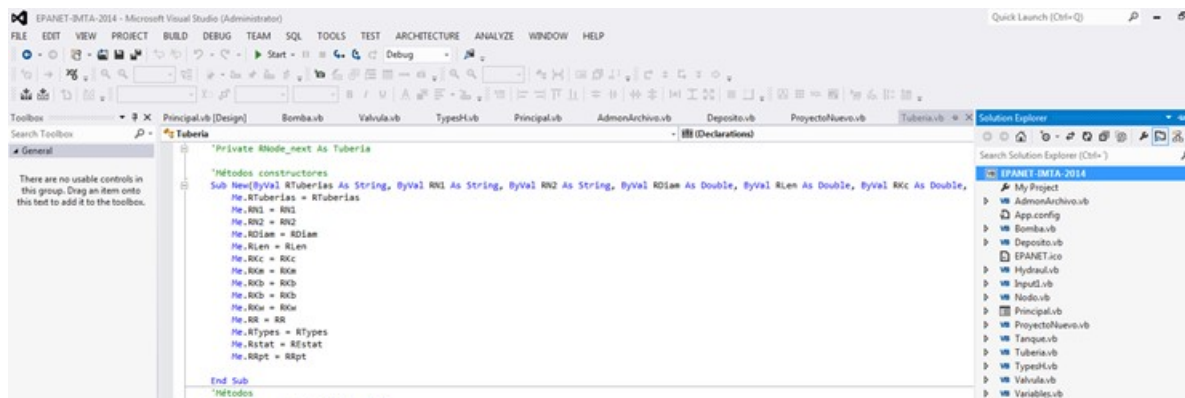


Ilustración 55. Pantalla de código transformado a Visual Basic .NET.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

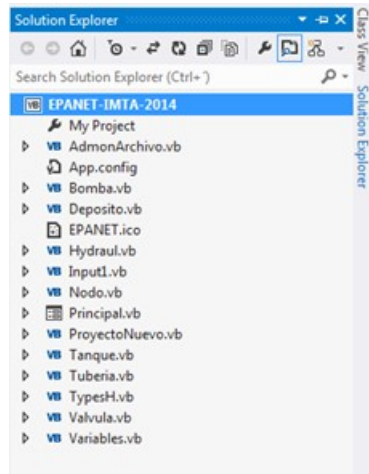


Ilustración 56. Módulos y clases que componen el sistema

6.3 Interfaz Gráfica mediante plataforma de Sistema de Información Geográfica

En el sistema EPANET se realiza el trazo de la red de agua potable en coordenadas arbitrarias y sobre imágenes sin georreferenciar, en esta nueva versión de EPANET-IMTA se programó un módulo utilizando el control activex gis llamado Mapwingis.ocx, el cual se utiliza para integrar en la aplicación de escritorio la funcionalidad de Sistemas de Información Geográfica y cartografía para cualquier aplicación basada en sistemas Windows. Mediante este componente se puede realizar el trazado de la red sobre los servicios de imágenes de satélite, como los de Google y Bing, lo que permite tener el trazo de forma georreferenciada y además brinda la ventaja de agregar capas de la planimetría en formato shape, que permite la representación vectorial de los elementos que integran la red de agua potable con todas sus características.

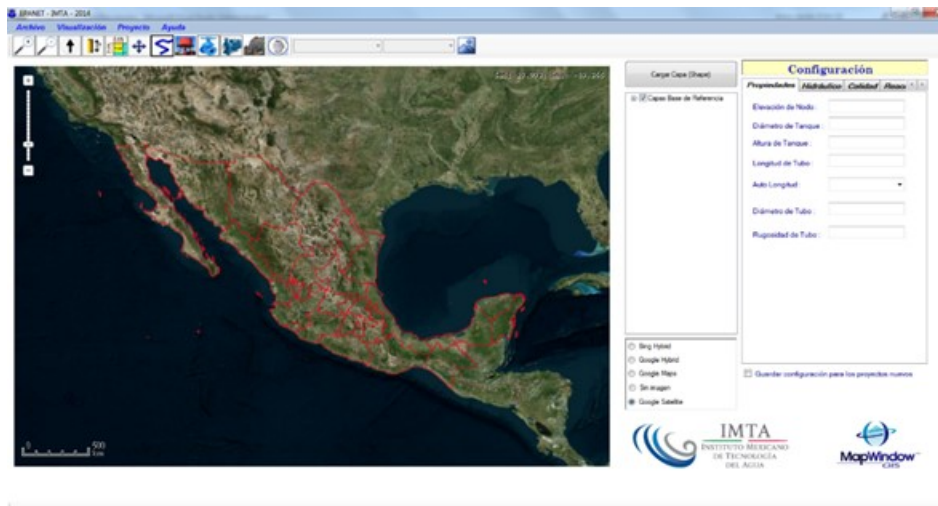


Ilustración 57. El sistema EPANET-IMTA.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

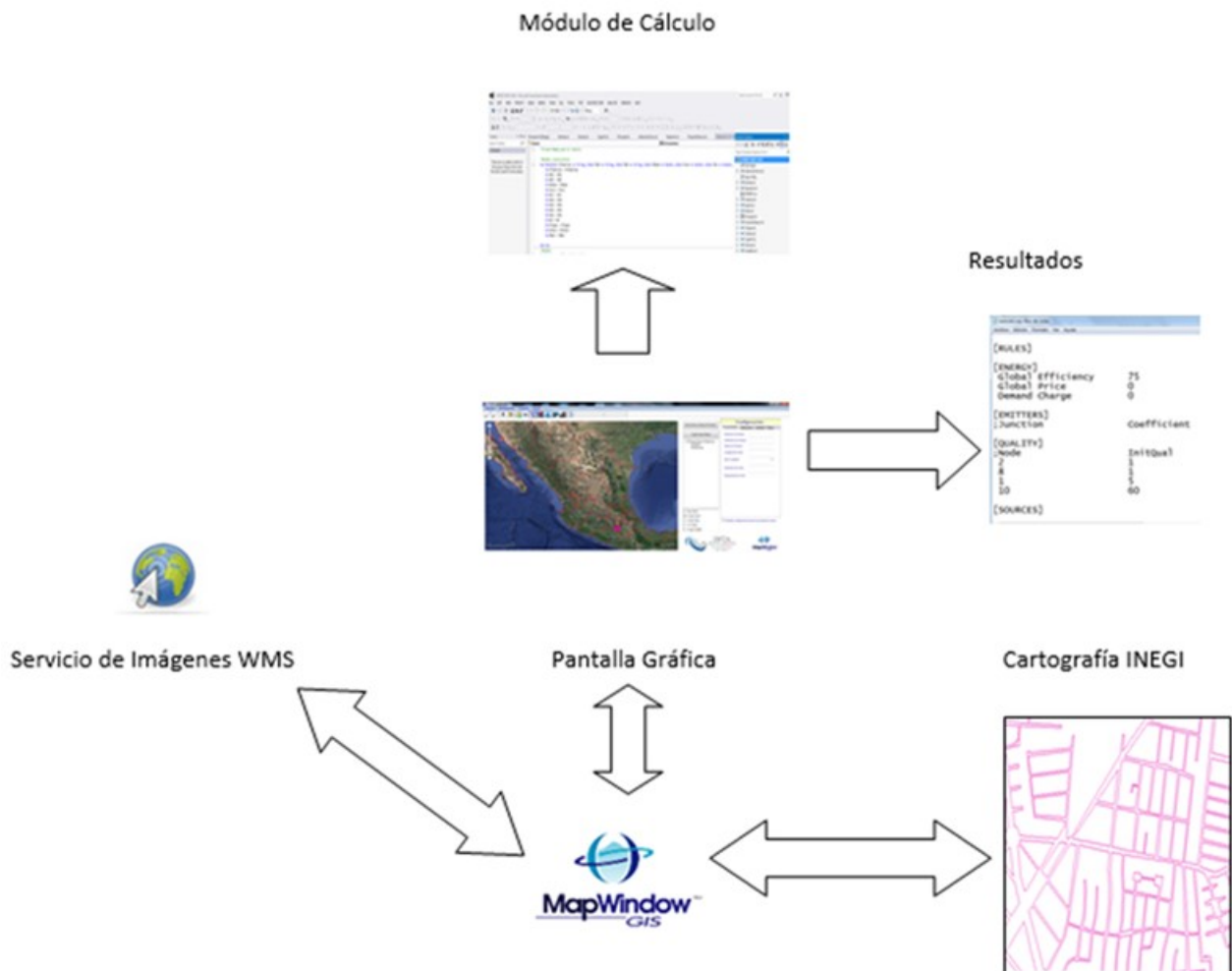


Ilustración 58. Esquema general del sistema EPANET-IMTA.

6.4 Agregar capas de planimetría en formato shape en el proyecto

En EPANET-IMTA se programó un módulo para integrar la funcionalidad de agregar capas de la planimetría de todo el territorio nacional, para tener una referencia geográfica en el trazado de la red de agua potable. Dicha información cartográfica es publicada por el Instituto Nacional de Información Estadística y Geográfica de forma gratuita a través de su sitio en Internet en formato shape, la cual por origen se encuentra en la proyección conforme cónica de Lambert, o, más sencillamente, proyección de Lambert (CCL), para la integración de dicha capa se realizó la transformación al sistema de coordenadas geográficas, que es un sistema de referencia que utiliza dos coordenadas angulares, latitud y longitud.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

En la interfaz del sistema tenemos el botón de “Cargar Capa (shape)” para la selección de capas a insertar y un espacio para el manejo de visualización de las mismas, que brinda la posibilidad de visualizar u ocultar la capa seleccionada.

Es importante mencionar que la planimetría que se integra en el sistema solo considera las localidades urbanas, si se requiere utilizar la planimetría de las localidades rurales es necesario acceder al portal de INEGI para descargar los archivos shape correspondientes a estas localidades, y después convertir a coordenadas geográficas, las capas son sobrepuesta a la capa de imágenes de satélite.

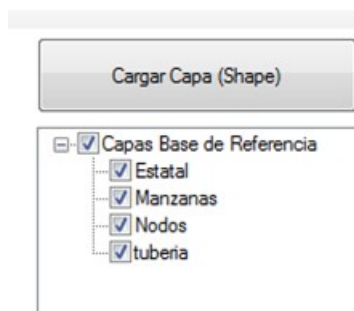


Ilustración 59. Botón para agregar la información de capas en formato shape y el espacio para el manejo de visualización de las mismas.

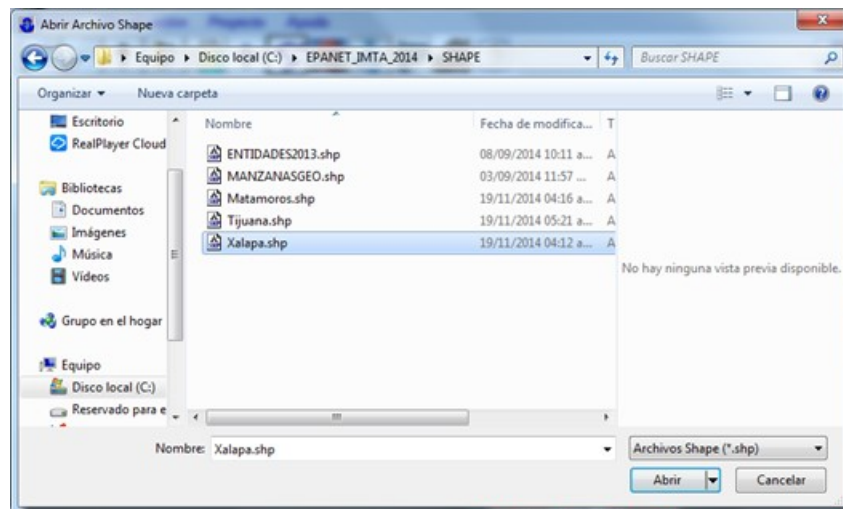


Ilustración 60. Cuadro de dialogo para agregar la información de las capas de la planimetría.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



Ilustración 61. Planimetría integrada al proyecto.

6.5 Conexión a servicios de imagen WMS

Un WMS (Web Mapping Service que se traduce como Servicio de Mapas Web) es un estándar para publicar cartografía en Internet cuyas especificaciones están recogidas en el Open Geospatial Consortium (OGC). Este servicio permite generar mapas de forma dinámica a partir de coordenadas geográficas en un formato de imagen como PNG, GIF o JPEG, facilitando con ello la construcción de mapas personalizados a partir de datos tomados de distintas fuentes.

Un servicio WMS se utiliza para consultar información cartográfica vía Internet. Su consulta puede realizarse a través de Sistemas de Información Geográfica (SIG) en equipos de escritorio o para la construcción de aplicaciones híbridas en WEB. En el sistema se realizó la programación de un módulo para realizar la conexión a servidores de imagen de satélite wms como son Bing Hybrid, Google Hybrid, Google Maps y Google Satélite, esto nos brinda la ventaja de reducir el error por desplazamiento o dimensión de los elementos que integran la red de agua potable. En caso de requerir proyectos en coordenadas arbitrarias, se tiene la opción de trabajar el proyecto sin imagen de referencia. El tener la capa de la planimetría de INEGI sobrepuesta a esta capa de imágenes de satélite nos ayuda a tener un trazo más preciso en la zona en que se esté trabajando.

La mayoría de los proyectos se encuentran en la proyección Universal Transversa de Mercator (UTM), para esto se programó un módulo para la conversión de proyección UTM a coordenadas geográficas para integrar estos proyectos de forma automática al sistema.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



Ilustración 62. Opciones de conexión a capas wms.



Ilustración 63. Capa wms de Bing Hybrid, con cartografía de INEGI cargada.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



Ilustración 64. Capa wms de Google Hybrid, con cartografía de INEGI cargada.

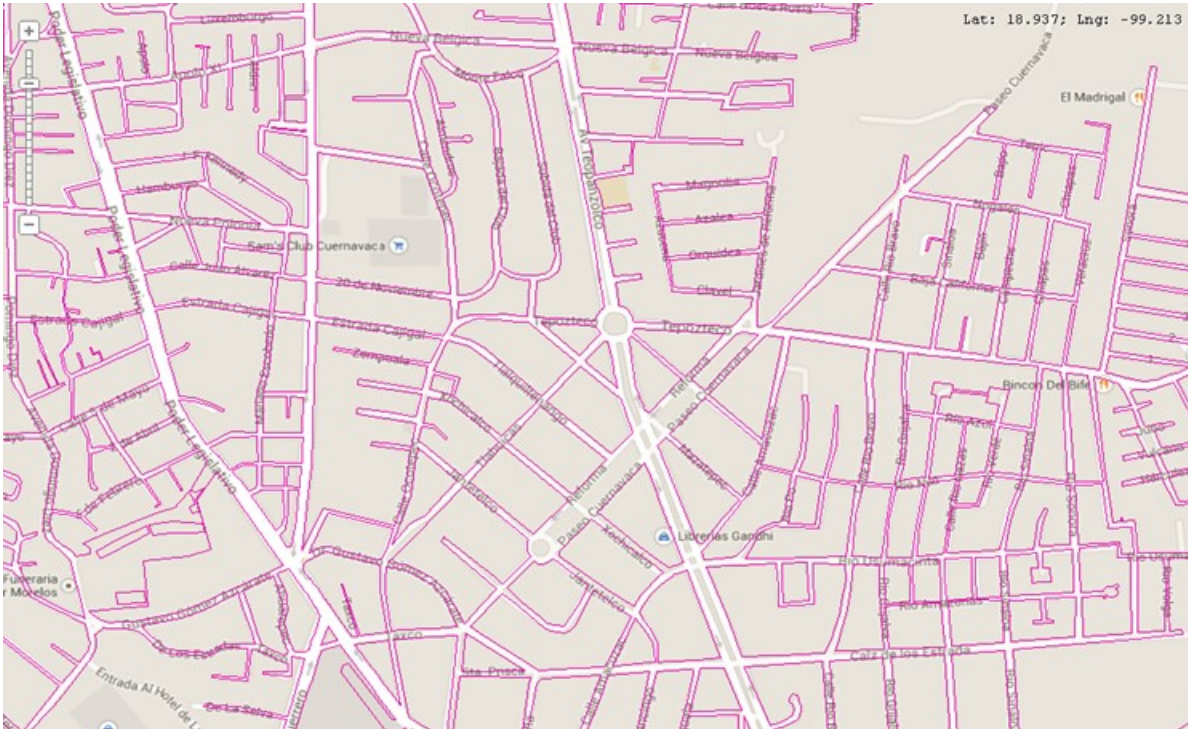


Ilustración 65. Capa wms de Google Hybrid, con cartografía de INEGI cargada.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



Ilustración 66. Capa wms de Google Satélite, con cartografía de INEGI cargada.

6.6 Trazo de Red de Agua Potable Georreferenciado

El trazado de la red de agua potable es una tarea que requiere de mucho cuidado ya que sus elementos contienen características diferentes, por lo tanto si no se ingresan los datos correctamente influirá en los resultados del análisis de la red. Para evitar al máximo este tipo de detalles se programó un módulo para realizar el trazado de la red sobre las capas de imagen de satélite wms y la planimetría de INEGI, esto de forma georreferenciada, cumpliendo con las especificaciones de los sistemas de información geográfica y con las normas técnicas emitidas por el INEGI en cuanto a la generación de proyectos geográficos por las unidades de estado, para esto se programaron módulos que alimentan la configuración de los datos que contienen los diferentes elementos de la red.

En el sistema se programó un módulo para el manejo de herramientas de visualización básica, como son alejar, acercar y desplazar, medir distancias y áreas, esto como apoyo durante el trazado de la red de agua potable.



Ilustración 67. Herramientas de visualización y medición de distancias y áreas.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

La programación de este módulo consideró incluir el desarrollo del trazo de los elementos de la red de agua potable mediante el apoyo de una barra de herramientas de los elementos que integran la red de agua potable.

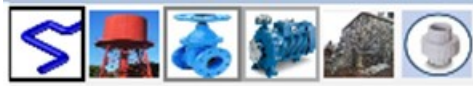


Ilustración 68. Barra de Herramientas de elementos de la red de agua potable.

Para el trazo se desarrolló un módulo para la inserción de los elementos mediante el uso de menús desplegables, que contienen los datos de configuración de acuerdo al elemento a insertar, utilizando catálogos de cada elemento para evitar al menos posible introducir datos erróneos.

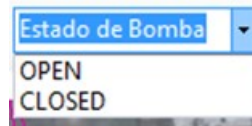


Ilustración 69. Configuración de estado de la bomba.

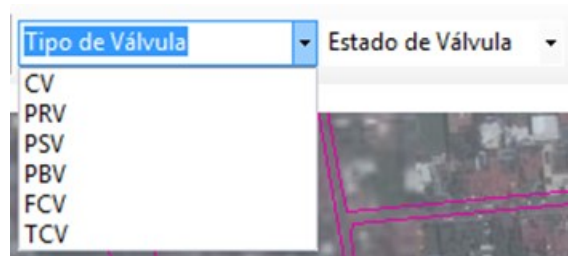


Ilustración 70. Configuración de tipo y estado de la válvula.

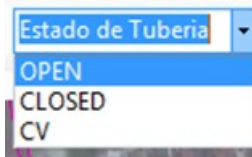


Ilustración 71. Configuración de estado de tubería.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



Ilustración 72. Inserción de elementos de la red.

Se desarrolló la integración al sistema de un panel con la configuración general del proyecto, como son propiedades generales, hidráulicas, de calidad, de reacciones y de tiempos, para su configuración personalizada.

Configuración	
Propiedades	Hidráulico
Unidades de Flujo :	CMD
Pérdida de Carga :	DW
Hidráulica :	SCRATCH
Desequilibrado :	CONTINUE
Viscosidad :	
Ensayos :	
Exactitud :	
Exponente Emisor :	
Comprobar Frecuencia :	
Validación Máxima :	
Límite de Humedad :	
Especificar Gravedad :	

Guardar configuración para los proyectos nuevos

Ilustración 73. Panel de configuración general del proyecto.

6.7 Importar proyectos EPANET (inp)

Se desarrolló un modulo para que el sistema proporcione la opción de importar proyectos creados en EPANET. Este modulo incluyó la programación para la lectura de los archivos *.inp creados en EPANET y la programación para realizar el trazo de la red de forma automática en que se obtiene la configuración contenida en el proyecto fuente. Se implementó también programación para realizar la proyección de los elementos que por origen esten en coordenadas UTM, passandolas a coordenadas geograficas, que se utilizan en las capas de imágenes de satellite.

Para importar el proyecto solo debemos abrir el archivo creado en EPANET con extensión inp desde el menu Archivo, eligiendo la opción Importar Proyecto Epanet (inp).



Ilustración 74. Menu importar proyecto Epanet.

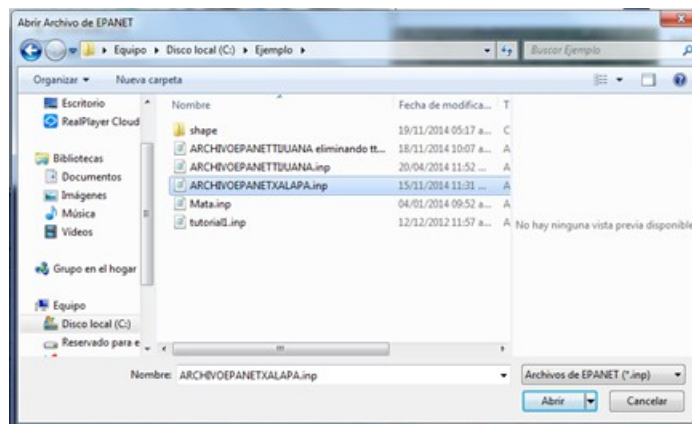
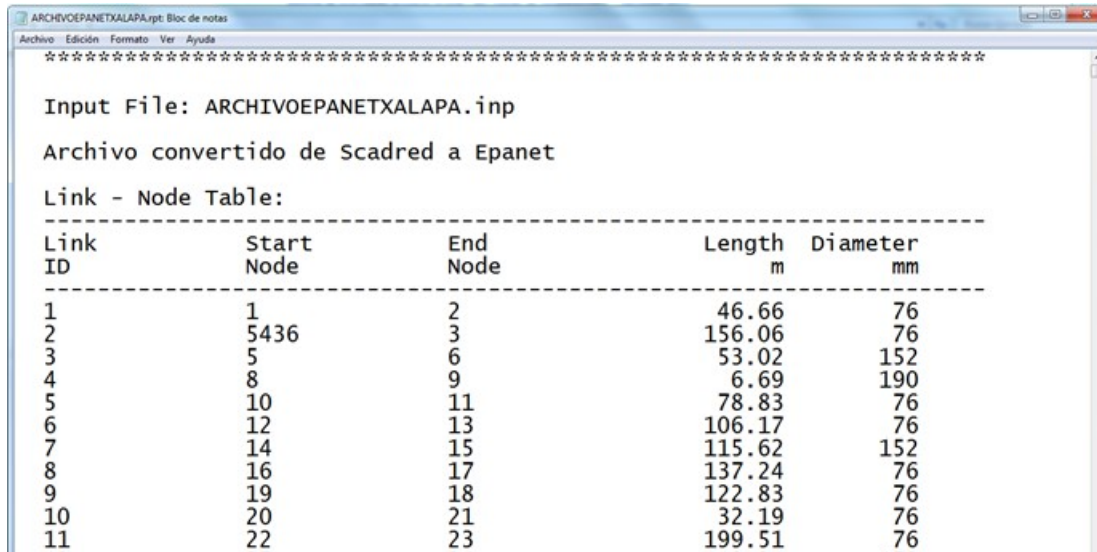


Ilustración 75. Cuadro de dialogo para seleccionar el archivo de proyecto inp.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



Input File: ARCHIVOEPANETXALAPA.inp
 Archivo convertido de Scadred a Epanet
 Link - Node Table:

Link ID	Start Node	End Node	Length m	Diameter mm
1	1	2	46.66	76
2	5436	3	156.06	76
3	5	6	53.02	152
4	8	9	6.69	190
5	10	11	78.83	76
6	12	13	106.17	76
7	14	15	115.62	152
8	16	17	137.24	76
9	19	18	122.83	76
10	20	21	32.19	76
11	22	23	199.51	76

Ilustración 76. Archivo inp creado en SCADRED.

Los proyectos creados en EPANET pueden tener dos características importantes a considerar, la primera es que fueron generados con coordenadas arbitrarias y la segunda que se generen en la proyección UTM. Para estos casos el sistema al momento de importarnos presenta la opción de seleccionar la forma que contiene la información del proyecto. En el caso de seleccionar coordenadas UTM, debemos proporcionar la zona UTM en que se encuentra la zona de estudio, para el caso de coordenadas geográficas y coordenadas arbitrarias solo seleccionamos la opción y damos clic en el botón de Aceptar. Para estos casos se incluyó en la programación el manejo de forma interactiva.

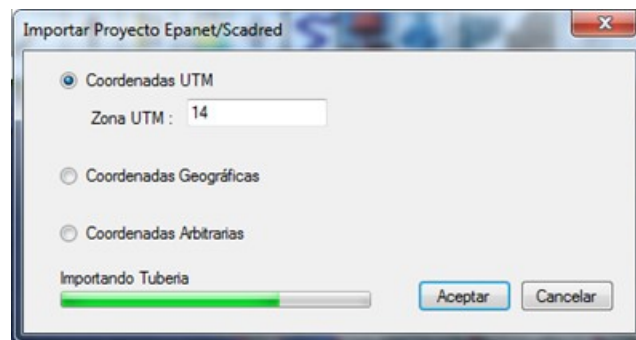


Ilustración 77. Cuadro de dialogo del menu de importar.

La red es trazada de forma automática. Si el proyecto fue cargado en coordenadas UTM el sistema realiza la conversión a coordenadas geográficas de cada uno de los elementos que componen la red de agua potable, y así el proyecto se integra con las capas de imágenes de satélite y la planimetría de INEGI.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

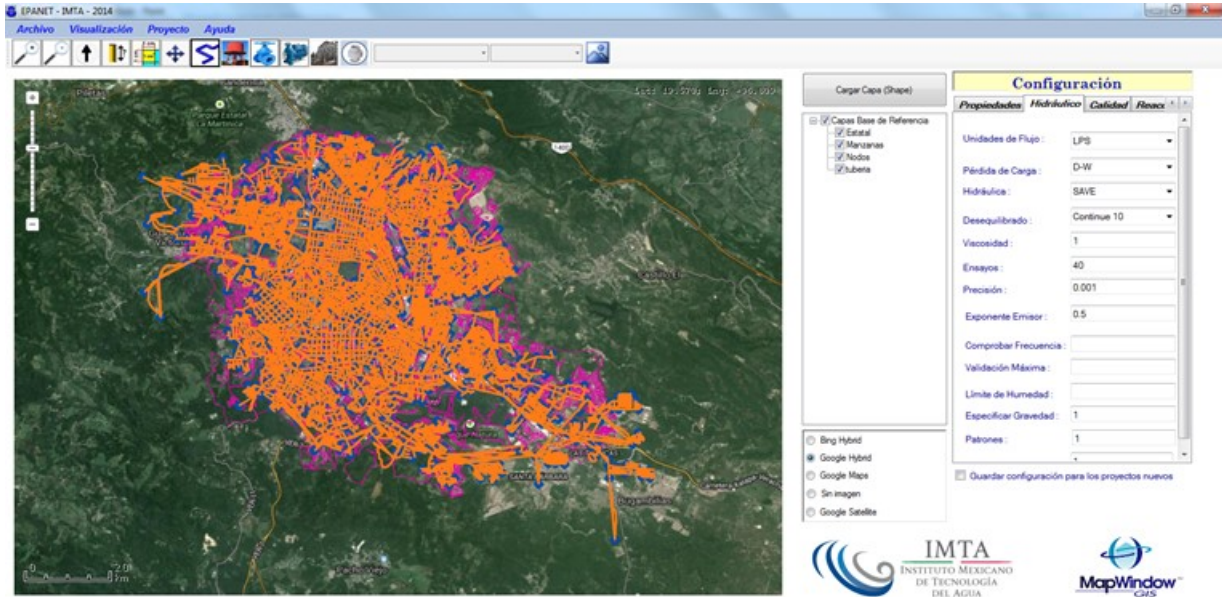


Ilustración 78. Red en formato EPANET importada a EPANET-IMTA

Si comparamos el mismo proyecto, en este caso es el correspondiente a la ciudad de Xalapa Veracruz, creado en EPANET 2.0, y el importado en EPANET-IMTA, este último nos ofrece opciones de referencia geográfica, útiles para el análisis de la zona de estudio.

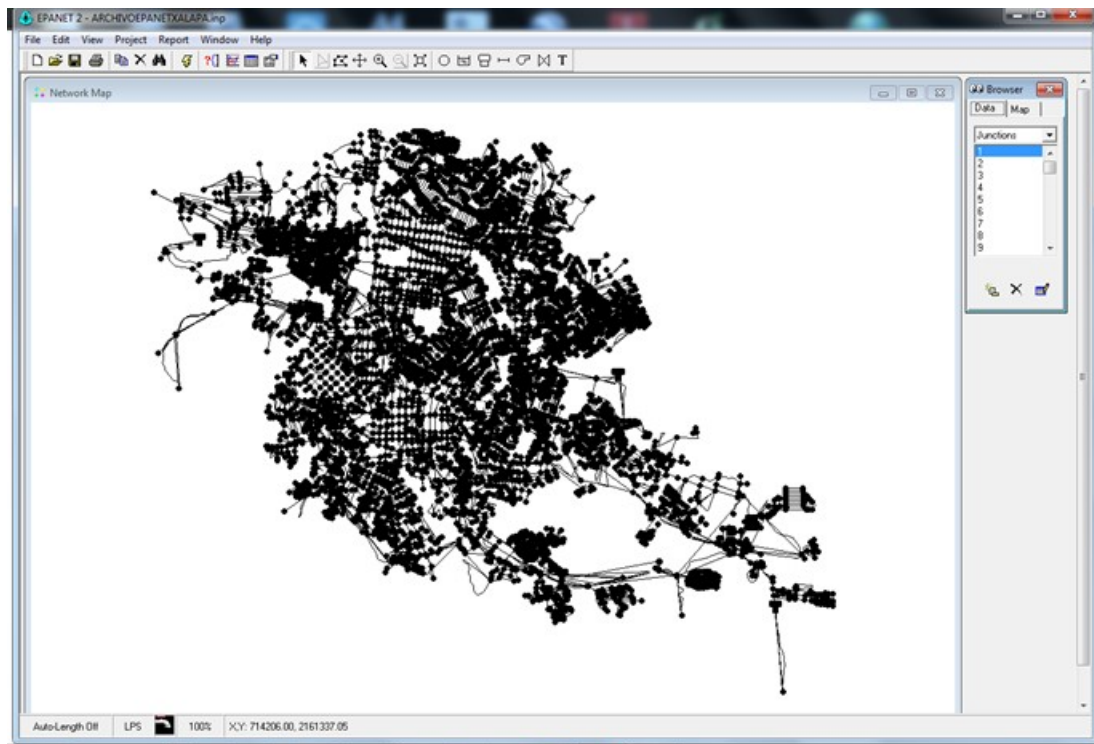


Ilustración 79. Proyecto creado en EPANET 2.0

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

Los datos de configuración del proyecto importado se agregan de forma automática al nuevo proyecto EPANET-IMTA y se almacenan en un archivo de tabla dbf, con el cual podemos realizar relaciones con los elementos de la red en los diferentes sistemas de información geográfica.

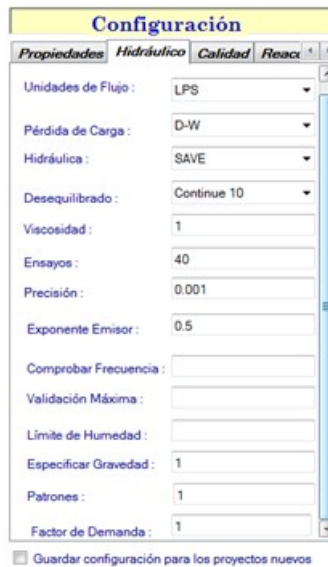


Ilustración 80. Datos de configuración importados.

Se realizó la programación del módulo para la ejecución de análisis de la red de agua potable, basado en el código compilado de EPANET 2.0 en modo consola, el cual obtiene los resultados en un archivo de texto con extensión rpt, misma característica utilizada en el EPANET 2.0.



Ilustración 81. Menu de proyecto para ejecutar el análisis de la red de agua potable.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

ARCHIVOEPANETXALAPA.rpt: Bloc de notas

Page 388 Archivo convertido de Scadred a Epanet

Link Results: (continued)

Link ID	Flow LPS	Velocity m/s	Unit Headloss m/km	Status
941	-0.23	0.05	0.07	Open
942	0.01	0.00	0.00	Open
943	0.01	0.00	0.00	Open
944	0.01	0.00	0.00	Open
945	0.01	0.00	0.00	Open
946	0.01	0.00	0.00	Open
947	0.01	0.00	0.03	Open
948	0.02	0.00	0.00	Open
949	0.01	0.00	0.00	Open
950	0.01	0.00	0.00	Open
951	0.01	0.00	0.00	Open
952	0.01	0.00	0.00	Open
953	0.01	0.00	0.00	Open
954	0.01	0.00	0.00	Open
955	0.10	0.02	0.02	Open

Ilustración 82. Archivo de resultado del análisis de la red de agua potable.

6.8 Características de EPANET-IMTA

En el sistema se implementó un menú principal conformado por 4 módulos:

- Archivo:
 - Abrir Proyecto Epanet-IMTA: Permite abrir un proyecto creado en la versión EPANET-IMTA
 - Proyecto Nuevo: Crea un proyecto nuevo con la estructura EPANET-IMTA
 - Guardar Proyecto: Guarda actualizaciones realizadas en el proyecto.
 - Importar Proyecto Epanet (inp): Importa archivos inp creados en EPANET 2.0 o SCADRED.



Ilustración 83. Menu Archivo.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

- Visualización:
 - Acercar: Permite realizar un acercamiento en el proyecto
 - Alejar: Permite el proceso de alejar en el proyecto
 - Mover: Permite desplazarse sobre el proyecto
 - Zoom Total: Realiza un acercamiento a la capa con mayor cobertura geográfica.

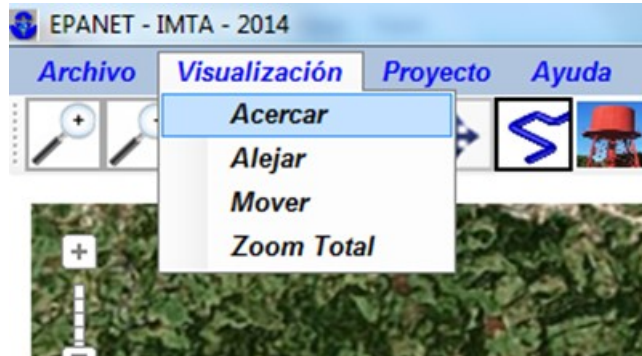


Ilustración 84. Menu Visualización.

En EPANET-IMTA se desarrolló un módulo para el análisis sobre el espacio geográfico en que se está trabajando, mediante las opciones de manejo de capas, tanto vectoriales como de imagen, como se muestra en las siguientes ilustraciones.

Dicho modulo permite interactuar de forma sencilla entre las capas vectoriales y las capas wms.

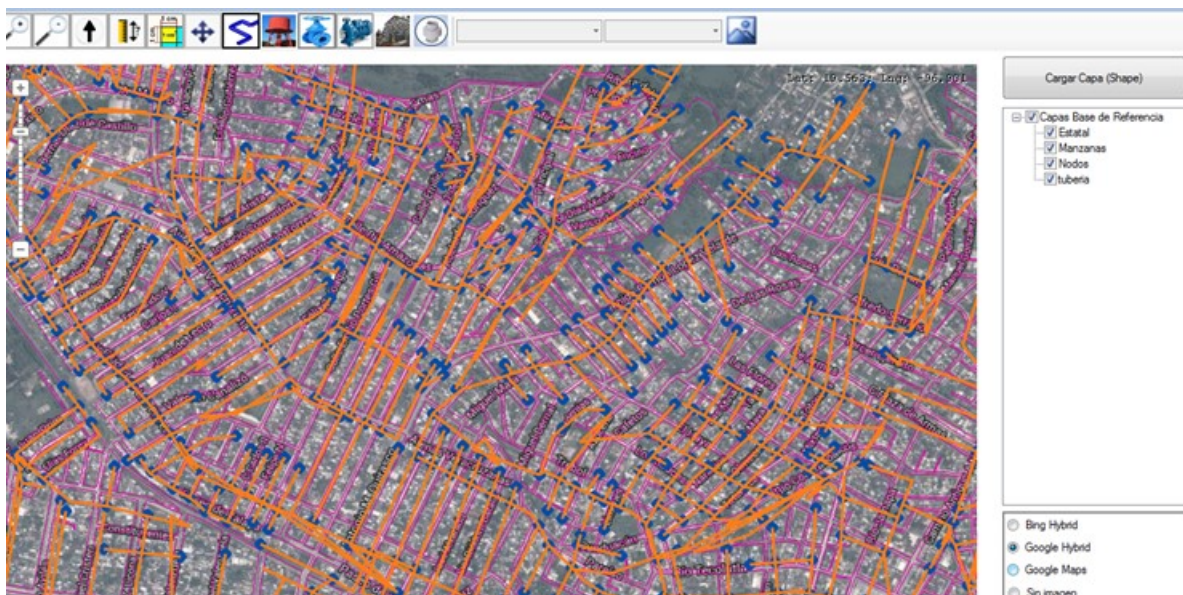


Ilustración 85. Proyecto con todas las capas vectoriales activas

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

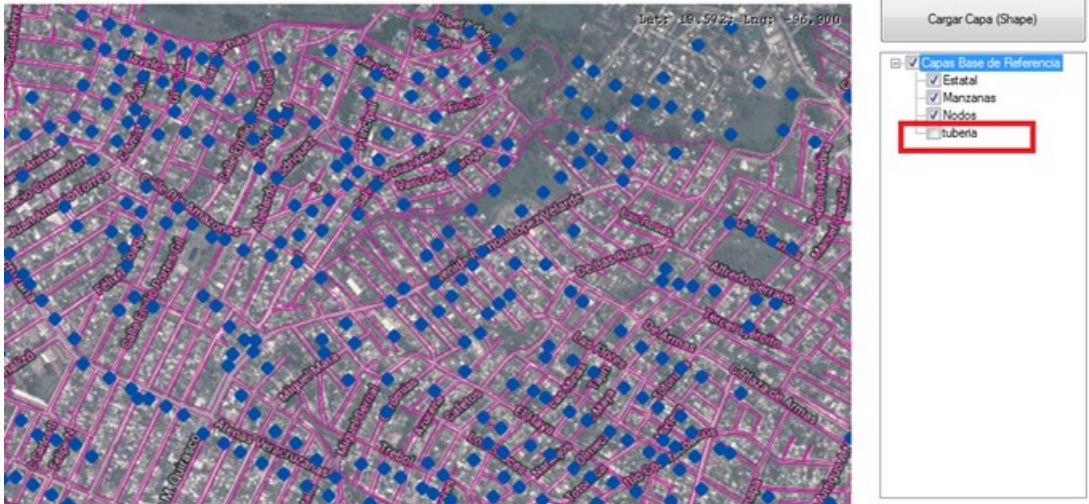


Ilustración 86. Apagado de la capa vectorial de tuberías.

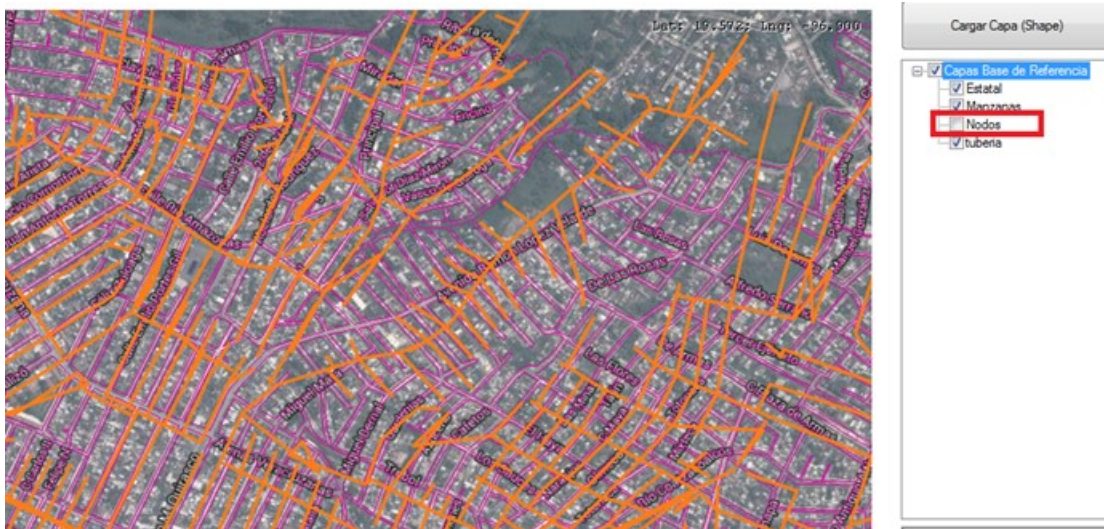


Ilustración 87. Apagado de la capa vectorial de elementos de tipo nodo.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

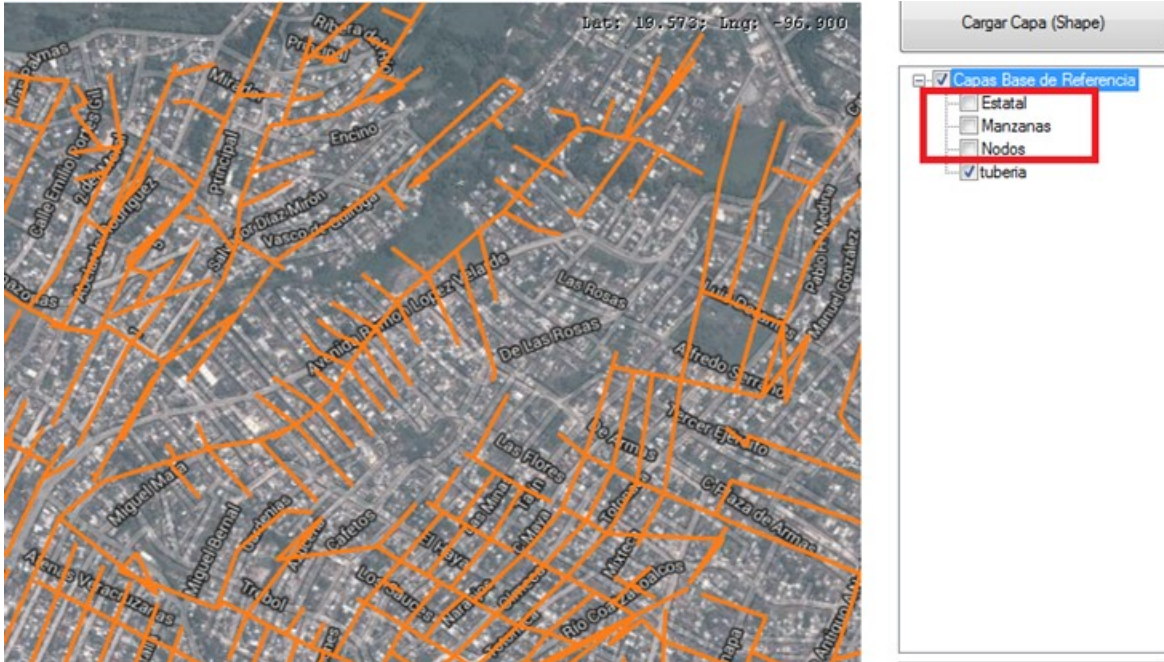


Ilustración 88. Apagadod de las capas vectoriales de el límite estatal, manzanas y nodos.

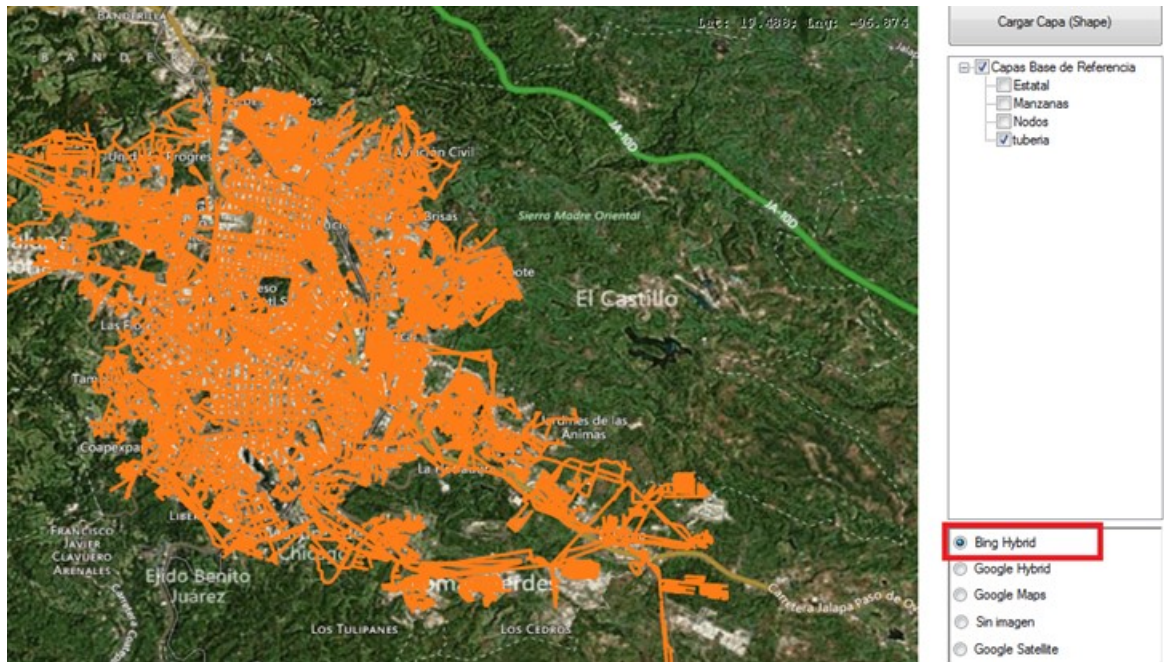


Ilustración 89. Visualización de la capa de tuberías con la capa de imagen de satélite de Bing Hybrid

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

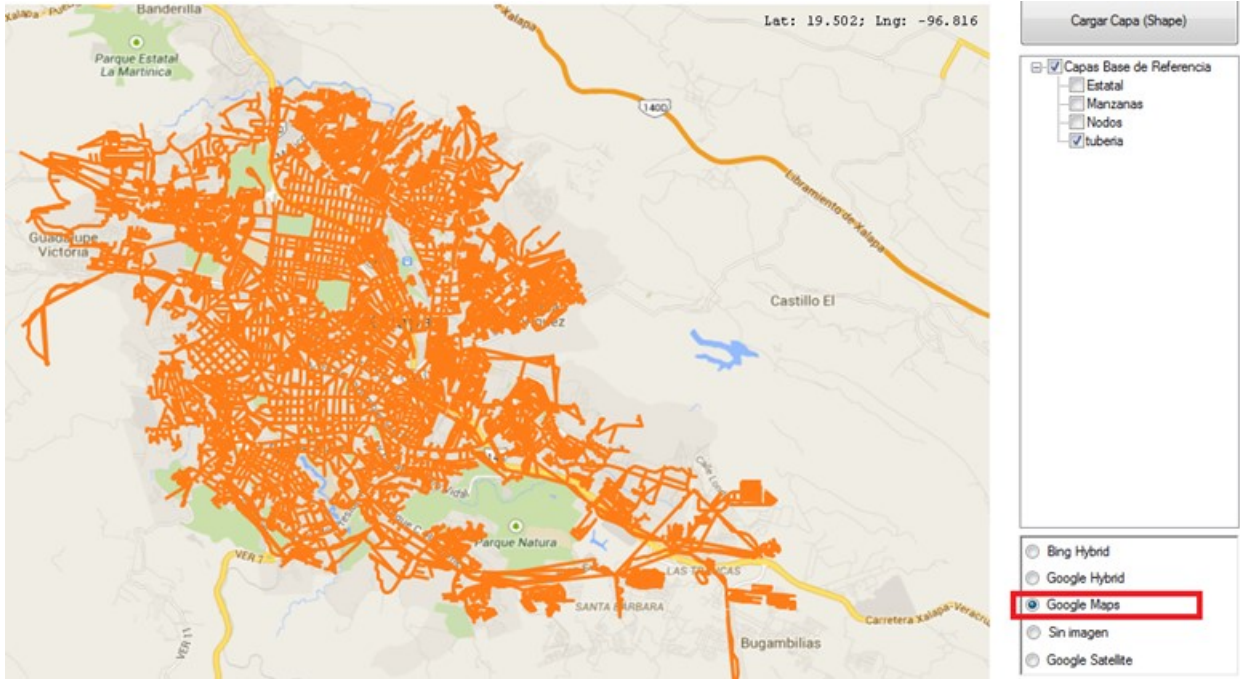


Ilustración 90. Visualización de la capa de tuberías con la capa de imagen de satélite de Google maps



Ilustración 91. Visualización de la capa de tuberías sin imagen de fondo

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

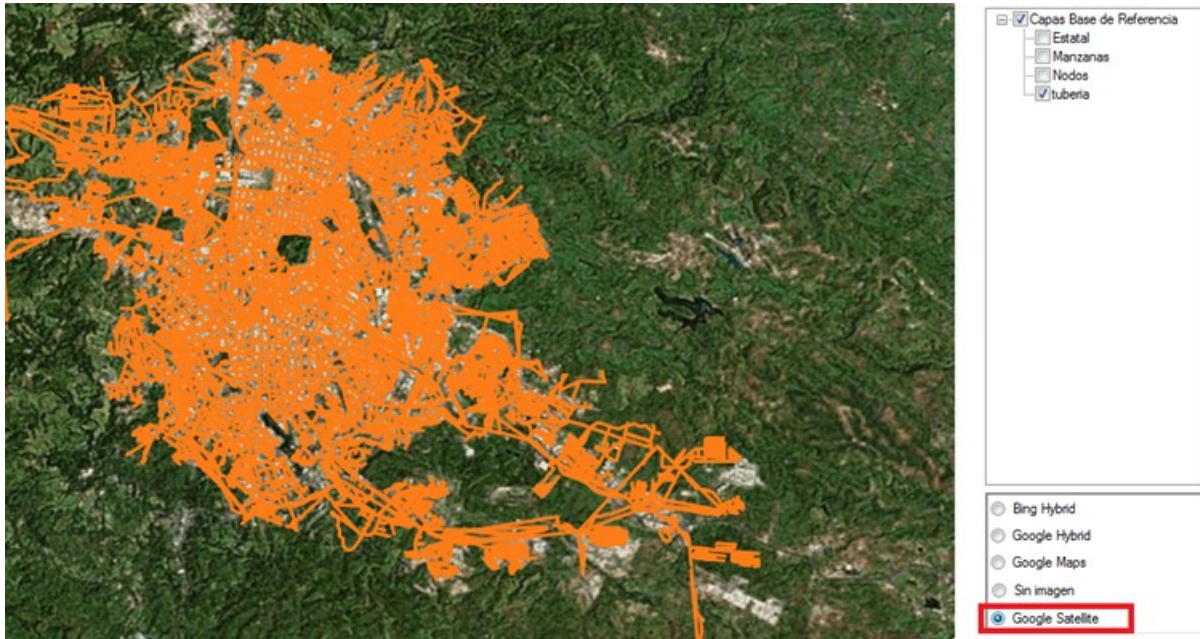


Ilustración 92. Visualización de la capa de tuberías con la capa de imagen de satélite de Google Satellite

El desarrollo de este sistema se realizó mediante programación orientada a objetos, con implementación de los módulos para el manejo de sistemas de información geográfica, trabajando algunos desarrollos de licencia libre y con la cartografía de la fuente oficial en el país, la del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

Un SIG es un conjunto de procedimientos que se aplican sobre una base de datos geoespacial, las capacidades que nos ofrece permiten crear diferentes escenarios del mundo real en un sistema. En esta relación, la ventaja que ofrece EPANET-IMTA al crear proyectos georreferenciados, es que la información resultante se puede visualizar y utilizar en otras plataformas de sistemas de información geográfica.

7 APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS INTEGRADOS CON INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN TIJUANA, B.C. Y EN XALAPA, VER.

A pesar de que manejan sistemas de información geográfica (ArcGis), los organismos operadores de agua de Xalapa, Ver. (CMAS) y de Tijuana, B.C. (CESPT) tienen el catastro de sus redes e instalaciones de agua potable en AutoCAD, y no tienen ningún modelo de sus sistemas de agua potable. Para mostrar la aplicación de los sistemas descritos anteriormente, para la modelación y diseño en estos dos sistemas de agua, se implementaron modelos de ellos, como se describe a continuación.

7.1 Pipelinet

Se usó el siguiente procedimiento:

1. La información de las tuberías de agua potable de los planos de AutoCAD se depuró de errores e información inexacta y se exportó al formato del sistema Scadred del IMTA, que corre dentro de AutoCAD.
2. Los datos de los tanques y bombas se introdujeron en forma manual, en el formato del sistema Scadred del IMTA.
3. Se realizaron corridas de prueba en el sistema Scadred del IMTA, con fines de validar el modelo, con lo que resultaron numerosos errores, debido en primer lugar de que el catastro de tuberías no se tenía con la precisión y detalle que requiere un modelo. Se corrigieron muchos de los errores, con la ayuda de personal de CMAS y de CESPT, aunque muchos errores no se pudieron corregir.
4. Los datos de los sistemas se convirtieron de AutoCAD/Scadred al formato *.inp de Epanet.
5. El archivo *.inp, de cada una de los dos sistemas, se importó en Pipelinet.

La CMAS tiene iniciado un proyecto de sectorización de su red de agua potable, para lo cual se requiere de un modelo hidráulico de la misma, por lo que con ellos se trabajó más en la depuración y complementación de su catastro para hacerlo apto para la modelación y se lograron corridas satisfactorias con el Epanet, que se usaron para analizar diferentes variantes de sectorización y de esta manera definir la sectorización. En el caso de la ciudad de Tijuana se llegó a demostrar el proceso de implementación del modelo de sus redes en ambiente de información geográfica, dejando el modelo preparado para que la CESPT lo utilice cuando lo considere necesario. La Ilustración 93 muestra la red de agua potable de Xalapa, Ver., la Ilustración 94 la misma red con resultados de una corrida con el modelo; y la Ilustración 95 la red de agua potable de Tijuana, B. C., todos en Pipelinet.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

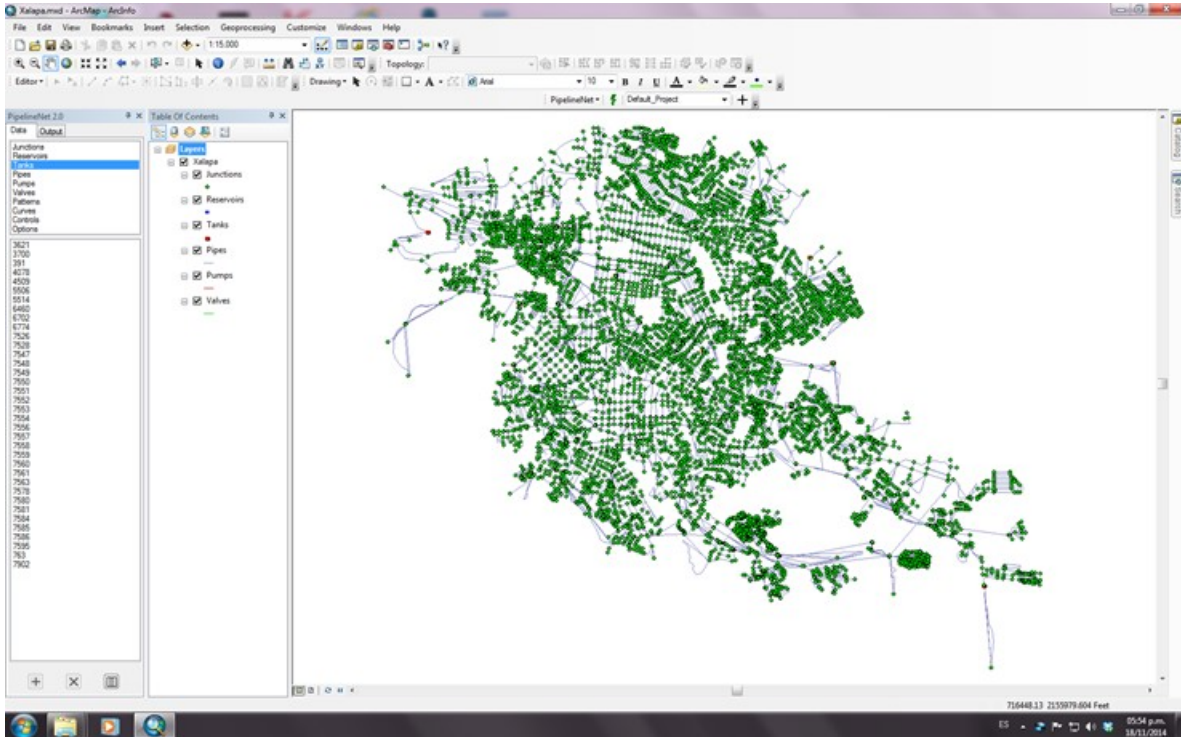


Ilustración 93. Red de agua potable de Xalapa, Ver. en Pipelineset

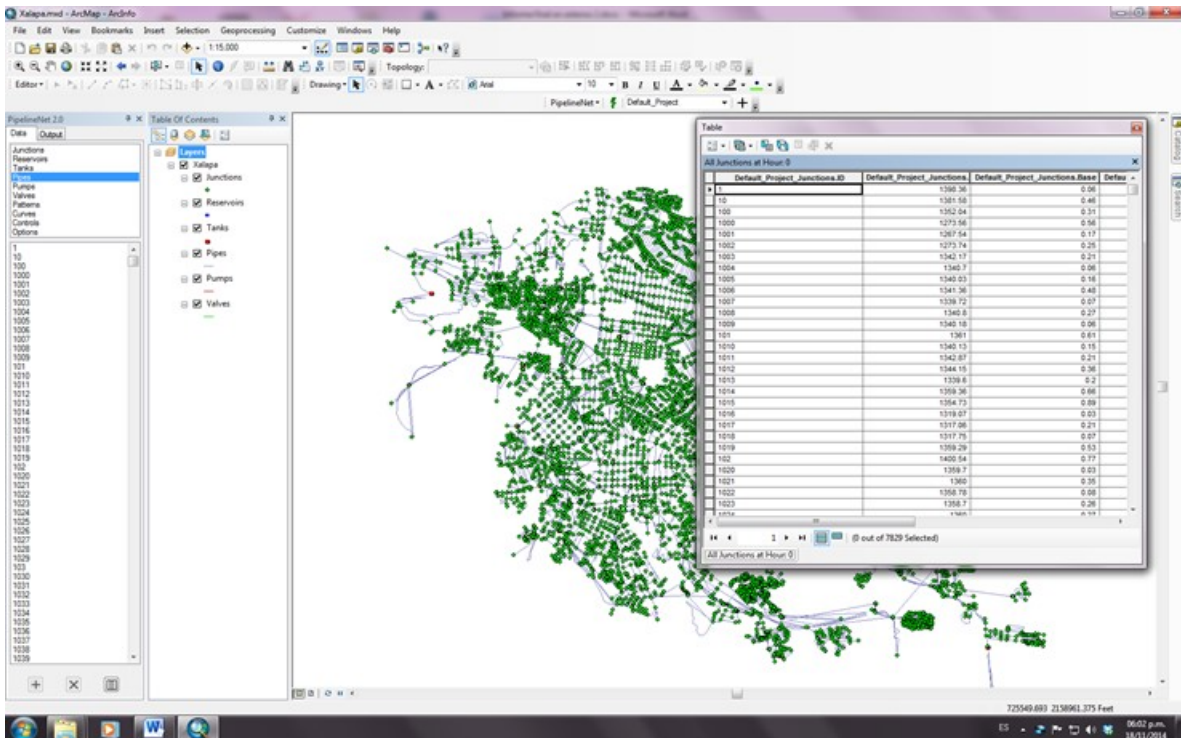


Ilustración 94. Red de agua potable de Xalapa, Ver. con resultados de una corrida del modelo hidráulico en Pipelineset

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

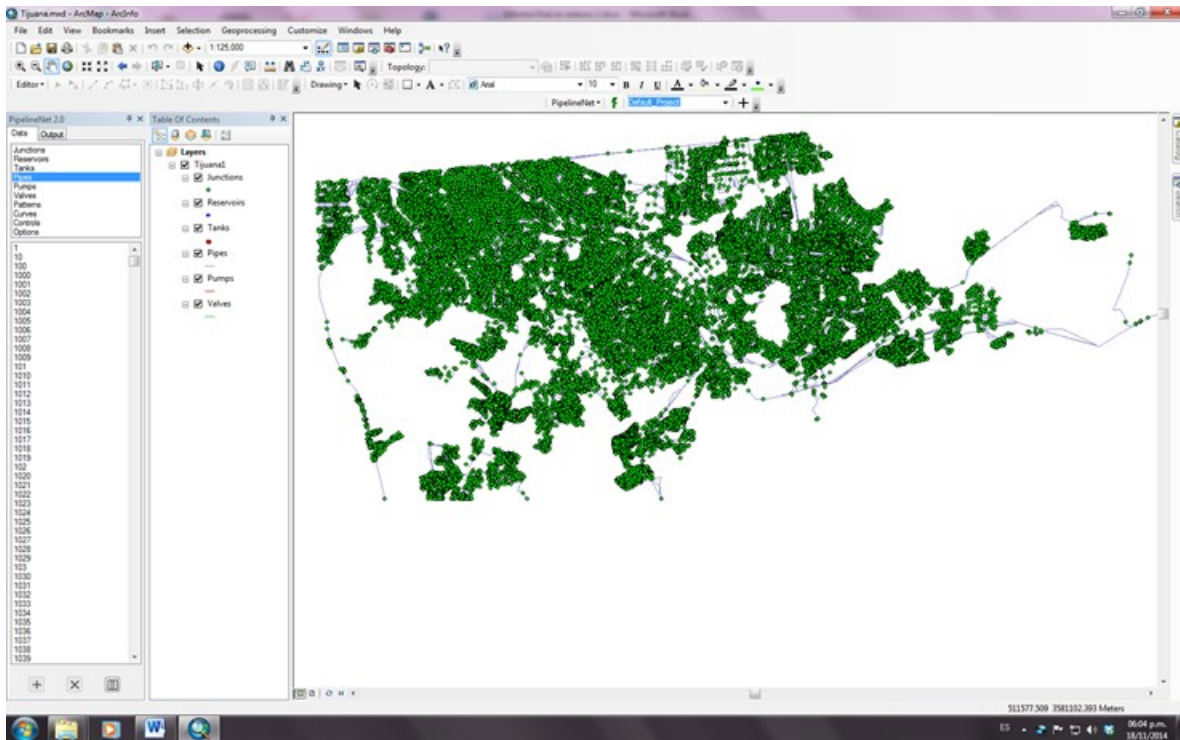


Ilustración 95. Red de agua potable de Tijuana, B.C. en Pipelinenet

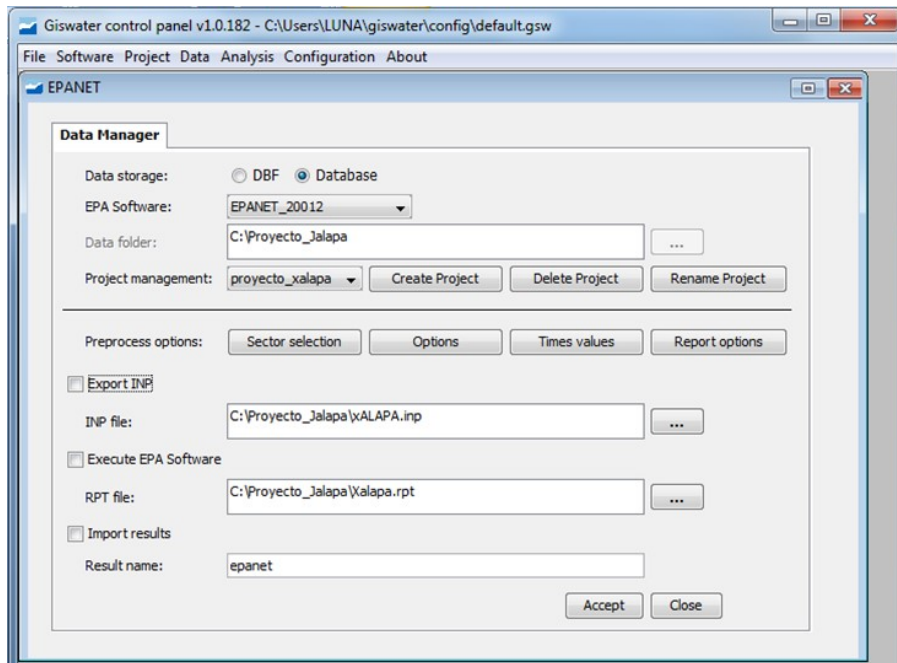
7.2 Giswater

El proceso de Giswater es diferente. Se genera primero el archivo shape con la estructura de las tablas de datos necesarios para Epanet, se traza o importa la red en el archivo shape con esta estructura, se exporta luego a Epanet, se corre Epanet y los resultados se importan al archivo shape de sistema de información geográfica. Puede usarse cualquier software de SIG, incluyendo SIGs gratuitos, tales como Quantum Gis. La Ilustración 96 muestra la red de agua potable de Xalapa, Ver. en Quantum Gis.

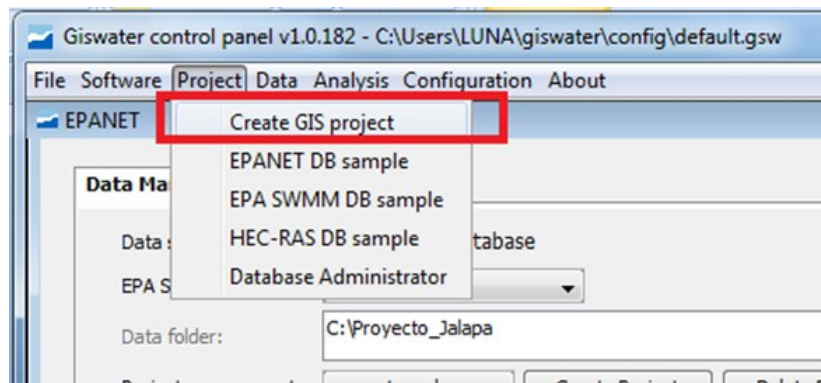
El proceso para generar un proyecto en GisWater con su configuración general es el siguiente:

- 1.- Seleccionar en el menú principal Software EPANET_2012
- 2.- Seleccionar Create Project, asignar nombre y ruta
3. - Configurar Sector selection, Options, Times values

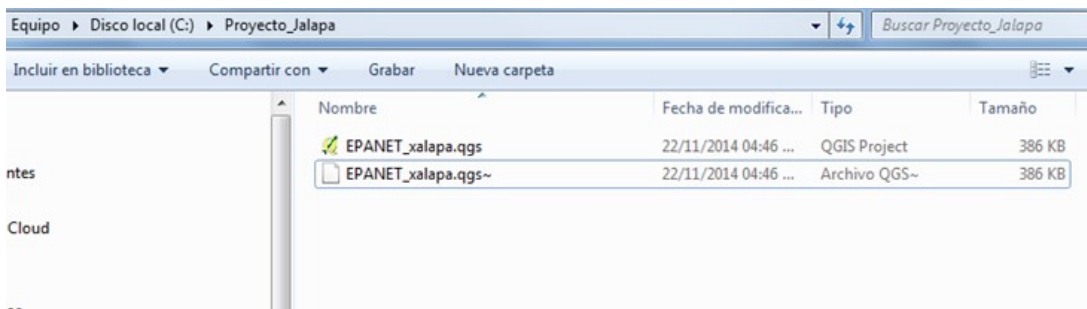
Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



4.- Generar proyecto gis mediante el menú Project y seleccionando Create GIS Project.



5.- Se genera la ruta del proyecto la geodatabase



Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

Para abrir el proyecto en QGIS hacer doble clic en EPANET_xalapa.qgs.

6.- Trazar la red manualmente porque no existe una opción de importación de los archivos inp.

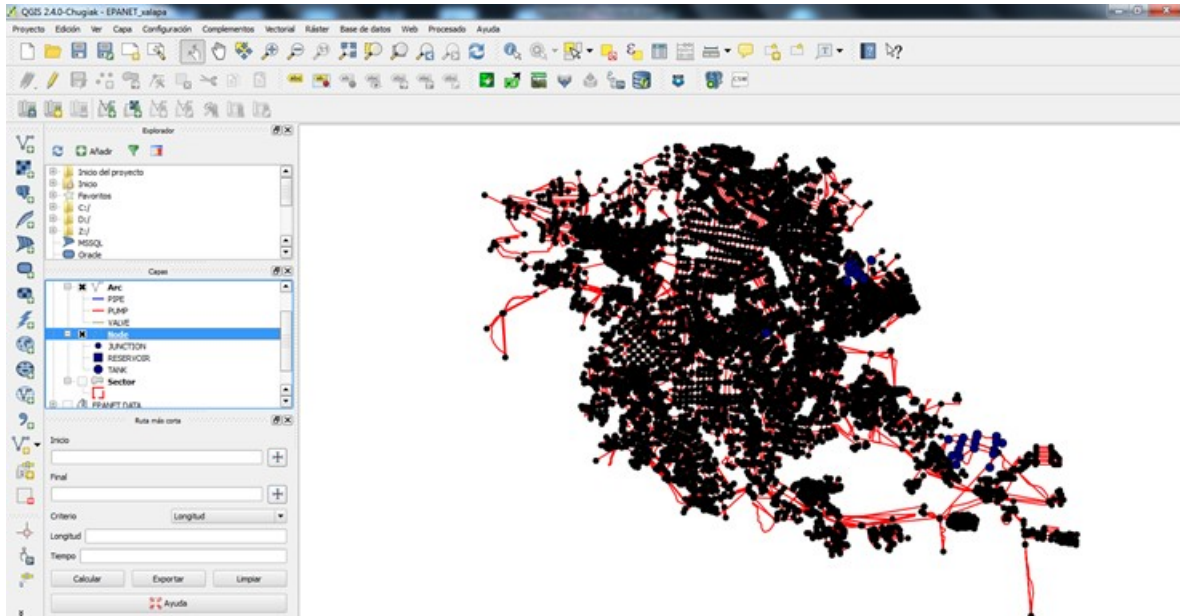


Ilustración 96. Red de agua potable de Tijuana, B.C. en Giswater

7.3 Plex.Earth

El propósito de Plex.Earth es visualizar los diseños en AutoCAD sobre mapas o imágenes tomadas de servidores de Internet en línea, tales como Google Maps, Google Earth, Bing, u otros. Las Ilustraciones 97 y 98 muestran una parte de la red de agua potable de Tijuana, B. C. sobre imagen de Google Earth obtenida de Internet en línea por medio de Plex.Earth.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

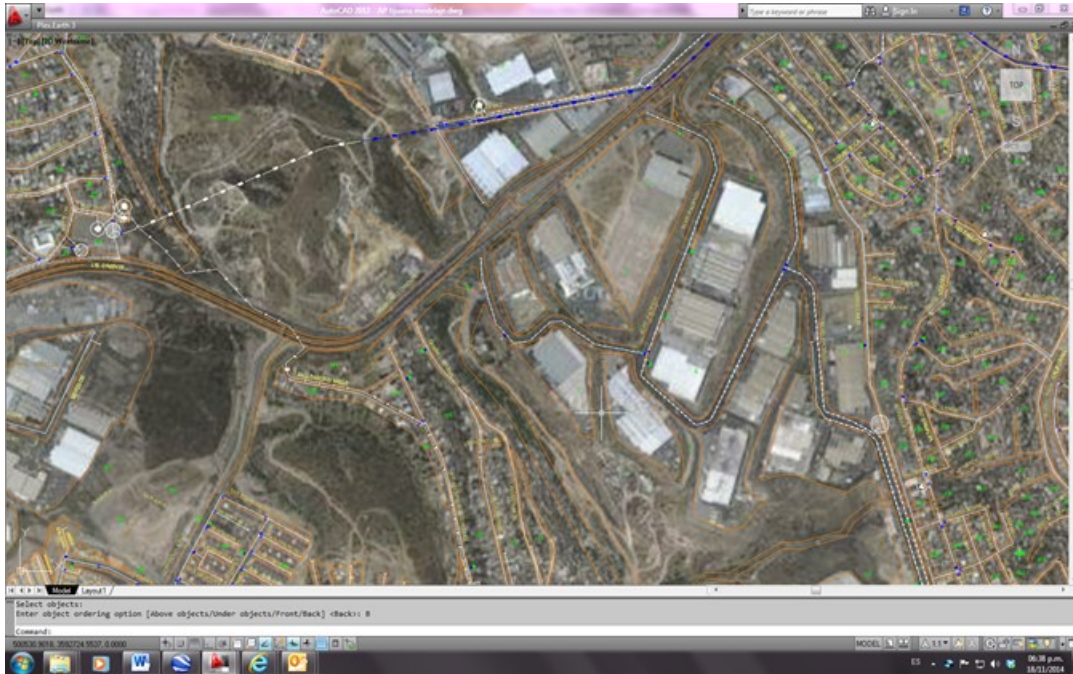


Ilustración 97. Red de agua potable de Tijuana, B.C. sobre imagen de Google Earth obtenida en línea por medio de Plex.Earth

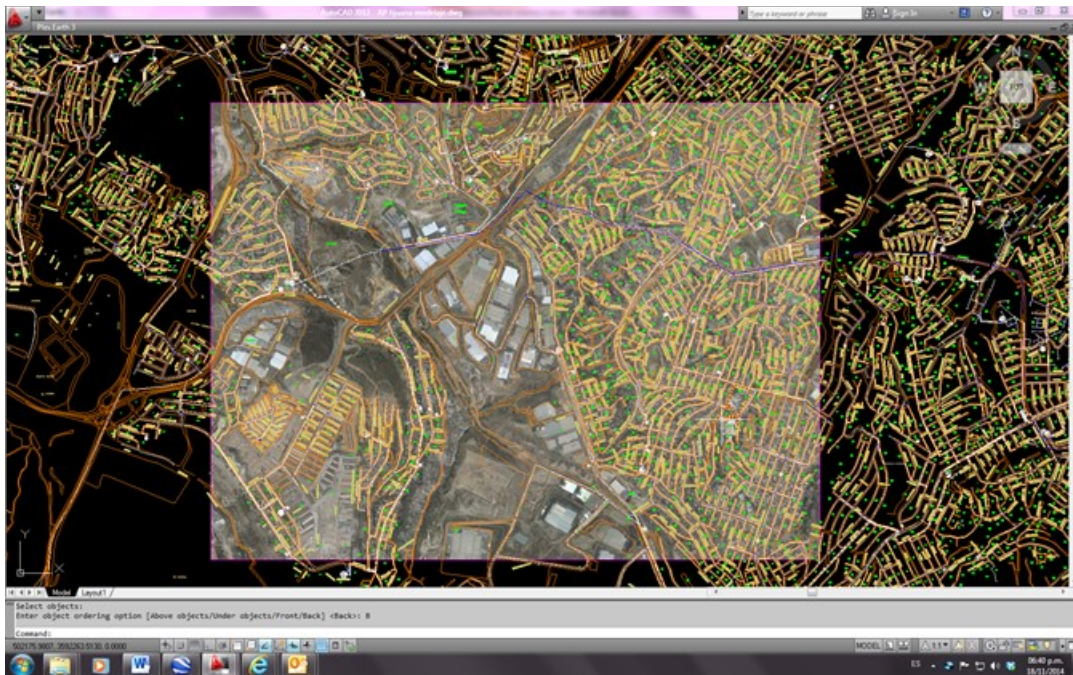


Ilustración 98. Red de agua potable de Tijuana, B.C. sobre imagen de Google Earth obtenida en línea por medio de Plex.Earth

8 MODELACIÓN DE LA DEMANDA ESTOCÁSTICA Y COMPARACIÓN CON RESULTADOS DE MEDICIONES

Se presenta a continuación el cálculo de parámetros de la demanda de agua potable medida en sectores aislados de Tijuana con diferente población servida y en dos de los edificios más grandes de Xalapa, y simulada por el procedimiento de Pulsos Rectangulares de Poisson que se propone. Los parámetros incluyen coeficientes de variación del gasto medio horario y el gasto instantáneo, con sus valores máximo y mínimo. En el caso de los datos medidos el gasto instantáneo se refiere al gasto obtenido en el intervalo de medición, que es de 15, 30 ó 60 segundos, mientras que en los gastos simulados se obtiene directamente el gasto instantáneo dado que su generación es con resolución de un segundo, aunque se pueden manejar también series agregadas a cualquier intervalo. Con los valores de los coeficientes calculados y la cantidad de habitantes en cada sector se obtuvieron ecuaciones para los coeficientes en función del número de habitantes.

8.1 Cálculos y resultados de mediciones en Tijuana

A continuación se explica de manera breve como se calcularon los coeficientes de variación debido a la demanda estocástica que se tiene así como los gráficos resultantes provenientes de la comparación de la variación tanto del gasto promediado horaria, como el medido.

Con la información recabada de los datos experimentales se realizó un cuadro resumen la cual se graficó y se le inserto una línea de tendencia con respecto a los coeficientes obtenidos en los diversos sectores.

Cabe señalar que se hizo lo mismo pero ahora con datos teóricos por medio del modelo de Pulsos Rectangulares de Poisson que se realizó en Excel, el cual toma diversas condicionantes y conforme el número de viviendas arroja los coeficientes de variación horaria y diaria.

8.1.1 *Cálculo de los coeficientes de variación Máximo Horario y Mínimo Horario, tomando como referencia el gasto medio diario.*

1.- El gasto proporcionado por el medidor es en Galones/min, (Columna D), por lo tanto se convirtió a L/s (Columna H). Después se obtuvo el volumen, multiplicando el gasto por los segundos de cada intervalo (en este caso son 60 segundos).

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	Fecha	Hora	Gasto (Galones/min)				Gasto (Lts/seg)	Volumen (lts)	
0	09.14.2010	08:36:58	0	0	0		0.00	0.00	
1	09.14.2010	08:37:58	0	0	0		0.00	0.00	
2	09.14.2010	08:38:58	0	0	0		0.00	0.00	
3	09.14.2010	08:39:58	0	0	0		0.00	0.00	
4	09.14.2010	08:40:58	0	0	0		0.00	0.00	
5	09.14.2010	08:41:58	0	0	0		0.00	0.00	
6	09.14.2010	08:42:58	0	0	0		0.00	0.00	
7	09.14.2010	08:43:58	0	0	0		0.00	0.00	
8	09.14.2010	08:44:58	0	0	0		0.00	0.00	
9	09.14.2010	08:45:58	0	0	0		0.00	0.00	
10	09.14.2010	08:46:58	0	0	0		0.00	0.00	
11	09.14.2010	08:47:58	0	0	0		0.00	0.00	
12	09.14.2010	08:48:58	0	0	0		0.00	0.00	
13	09.14.2010	08:49:58	0	0	0		0.00	0.00	
14	09.14.2010	08:50:58	0	0	0		0.00	0.00	

2.- Para obtener el gasto medio diario se hizo la suma de los volúmenes de todo el día, y este se dividió entre los segundos del día.

9.63	577.58		
9.21	552.71		
10.25	614.90		
9.92	595.37		
9.15	549.15		
9.69	581.14	Volumen	Gasto Medio Diario
10.40	623.80	2565499.78	29.69

3.- Para obtener el Gasto Máximo Horario se buscó el tiempo en que se obtuvo el mayor gasto y se toma un promedio de la hora en la que se encuentra el mayor gasto. Se sumó el volumen de la Hora y se dividió entre los segundos de esta.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

15175	15179	89.15.2010	10:15:50	957.20	957.20	226594.53	54.89	3925.01
15176	15174	89.15.2010	10:15:50	874.40	874.40	227588.74	55.45	3989.09
15177	15175	89.15.2010	10:15:50	953.80	953.80	228972.6	54.58	3978.89
15178	15176	89.15.2010	10:15:50	882.60	882.60	229251.25	55.53	3946.02
15179	15177	89.15.2010	10:15:50	977.90	977.90	230193.08	55.39	3929.50
15180	15178	89.15.2010	10:15:50	888.20	888.20	231819.47	55.54	3922.22
15181	15179	89.15.2010	10:15:50	871.96	871.96	231988.84	54.37	3938.45
15182	15180	89.15.2010	10:15:50	967.00	967.00	232751.89	54.74	3932.08
15183	15181	89.15.2010	10:15:50	854.27	854.27	233586.27	52.83	3958.86
15184	15182	89.15.2010	10:15:50	926.76	926.76	234419.84	52.16	3929.89
15185	15183	89.15.2010	10:15:50	887.51	887.51	235201.59	58.35	3856.76
15186	15184	89.15.2010	10:18:50	885.83	885.83	236026.19	58.89	3849.84
15187	15185	89.15.2010	10:18:50	932.21	932.21	236881.54	52.83	3916.81
15188	15186	89.15.2010	10:18:50	884.19	884.19	237781.44	58.15	3855.38
15189	15187	89.15.2010	10:18:50	958.29	958.29	238555.67	55.84	3928.47
15190	15188	89.15.2010	10:18:50	925.80	925.80	239391.54	52.18	3926.87
15191	15189	89.15.2010	10:18:50	799.53	799.53	240181.89	58.44	3826.51
15192	15190	89.15.2010	10:18:50	781.22	781.22	240932.22	49.29	2937.04
15193	15191	89.15.2010	10:18:50	889.29	889.29	241761.54	58.58	3848.78
15194	15192	89.15.2010	10:18:50	886.63	886.63	242579.24	58.77	3846.88
15195	15193	89.15.2010	10:18:50	828.58	828.58	243391.89	52.94	3918.58
15196	15194	89.15.2010	10:18:50	859.58	859.58	244229.39	52.34	3918.88
15197	15195	89.15.2010	10:18:50	946.19	946.19	245079.54	53.76	3935.58
15198	15196	89.15.2010	10:18:50	867.42	867.42	245938.92	53.46	3937.89
15199	15197	89.15.2010	10:18:50	958.83	958.83	246779.82	54.47	3928.58
15200	15198	89.15.2010	10:18:50	885.40	885.40	247631.87	55.86	3951.79
15201	15199	89.15.2010	10:18:50	888.28	888.28	248494.34	55.54	3932.22
15202	15200	89.15.2010	10:18:50	886.58	886.58	249349.76	55.92	3955.91
15203	15201	89.15.2010	10:18:50	893.9	893.9	250201.65	54.48	3939.78
15204	15202	89.15.2010	10:18:50	876.53	876.53	251028.15	52.58	3918.89
15205	15203	89.15.2010	10:18:50	888.28	888.28	251881.49	55.54	3932.22
15206	15204	89.15.2010	10:18:50	867.81	867.81	252558.84	54.74	3928.86
15207	15205	89.15.2010	10:18:50	929.58	929.58	253279.84	52.84	3918.88
15208	15206	89.15.2010	10:18:50	794.84	794.84	254021.46	58.15	3888.88
15209	15207	89.15.2010	10:18:50	798.42	798.42	254792.56	58.95	3821.21
15210	15208	89.15.2010	10:18:50	784.22	784.22	254518.78	49.29	2937.04
15211	15209	89.15.2010	10:18:50	775.9	775.9	255306.19	48.72	2938.47
15212	15210	89.15.2010	10:18:50	798.97	798.97	255941.89	46.82	2797.91
15213	15211	89.15.2010	10:18:50	799.51	799.51	256498.87	46.88	2888.86
15214	15212	89.15.2010	10:18:50	757.28	757.28	257181.24	47.78	2886.82
15215	15213	89.15.2010	10:18:50	766.67	766.67	257928.85	48.37	2982.06
15216	15214	89.15.2010	10:18:50	788.26	788.26	258717.14	49.79	2989.89
15217	15215	89.15.2010	10:18:50	778.87	778.87	259498	49.44	2948.34
15218	15216	89.15.2010	10:18:50	799.4	799.4	260279.1	49.46	2984.88
15219	15217	89.15.2010	10:18:50	777.46	777.46	261056.59	49.85	2949.81
15220	15218	89.15.2010	10:18:50	758.29	758.29	261888.8	47.59	2939.59
15221	15219	89.15.2010	10:18:50	794.27	794.27	262451.88	46.99	2779.54
15222	15220	89.15.2010	10:18:50	766.87	766.87	263087.79	48.37	2982.06
15223	15221	89.15.2010	10:18:50	764.92	764.92	263879.87	48.22	2939.27
15224	15222	89.15.2010	10:18:50	749.77	749.77	264681.89	47.58	2938.47
15225	15223	89.15.2010	10:18:50	728.58	728.58	265541.99	46.89	2764.76
15226	15224	89.15.2010	10:18:50	746.93	746.93	266298.92	47.19	2827.51
15227	15225	89.15.2010	10:18:50	732.58	732.58	267088.89	47.48	2818.88
15228	15226	89.15.2010	10:18:50	751.94	751.94	267987.21	47.72	2889.86
15229	15227	89.15.2010	10:18:50	759.82	759.82	268856.81	47.82	2875.47
15230	15228	89.15.2010	10:18:50	748.36	748.36	269719.17	47.82	2832.81
15231	15229	89.15.2010	10:18:50	746.42	746.42	270581.28	49.47	2932.91
15232	15230	89.15.2010	10:18:50	784.58	784.58	271484.29	49.52	2974.47
15233	15231	89.15.2010	10:18:50	792.49	792.49	272474.74	58.88	2939.58
15234	15232	89.15.2010	10:18:50	784.83	784.83	273461.84	53.92	2955.81

El gasto máximo se encuentra en el renglón marcado en amarillo, las celdas marcadas en verde son los tomados para obtener el promedio de la hora.

4.- Para obtener el gasto mínimo horario se realizó el mismo proceso que para el gasto máximo horario, solo aquí se toma la hora del gasto mínimo.

18019	18317	09.27.2010	01:53:50	74.65	74.65	8830417	4.71	382.58
18020	18318	09.27.2010	01:54:50	84.04	84.04	8830501	5.30	398.13
18021	18319	09.27.2010	01:55:50	82.63	82.63	8830584	5.21	312.79
18022	18320	09.27.2010	01:56:50	82.36	82.36	8830666	5.18	310.11
18023	18321	09.27.2010	01:57:50	87.79	87.79	8830754	5.54	322.32
18024	18322	09.27.2010	01:58:50	83.1	83.1	8830837	5.24	314.57
18025	18323	09.27.2010	01:59:50	92.02	92.02	8830929	5.01	348.33
18026	18324	09.27.2010	02:00:50	89.2	89.2	8831018	5.63	337.66
18027	18325	09.27.2010	02:01:50	71.82	71.83	8831090	4.53	271.91
18028	18326	09.27.2010	02:02:50	81.69	81.69	8831172	5.15	309.23
18029	18327	09.27.2010	02:03:50	87.32	87.32	8831259	5.51	330.54
18030	18328	09.27.2010	02:04:50	86.38	86.38	8831345	5.45	326.98
18031	18329	09.27.2010	02:05:50	82.36	82.36	8831427	5.18	310.11
18032	18330	09.27.2010	02:06:50	83.1	83.1	8831510	5.24	314.57
18033	18331	09.27.2010	02:07:50	96.24	96.24	8831606	6.07	364.31
18034	18332	09.27.2010	02:08:50	90.14	90.14	8831696	5.69	341.22
18035	18333	09.27.2010	02:09:50	100.47	100.47	8831796	6.34	380.32
18036	18334	09.27.2010	02:10:50	85.45	85.45	8831891	5.29	323.46
18037	18335	09.27.2010	02:11:50	89.2	89.2	8831970	5.63	337.66
18038	18336	09.27.2010	02:12:50	81.65	81.65	8832062	5.78	341.95
18039	18337	09.27.2010	02:13:50	86.95	86.95	8832149	5.48	328.78
18040	18338	09.27.2010	02:14:50	83.57	83.57	8832233	5.27	316.35
18041	18339	09.27.2010	02:15:50	89.2	89.2	8832322	5.63	337.66
18042	18340	09.27.2010	02:16:50	91.08	91.08	8832413	5.75	344.78
18043	18341	09.27.2010	02:17:50	87.79	87.79	8832501	5.54	332.32
18044	18342	09.27.2010	02:18:50	93.9	93.9	8832595	5.92	355.45
18045	18343	09.27.2010	02:19:50	87.79	87.79	8832683	5.54	332.32
18046	18344	09.27.2010	02:20:50	90.14	90.14	8832773	5.69	341.22
18047	18345	09.27.2010	02:21:50	100.47	100.47	8832873	6.34	380.32
18048	18346	09.27.2010	02:22:50	107.04	107.04	8832980	6.75	405.19
18049	18347	09.27.2010	02:23:50	100	100	8833080	6.31	378.54
18050	18348	09.27.2010	02:24:50	95.77	95.77	8833176	6.04	362.53
18051	18349	09.27.2010	02:25:50	95.31	95.31	8833271	6.01	360.79
18052	18350	09.27.2010	02:26:50	108.87	108.87	8833378	6.72	403.41
18053	18351	09.27.2010	02:27:50	105.63	105.63	8833484	6.66	399.85
18054	18352	09.27.2010	02:28:50	105.63	105.63	8833590	6.66	399.85
18055	18353	09.27.2010	02:29:50	106.1	106.1	8833696	6.69	401.63
18056	18354	09.27.2010	02:30:50	101.41	101.41	8833797	6.40	383.88
18057	18355	09.27.2010	02:31:50	96.71	96.71	8833894	6.18	366.05
18058	18356	09.27.2010	02:32:50	102.35	102.35	8833996	6.46	387.44
18059	18357	09.27.2010	02:33:50	100	100	8834096	6.31	378.54

Ahora el gasto mínimo se encuentra en el renglón marcado en rojo y las celdas marcadas en morado son las tomadas para obtener el promedio de la hora.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

8.1.2 Comparativo de los coeficientes de variación media horaria e instantánea

Sitio de medición: (10314) Erp. Carlota Sosa. Con intervalo de medición de 1 min.

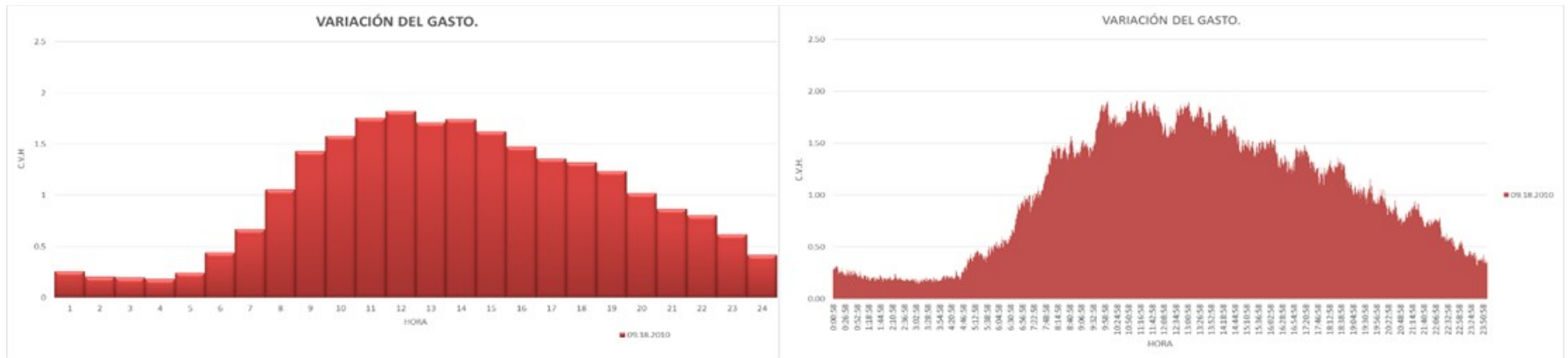


Ilustración 99. Gráfico comparativo entre el gráfico del gasto promedio por horas con respecto al gráfico del gasto medido.

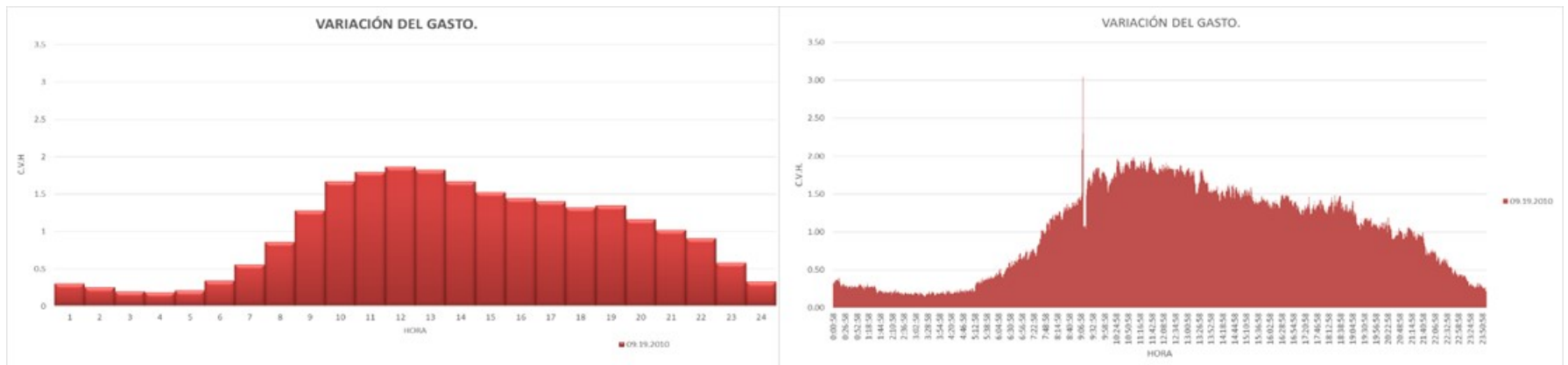


Ilustración 100. Gráfico comparativo entre el gráfico del gasto promedio por horas con respecto al gráfico del gasto medido.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

Sitio de medición: (s-cod) E.D.M MABAMEX. Con intervalo de medición 30 segundos.

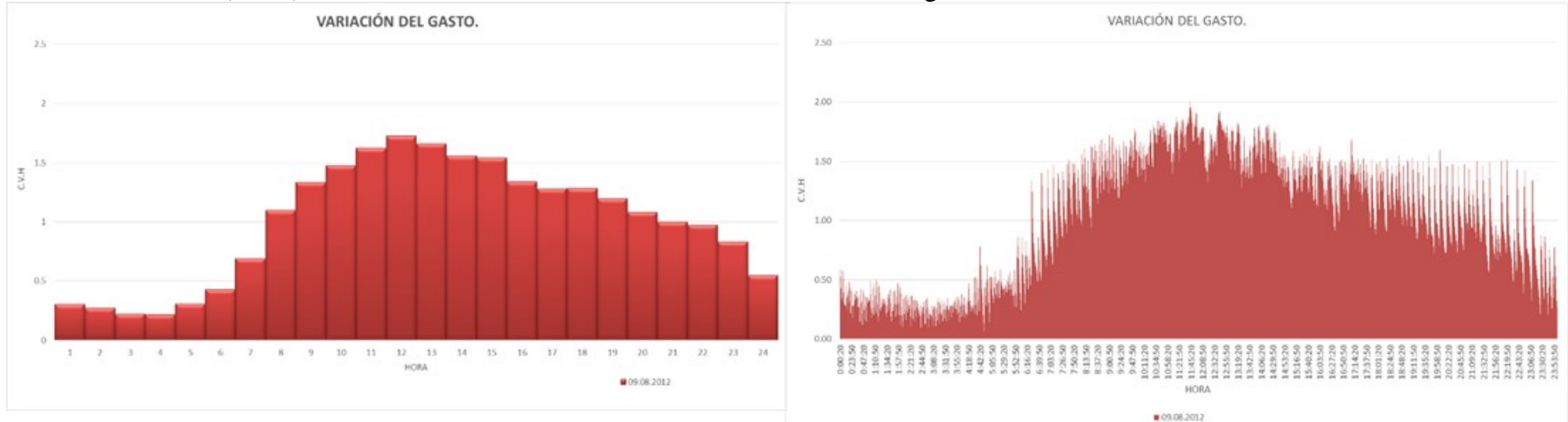


Ilustración 101. Gráfico comparativo entre el gráfico del gasto promedio por horas con respecto al gráfico del gasto medido.

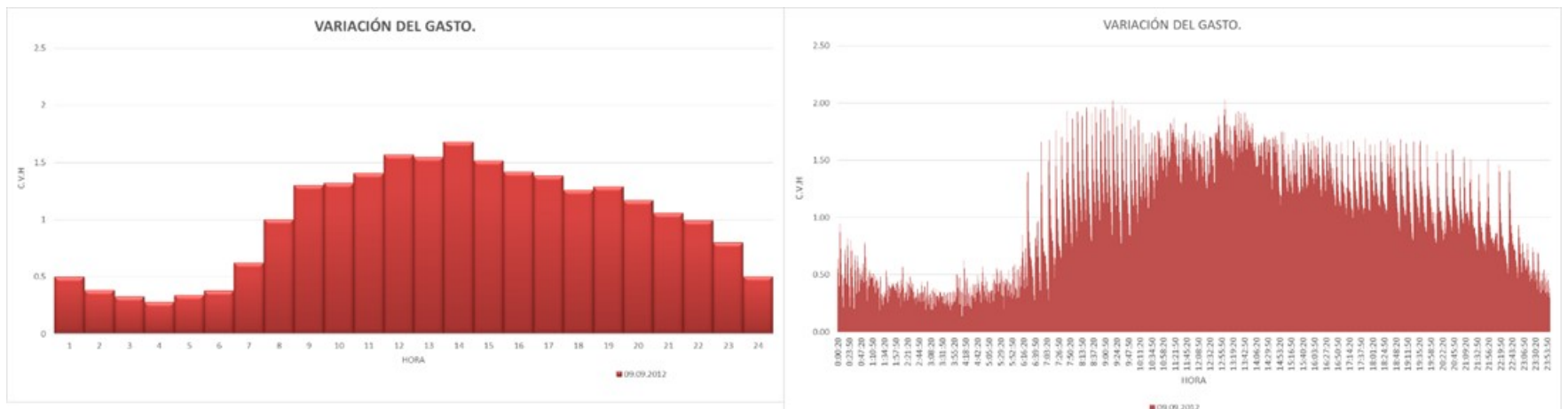


Ilustración 102. Gráfico comparativo entre el gráfico del gasto promedio por horas con respecto al gráfico del gasto medido.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

Sitio de medición: ERP. JUAN OJEDA. Con intervalo de medición 1 minuto.

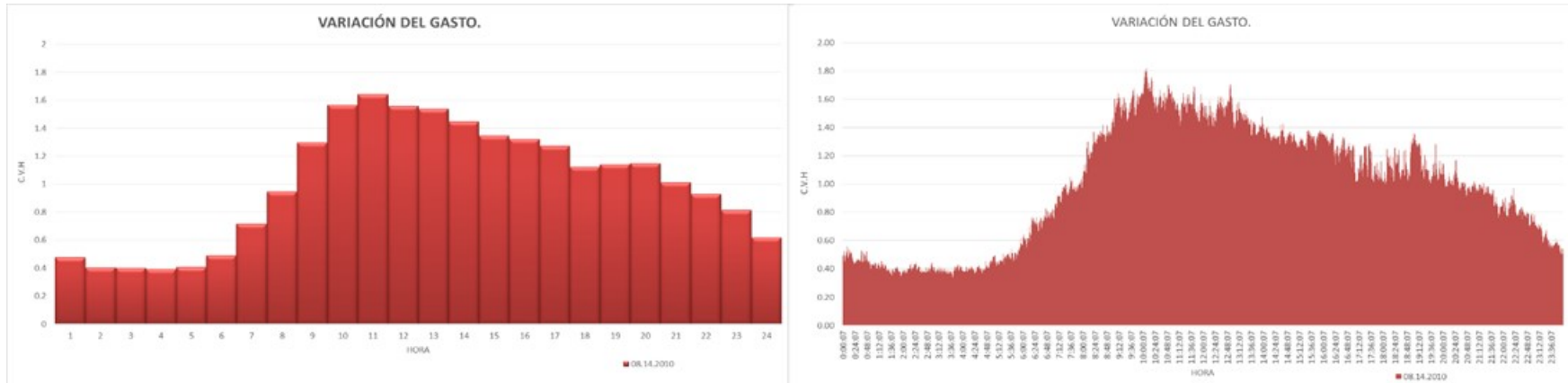


Ilustración 103. Gráfico comparativo entre el gráfico del gasto promedio por horas con respecto al gráfico del gasto medido.

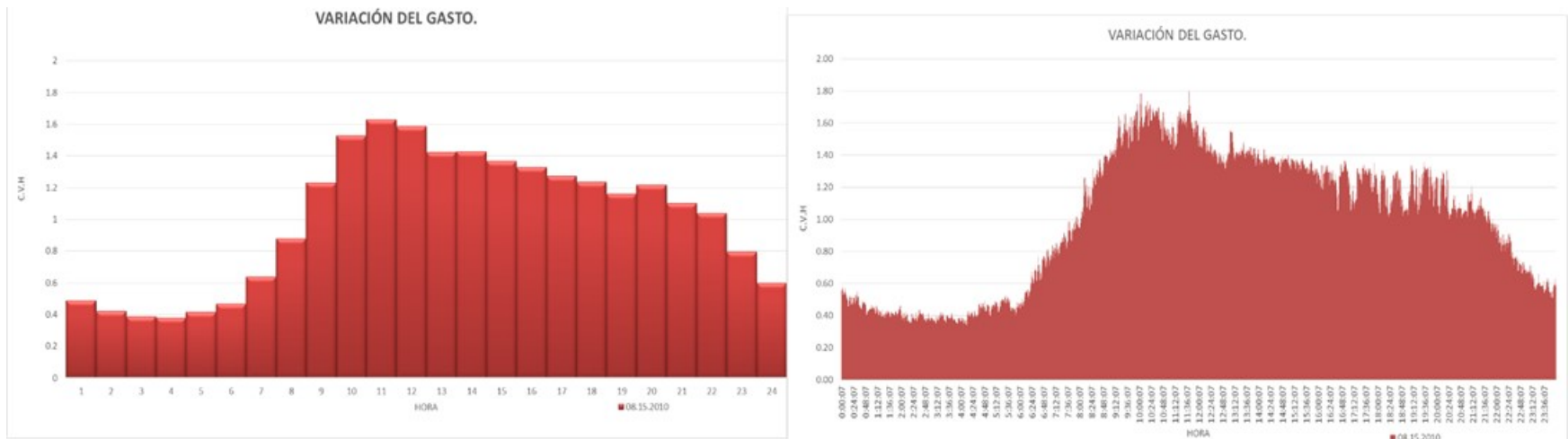


Ilustración 104. Gráfico comparativo entre el gráfico del gasto promedio por horas con respecto al gráfico del gasto medido.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

Sitio de medición: (60310) DES. CRP. LOS REYES. Con intervalo de medición 1 minuto

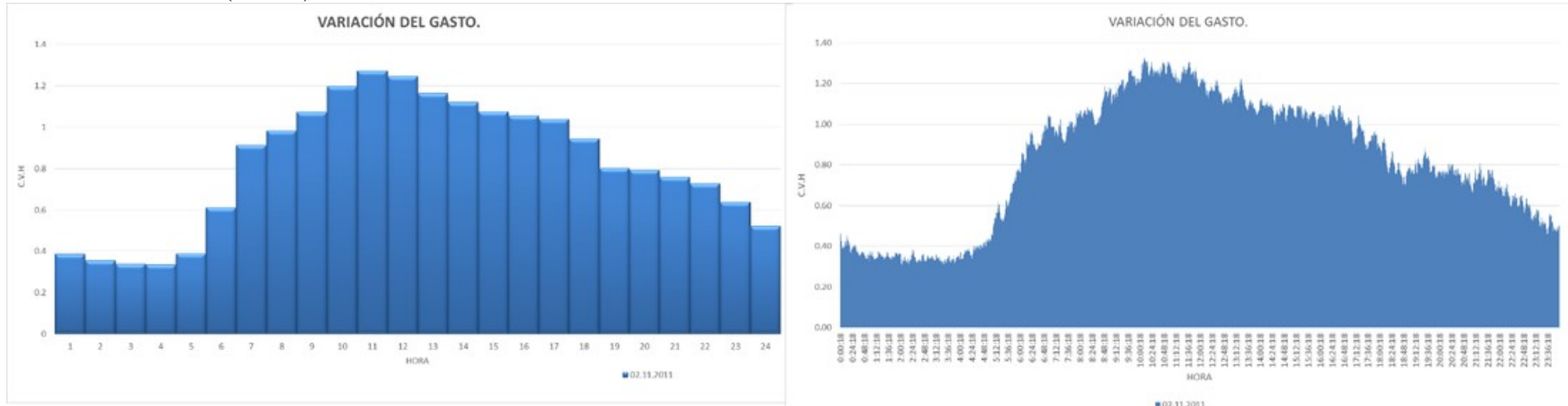


Ilustración 105. Gráfico comparativo entre el gráfico del gasto promedio por horas con respecto al gráfico del gasto medido.

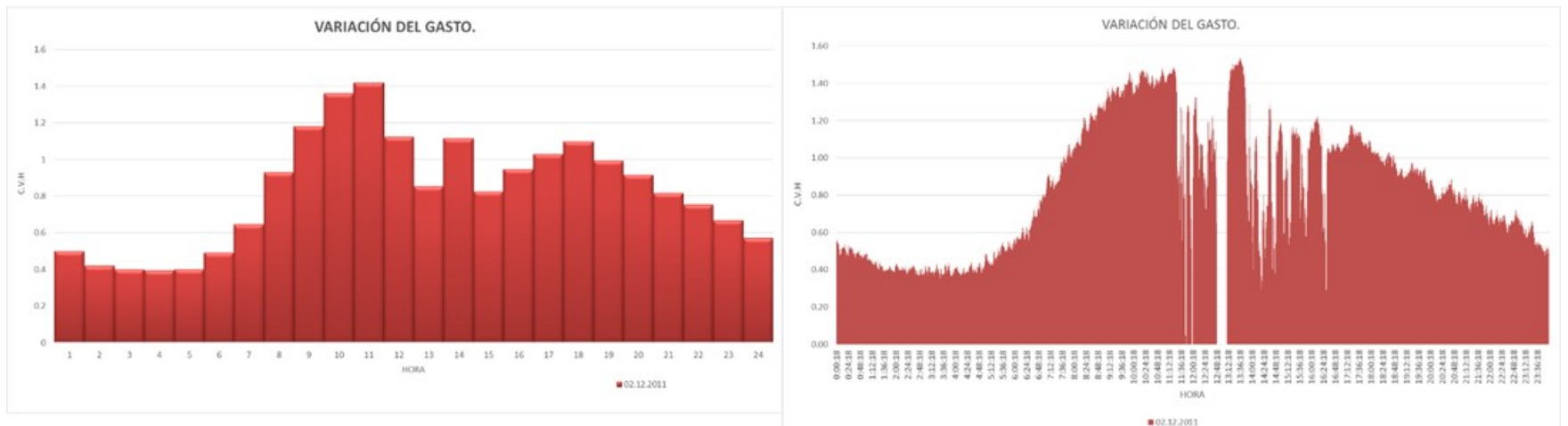


Ilustración 106. Gráfico comparativo entre el gráfico del gasto promedio por horas con respecto al gráfico del gasto medido.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

Sitio de medición: (21907) jardines de agua cte.HIDRO. Con intervalo de medición 30 segundos

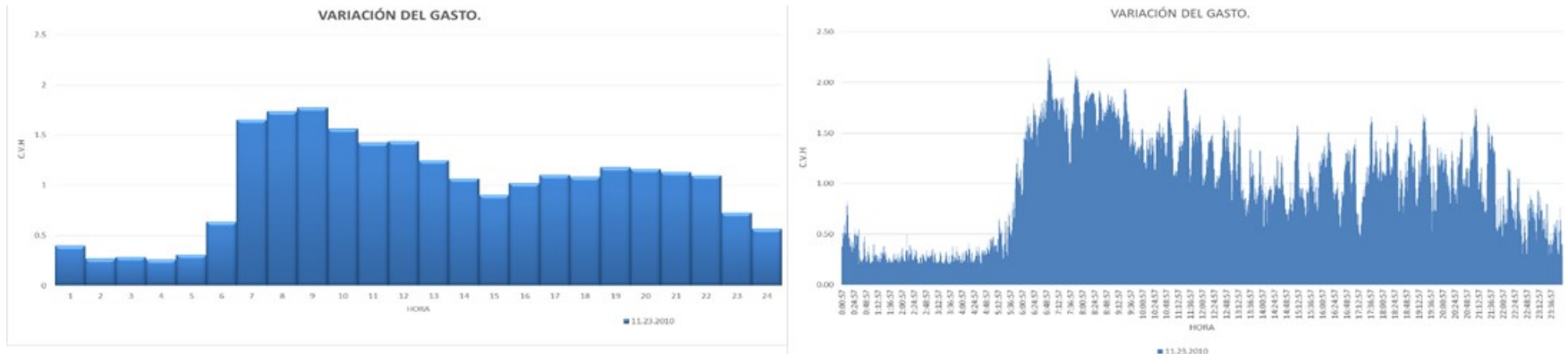


Ilustración 107. Gráfico comparativo entre el gráfico del gasto promedio por horas con respecto al gráfico del gasto medido.

Sitio de medición: (21907) jardines de agua cte. Hidro. Con intervalo de medición 1 minuto

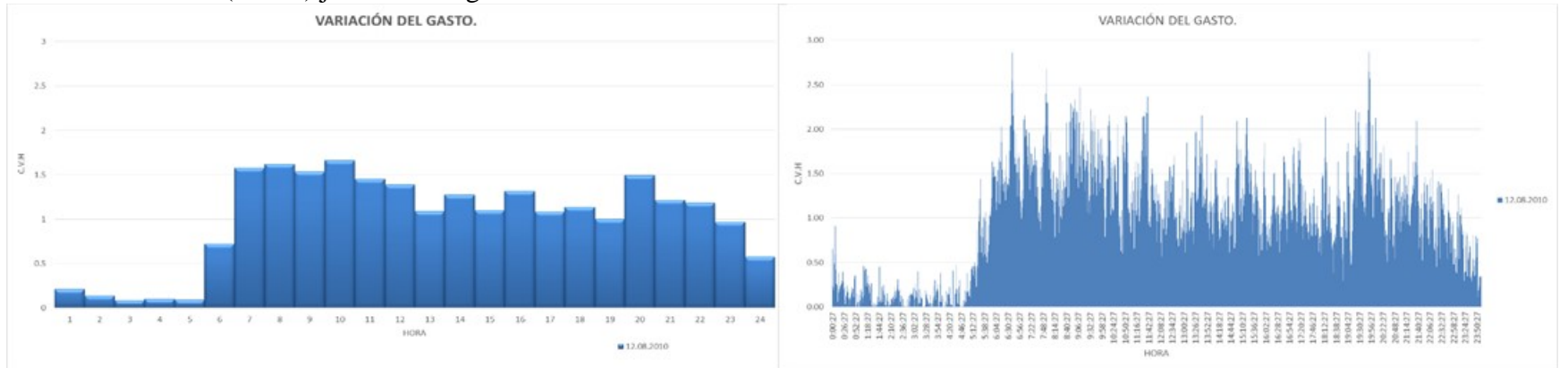


Ilustración 108. Gráfico comparativo entre el gráfico del gasto promedio por horas con respecto al gráfico del gasto medido.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

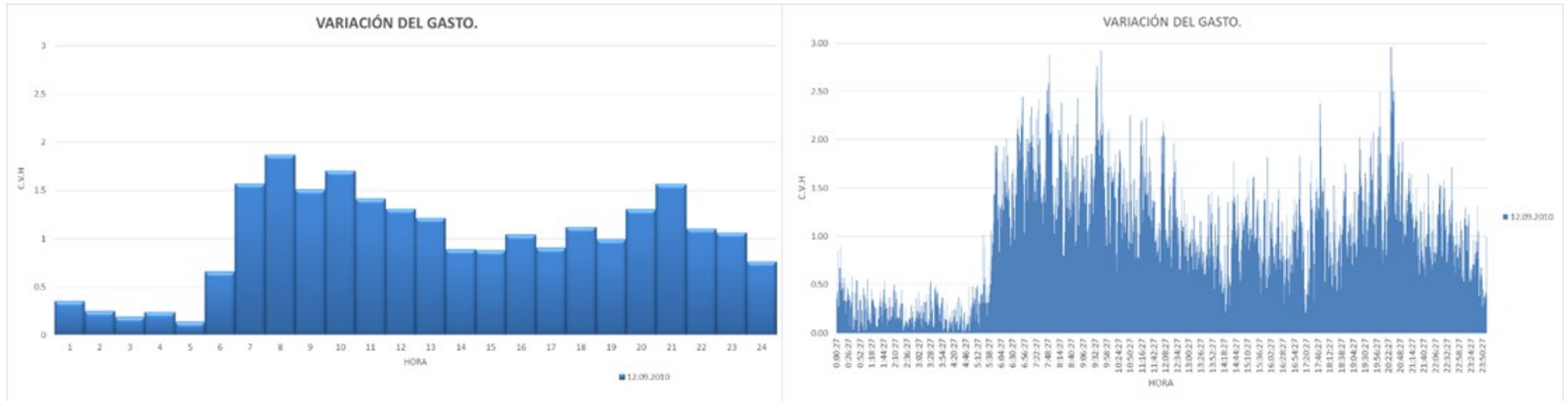


Ilustración 109. Gráfico comparativo entre el gráfico del gasto promedio por horas con respecto al gráfico del gasto medido.

Sitio de medición: (61737) tan. Hacienda acueducto p-baja. Con intervalo de medición 1 minuto.

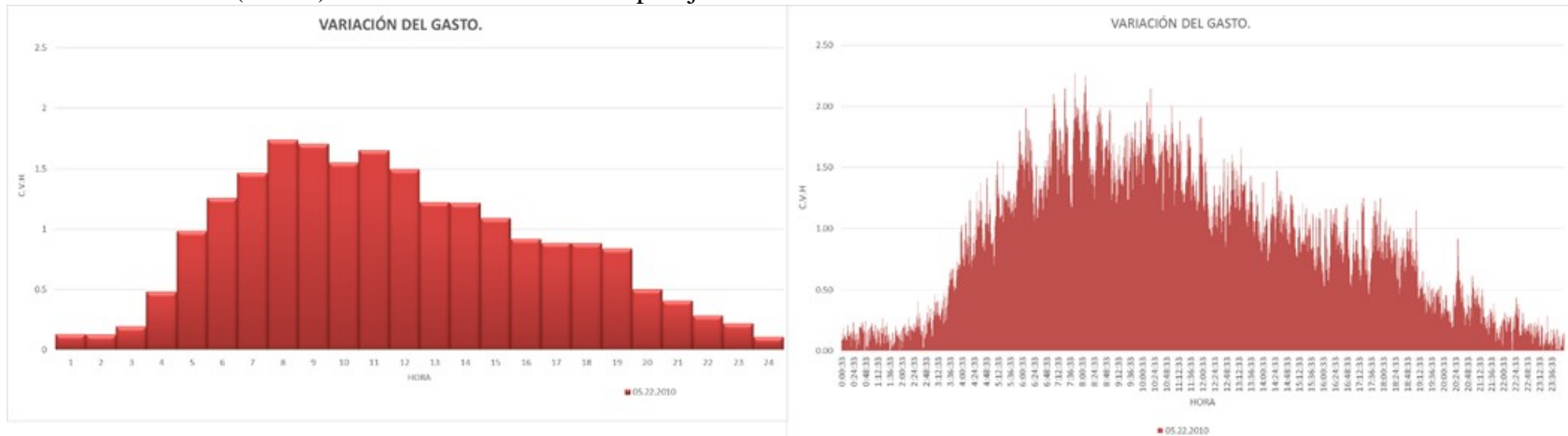


Ilustración 110. Gráfico comparativo entre el gráfico del gasto promedio por horas con respecto al gráfico del gasto medido.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

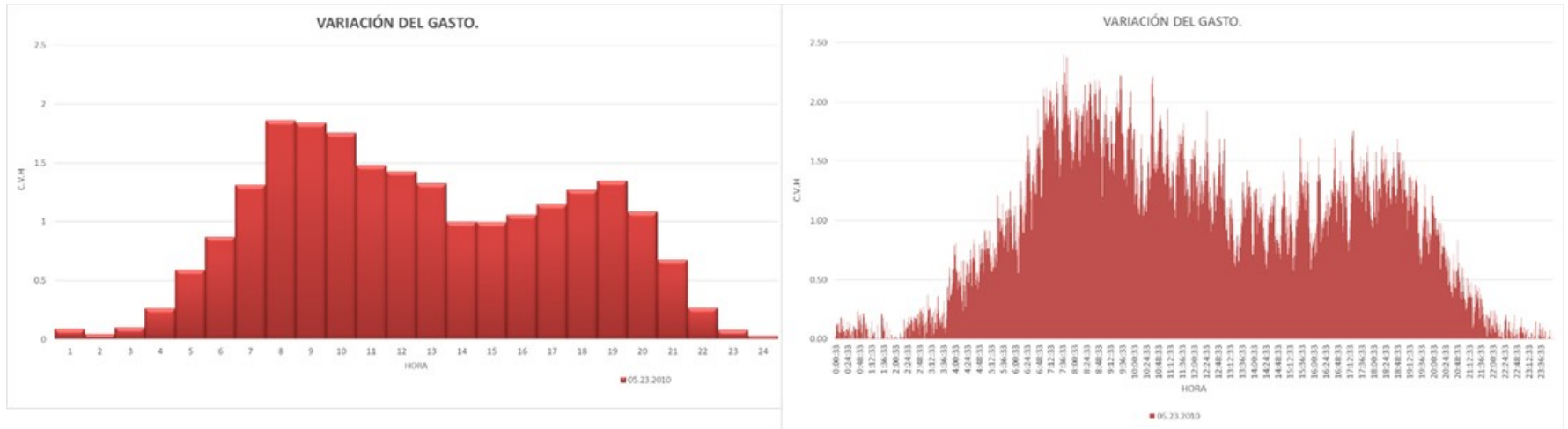


Ilustración 111. Gráfico comparativo entre el gráfico del gasto promedio por horas con respecto al gráfico del gasto medido.

Sitio de medición: (10341) ERP CALLE 17 ALT. Con intervalo de medición 1 minuto.

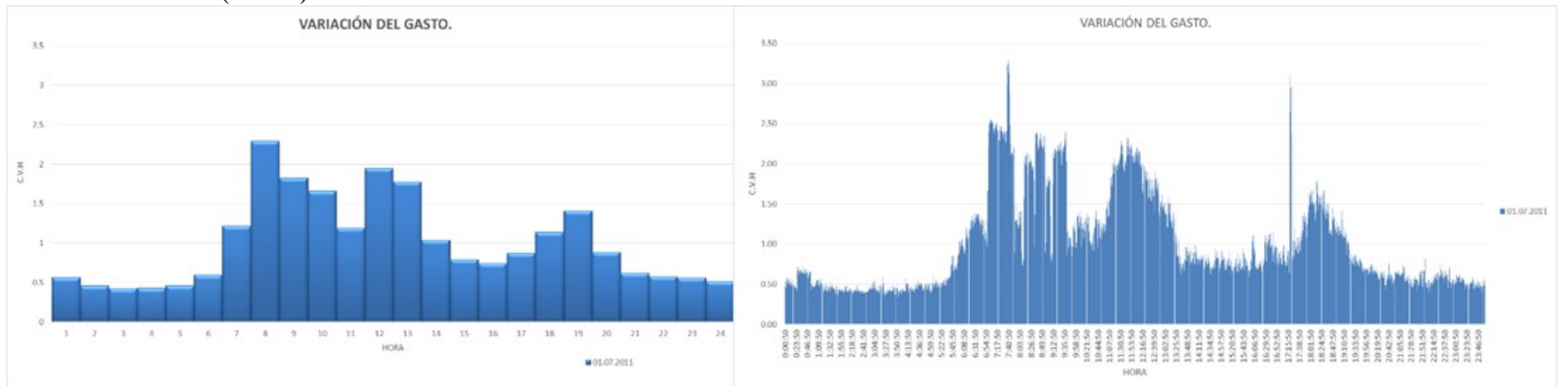


Ilustración 112. Gráfico comparativo entre el gráfico del gasto promedio por horas con respecto al gráfico del gasto medido.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

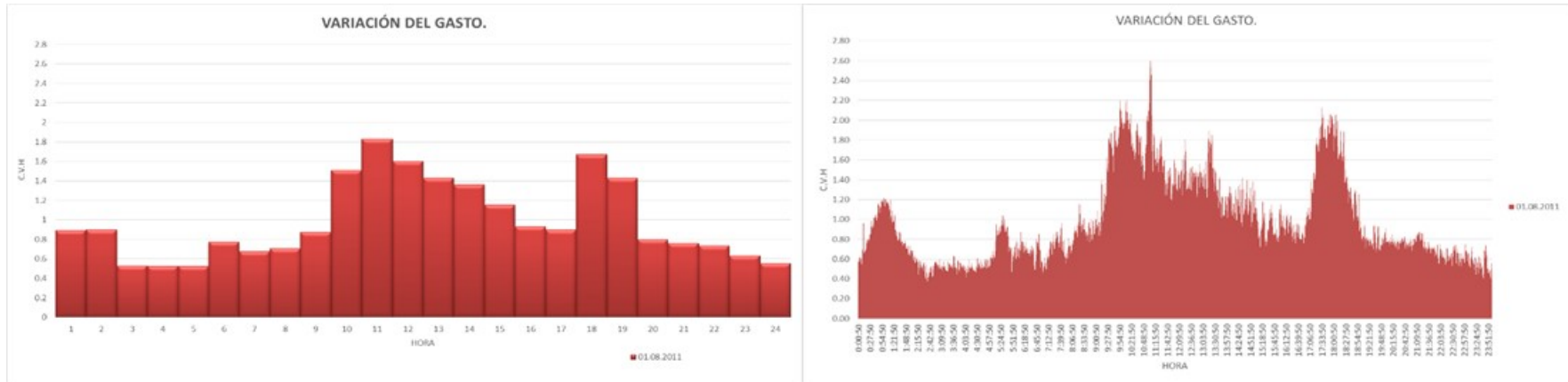


Ilustración 113. Grafico comparativo entre el gráfico del gasto promedio por horas con respecto al gráfico del gasto medido.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

8.1.3 Resultados de los datos experimentales con respecto a los datos teóricos

Aquí se trabajó un comparativo entre los datos experimentales (tomados en campo), y los datos obtenidos por medios teóricos (Programación en Excel) en donde cabe señalar que se omiten las fugas.

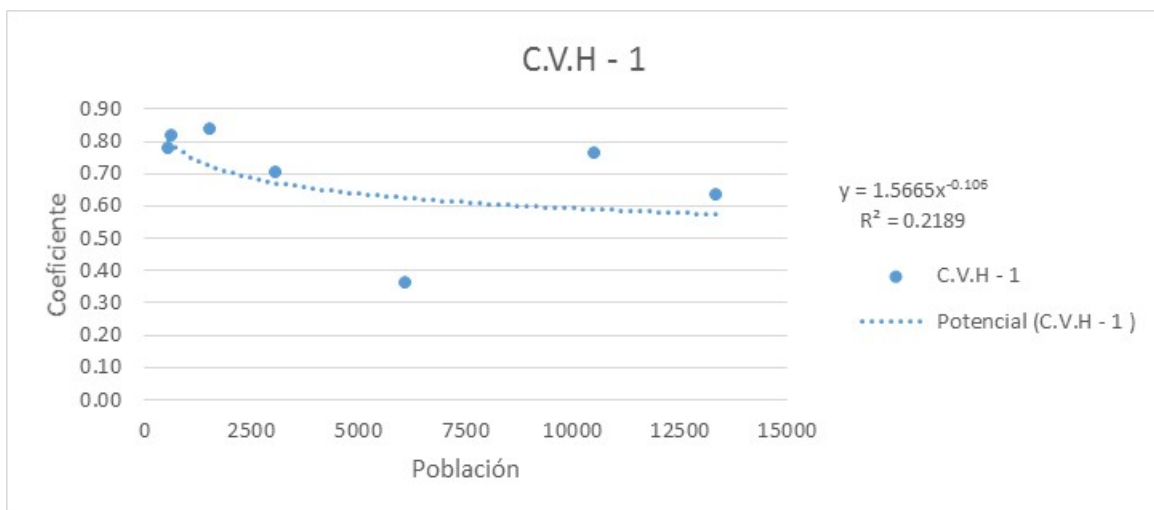
8.1.3.1 Datos Experimentales

Como se lograra apreciar los datos experimentales son los obtenidos a partir de las macro mediciones tomadas en campo con los cuales se trabajó obteniendo lo siguiente:

Cuadro 11. Resultados de los datos experimentales.

Sector	Población	C.V.H - 1	1-C.V.M.	Q.M.D.	C.V.Máx.Ins.-1	1-C.V.Mín.Ins.	Dotación
erp Carlota	10513	0.76	0.82	30.42	2.05	1.00	250
erp Juan O.	13353	0.64	0.60	38.64	0.82	0.658860068	
Des CR Los Reyes	6083	0.36	0.55	17.60	0.54	0.998423006	
EDM MABAMEX	3071	0.70	0.67	8.89	1.03	0.981490311	
Hacienda Acue.	1531	0.84	0.91	4.43	1.40	0.996938775	
Jardines d. A1	626	0.82	0.61	1.81	1.24	0.80	
Jardines d. A2	558	0.78	0.77	1.62	2.36	1.00	

A continuación se muestra el grafico del coeficiente de variación máximo horario con su línea de tendencia para el ajuste.

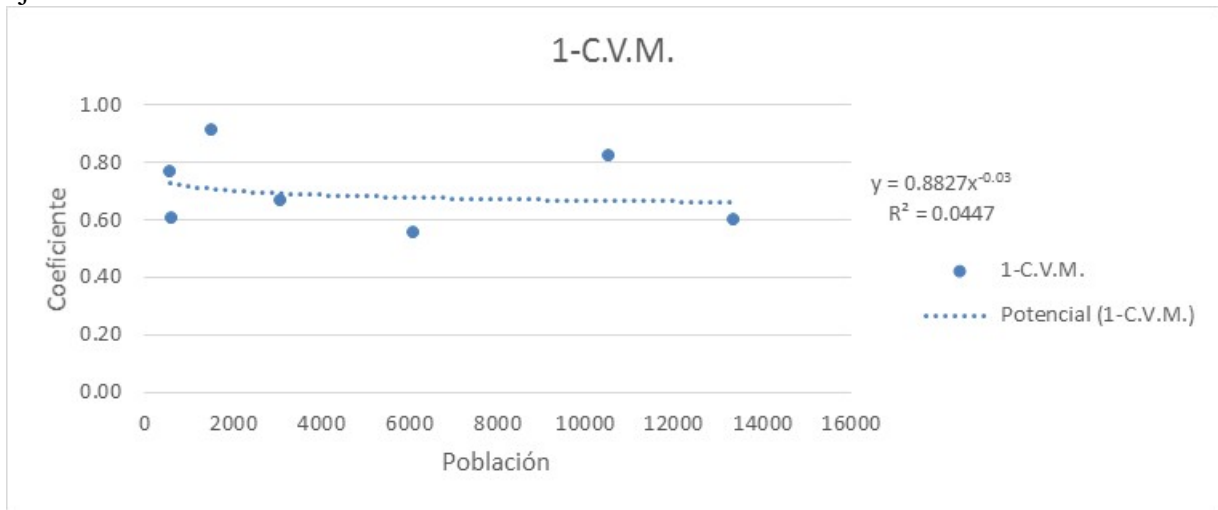


Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

Ecuación resultante del C.V.H.máx:

$$K_{\text{máx},h} = 1 + \frac{1.56}{N^{0.10}} \quad (10)$$

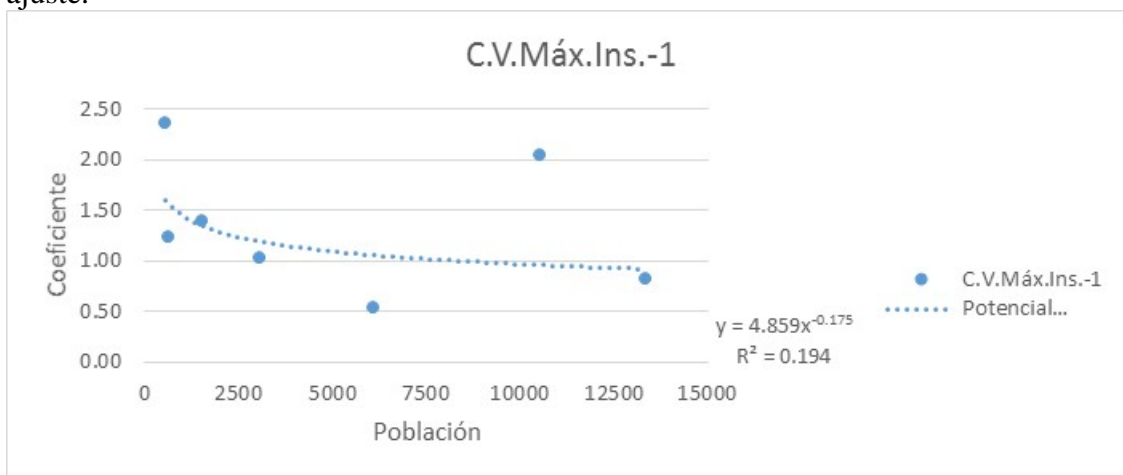
Grafico del coeficiente de variación mínimo horario con su línea de tendencia para el ajuste.



Ecuación resultante del C.V.Mín

$$K_{\text{mín},h} = 1 - \frac{0.88}{N^{0.03}} \quad (11)$$

Grafico del coeficiente de variación máximo instantáneo con su línea de tendencia para el ajuste.

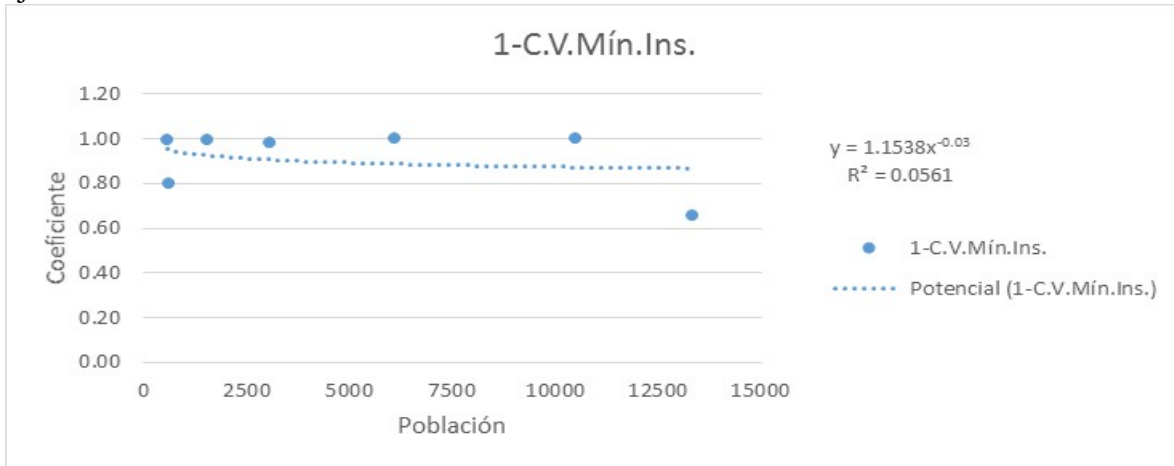


Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

Ecuación resultante del C.V.Máx.Ins.:

$$K_{\text{máx},h} = 1 + \frac{4.86}{N^{0.17}} \quad (12)$$

Grafico del coeficiente de variación mínimo instantáneo con su línea de tendencia para el ajuste.



Ecuación resultante a partir del C.V.Mín.Ins.:

$$K_{\text{mín},h} = 1 - \frac{1.15}{N^{0.03}} \quad (13)$$

8.1.3.2 Datos teóricos

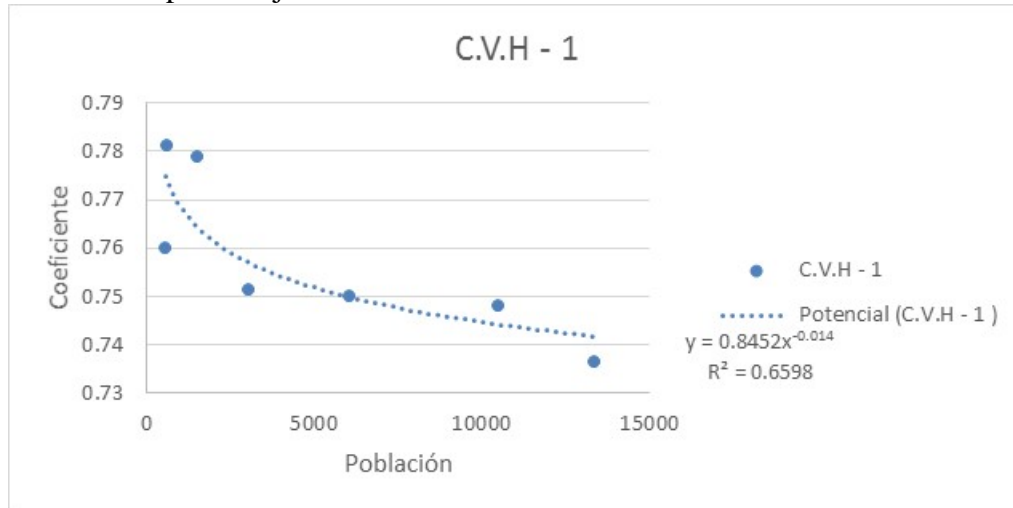
Como se logra apreciar, los datos teóricos son los obtenidos a partir de hoja de cálculo donde toma diversos parámetros sin tomar en cuenta un coeficiente para las fugas, para realizar el muestreo semejante al del campo se realizan diferentes corridas en la hoja de cálculo y se saca un promedio de los resultados que proporcione Excel con los cuales se trabajó obteniendo lo siguiente:

Cuadro 12. Resultados de los datos teóricos

Sector	Población	C.V.H - 1	1-C.V.M.	Q.M.D.	C.V.Máx.Ins.-1	1-C.V.Mín.Ins.	Dotación
erp Carlota	10513	0.75	0.85	30.42	1.07	0.987053584	250
erp Juan O.	13353	0.74	0.85	38.64	1.03	0.997076402	
Des CR Los Reyes	6083	0.75	0.86	17.60	1.17	0.998205460	
EDM MABAMEX	3071	0.75	0.86	8.89	1.31	1.000000000	
Hacienda Acue.	1531	0.78	0.86	4.43	1.56	1.000000000	
Jardines d. A1	626	0.78	0.86	1.81	2.10	1.000000000	
Jardines d. A2	558	0.76	0.89	1.62	2.23	1.000000000	

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

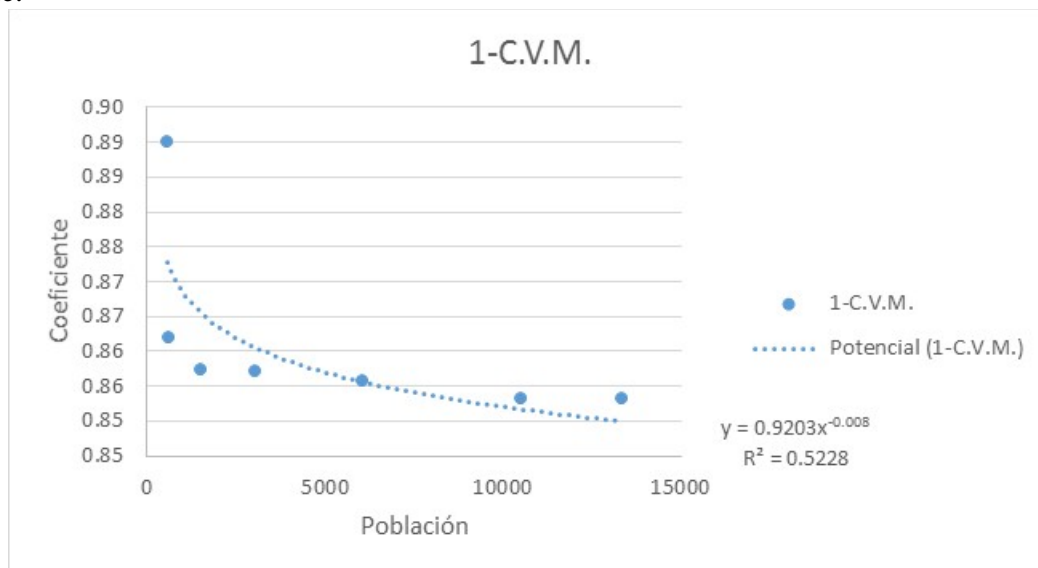
A continuación se muestra el grafico del coeficiente de variación máximo horario con su línea de tendencia para el ajuste.



Ecuación resultante a partir del C.V.H.Máx.:

$$K_{\text{máx},h} = 1 + \frac{0.84}{N^{0.01}} \quad (14)$$

Grafico del coeficiente de variación mínimo horario con su línea de tendencia para el ajuste.

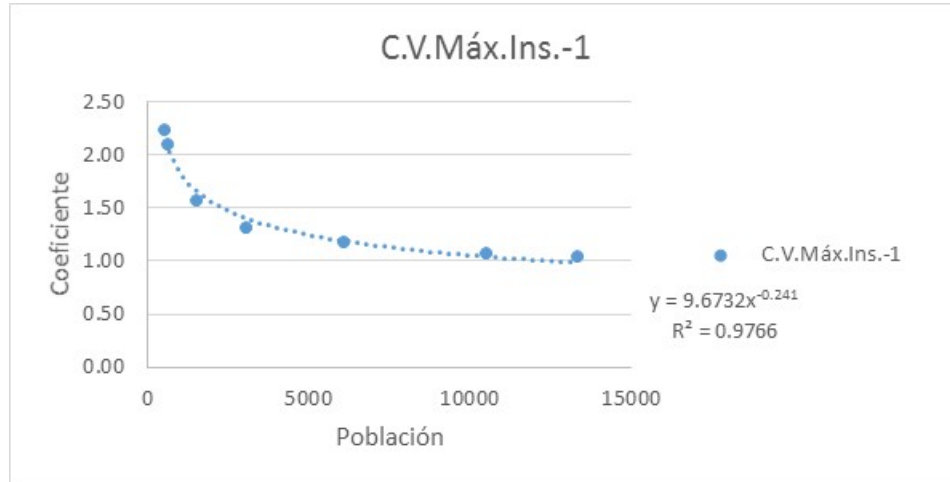


Ecuación resultante a partir del C.V.Mín.

$$K_{\text{mín},h} = 1 - \frac{0.92}{N^{0.01}} \quad (15)$$

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

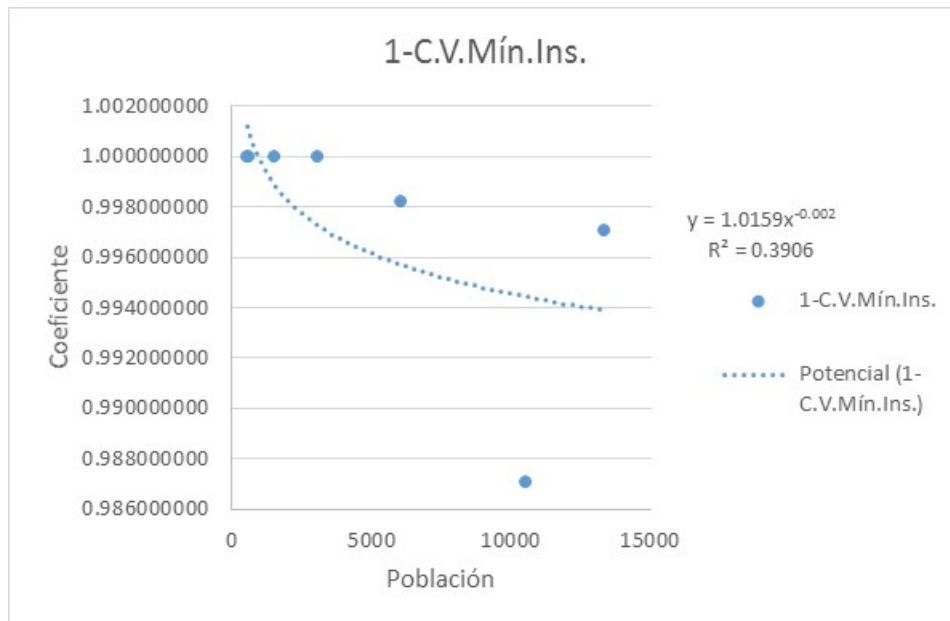
Grafico del coeficiente de variación máximo instantáneo con su línea de tendencia para el ajuste.



Ecuación resultante del C.V. Máx. Ins.:

$$K_{\text{máx},h} = 1 + \frac{9.67}{N^{0.24}} \quad (16)$$

Grafico del coeficiente de variación mínimo instantáneo con su línea de tendencia para el ajuste.



Ecuación resultante a partir del C.V. Mín. Ins.:

$$K_{\text{mín},h} = 1 - \frac{1.01}{N^{0.002}} \quad (17)$$

8.2 Cálculos y resultados de mediciones en Xalapa

El servicio de agua potable en Xalapa es tandeado, a diferencia de Tijuana. Los caudales del agua en las tuberías de la red no responden al consumo directo sino que al llenado de cisternas y/o tinacos en las horas de suministro. Por esta razón las mediciones se realizaron directamente en tomas de altos consumidores de agua, que fueron acordadas con la CMAS, en particular en dos de los edificios más altos de la ciudad. Se requiere cisterna en estos lugares por ser edificios altos y verse con la necesidad de bombear para lograr suministrar a los pisos altos, aparte de haber servicio de agua tandeado en la ciudad.

A continuación se explica de manera breve como se calcularon los coeficientes de variación debido a la demanda estocástica que se tiene así como los gráficos resultantes provenientes de la comparación de los coeficientes de variación.

8.2.1 *Cálculo de los coeficientes de variación Máximo Horario y Mínimo Horario, tomando como referencia el gasto medio diario.*

1.- El gasto proporcionado por la medición se encontró en L/s, (Columna B). Después se obtuvo el volumen, multiplicando el gasto por los segundos de cada intervalo (En este caso son 15 segundos).

A	B	C
Tiempo	LPS	Vol. (Lts)
0:00:00	0.34848	5.23
0:00:15	0.15246	2.29
0:00:30	0.101089	1.52
0:00:45	0.108712	1.63
0:01:00	0.13068	1.96
0:01:15	0.102831	1.54
0:01:30	0.060984	0.91
0:01:45	0.102178	1.53
0:02:00	0.19602	2.94
0:02:15	0	0.00
0:02:30	0.041382	0.62
0:02:45	0.34848	5.23
0:03:00	0.05445	0.82
0:03:15	0.00	0.07
0:03:30	0.067518	1.01

2.- Para obtener el gasto medio diario se hizo la suma de los volúmenes de todo el día, y este se dividió entre los segundos del día.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

23:59:00	0.204732	3.07		
23:59:15	0.078408	1.18		
23:59:30	0.093654	1.40	Vol	Gasto Medio Diario
23:59:45	0.091476	1.37	9325.69	0.107936198
0:00:00	0.067518	1.01		
0:00:15	0.067518	1.01		
0:00:30	0.113256	1.70		
0:00:45	0.047916	0.72		
0:01:00	0.102831	1.54		
0:01:15	0.041382	0.62		
0:01:30	0.004356	0.07		
0:01:45	0.080586	1.21		
0:02:00	0.108712	1.63		

3.- Para obtener el Gasto Máximo Horario se buscó el tiempo en que se obtuvo el mayor gasto y se toma un promedio de la hora en la que se encuentra el mayor gasto. Se sumó el volumen de la Hora y se dividió entre los segundos de esta.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

	A	B	C	E	F
2143	0:57:00	0	0.00		
2144	0:57:15	0.004356	0.07		
2145	0:57:30	0.004356	0.07		
2146	0:57:45	0.15246	2.29		
2147	0:58:00	0.19602	2.94		
2148	0:58:15	0.067518	1.01		
2149	0:58:30	0.17424	2.61		
2150	0:58:45	0.30492	4.57		
2151	0:59:00	0	0.00		
2152	0:59:15	0.13068	1.96		
2153	0:59:30	0.067518	1.01		
2154	0:59:45	0.067518	1.01		
2155	1:00:00	0.067518	1.01	Val	Gasto
2156	1:00:15	0.39204	5.88	31.94	0.025539525
2157	1:00:30	0.17424	2.61		
2158	1:00:45	0.047916	0.72		
2159	1:01:00	0.102178	1.53		
2160	1:01:15	0.002178	0.03		
2161	1:01:30	0.006534	0.10		
2162	1:01:45	0.17424	2.61		
2163	1:02:00	0.106722	1.60		
2164	1:02:15	0.041382	0.62		
2165	1:02:30	0.101089	1.52		
2166	1:02:45	0.06534	0.98		
2167	1:03:00	0.089298	1.34		
2168	1:03:15	0.39204	5.88		
2169	1:03:30	0.047916	0.72		
2170	1:03:45	0.006534	0.10		
2171	1:04:00	0.102178	1.53		
2172	1:04:15	0.17424	2.61		
2173	1:04:30	0	0.00		
2174	1:04:45	0.041382	0.62		
2175	1:05:00	0.050094	0.75		
2176	1:05:15	0.30492	4.57		
2177	1:05:30	0	0.00		
2178	1:05:45	0	0.00		
	1:06:00	0.004356	0.07		

El gasto máximo se encuentra en el renglón marcado en rojo, las celdas marcadas en morado son los tomados para obtener el promedio de la hora.

4.- Para obtener el gasto mínimo horario se realizó el mismo proceso que para el gasto máximo horario, solo aquí se toma la hora del gasto mínimo.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

2002	0:21:45	0.06534	0.36		
2003	0:22:00	0.006534	0.10		
2004	0:22:15	0.004356	0.07		
2005	0:22:30	0.004356	0.07		
2006	0:22:45	0.006534	0.10		
2007	0:23:00	0.04356	0.65		
2008	0:23:15	0.39204	5.88		
2009	0:23:30	0.113256	1.70		
2010	0:23:45	0.056628	0.85		
2011	0:24:00	0.37026	5.55		
2012	0:24:15	0.17424	2.61		
2013	0:24:30	0	0.00		
2014	0:24:45	0.102831	1.54		
2015	0:25:00	0.23958	3.59		
2016	0:25:15	0.006534	0.10		
2017	0:25:30	0.108712	1.63		
2018	0:25:45	0.101089	1.52		
2019	0:26:00	0.006534	0.10		
2020	0:26:15	0.23958	3.59		
2021	0:26:30	0.15246	2.29		
2022	0:26:45	0.15246	2.29		
2023	0:27:00	0.23958	3.59		
2024	0:27:15	0.006534	0.10		
2025	0:27:30	0.067518	1.01		
2026	0:27:45	0.067518	1.01		
2027	0:28:00	0.067518	1.01		
2028	0:28:15	0	0.00	84.36	0.023605767
2029	0:28:30	0.050034	0.75		
2030	0:28:45	0.002178	0.03		
2031	0:29:00	0.00	0.07		
2032	0:29:15	0.102178	1.53		
2033	0:29:30	0	0.00		
2034	0:29:45	0.006534	0.10		
2035	0:30:00	0.063162	0.95		
2036	0:30:15	0.047916	0.72		
2037	0:30:30	0.102178	1.53		

Ahora el gasto mínimo se encuentra en el renglón marcado en amarillo y las celdas marcadas en verde son las tomadas para obtener el promedio de la hora.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

8.2.2 Comparativo de los coeficientes de variación medida horaria e instantánea

Sitio de medición: Torre Halcón (edificio de apartamentos). Con intervalo de medición 15 segundos.

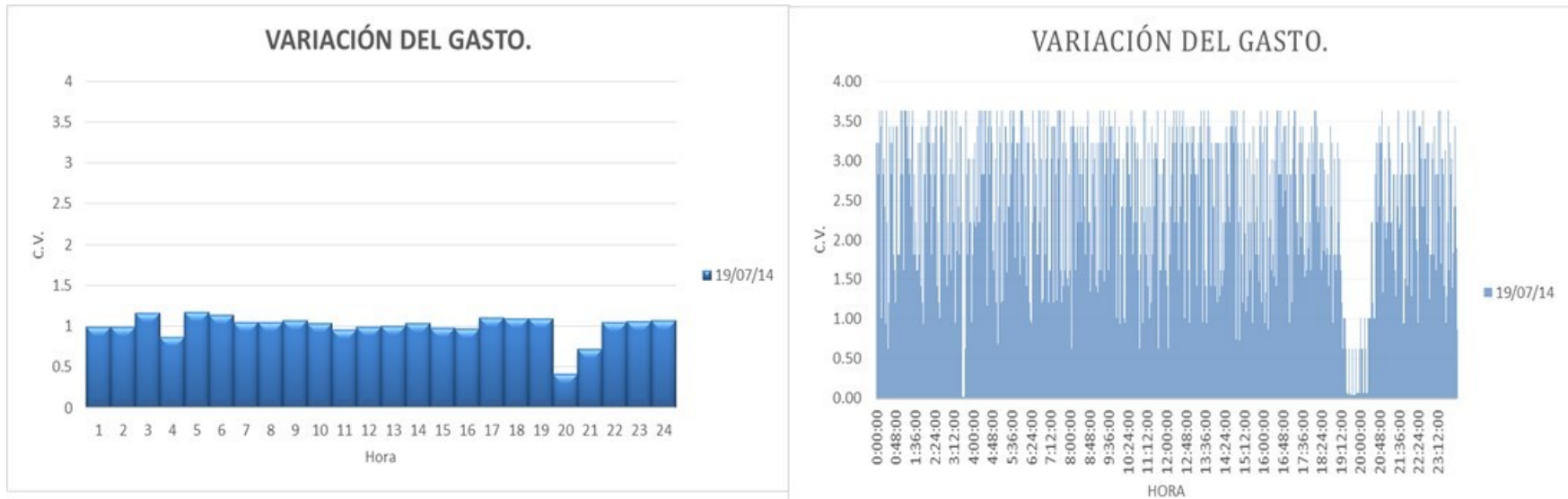


Ilustración 114. Grafico comparativo entre el gráfico del gasto medio (promedio) con respecto al grafico del gasto medio diario.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

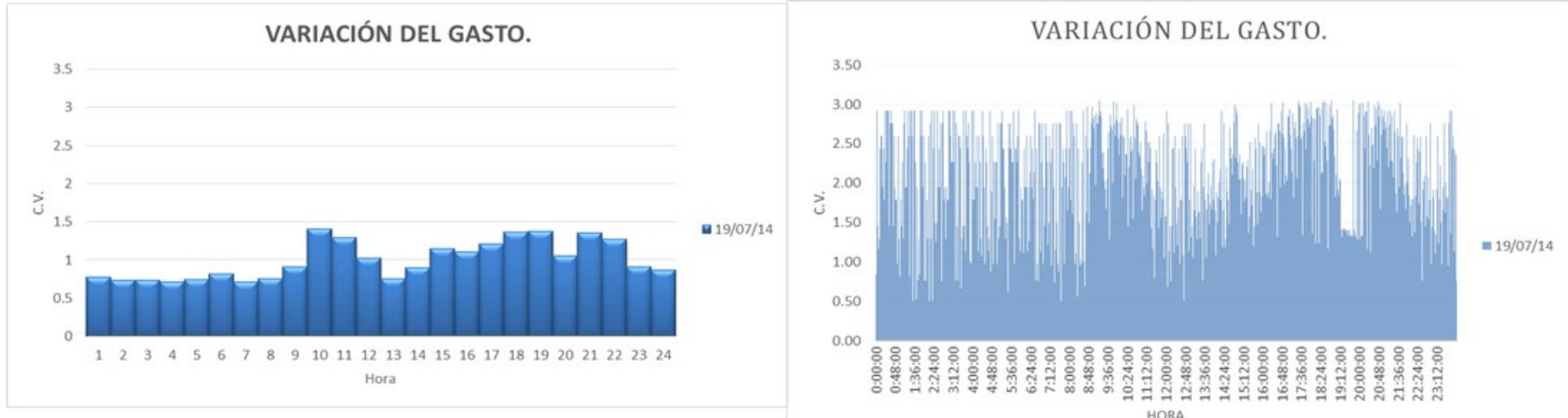


Ilustración 115. Grafico comparativo entre el gráfico del gasto promedio por horas con respecto al grafico del gasto medido.



Ilustración 116. Vista de la estructura con la que cuenta la Torre Halcón.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

Sitio de medición: Torre Ánimas (edificio de oficinas). Con intervalo de medición 15 segundos.

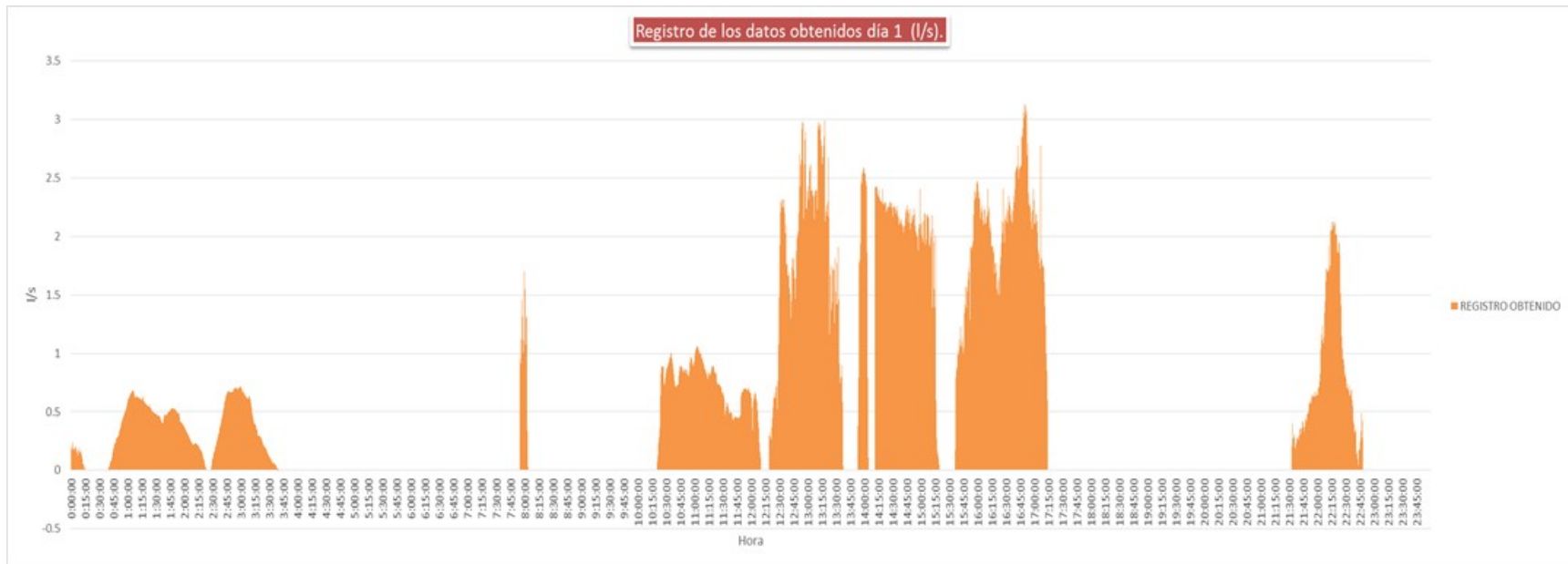


Ilustración 117. Gráfico del gasto instantáneo de la primera medición.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



Ilustración 118. Grafico del gasto instantáneo de la segunda medición.



Ilustración 119. Vista de la estructura con la que cuenta la torre Animas.

9 MEDICIONES CONTINUAS DE DEMANDA ESTOCÁSTICA DE AGUA POTABLE CON RESOLUCIÓN FINA EN MODELO DE LABORATORIO

9.1 Objetivo

Obtener la variación de la demanda instantánea de agua potable generada por varios accesorios sanitarios de tipo doméstico para los fines de su caracterización estocástica y análisis de errores de micromedición en presencia de almacenamiento intradomiciliario (tinacos)

9.2 Justificación

El desarrollo del proyecto incluye mediciones de la demanda de agua potable con fines de su caracterización estocástica para posterior uso en modelos matemáticos de las redes de agua potable. Estas mediciones deben efectuarse con resolución fina y registro electrónico continuo. El IMTA ha construido un modelo físico de tanque de almacenamiento con varios accesorios de uso del agua, tales como una llave, una ducha y un excusado, sobre el cual se llevaron a cabo tales mediciones.

9.3 Antecedentes

Debido a que los instantes exactos en que los usuarios usan el agua son aleatorios, a nivel tomas domiciliarias y red secundaria la demanda de agua potable tiene carácter estocástico que impacta directamente el comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en las redes de distribución, algo que no incluyen los paquetes de modelación a nivel internacional. Este comportamiento estocástico no obstante puede ser modelado, con el uso de métodos probabilísticos. Existen varios métodos de este tipo, como los de Poisson, Neyman Scott, y Barlett-Lewis entre otros, que por lo general representan el uso de agua potable a nivel domicilio y grupos de domicilios por medio de pulsos rectangulares. Cada pulso se caracteriza por cierta duración (en segundos) y cierta intensidad (en L/s), ambas de las cuales son parámetros aleatorios, necesarios para la implementación de los modelos, junto con la frecuencia de ocurrencia de los pulsos y las distribuciones de probabilidad correspondientes. La hipótesis de que los pulsos de demanda son rectangulares sin embargo no ha sido comprobada.

Por otro lado, los métodos de Poisson, Neyman Scott, y Barlett-Lewis entre otros han sido desarrollados en países donde el servicio de agua potable es continuo. Debido a la escasez y al no siempre buen manejo del agua potable, en muchos organismos operadores de México el suministro es intermitente (tandeado), es decir, se realiza por sectores y por unas cuantas horas al día, o una vez en varios días. Para tener agua en las horas sin suministro, los usuarios utilizan cisternas y/o tinacos en sus domicilios. Para analizar los procesos hidráulicos y físico químicos en los tinacos, un tema prácticamente no estudiado no solo en México sino a nivel internacional, se construyó un tinaco en acrílico en tamaño real para pruebas experimentales en el laboratorio de Hidráulica, perteneciente a la División de

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelos, con varios accesorios de uso del agua, sobre el cual se realizaron las mediciones de demanda estocástica de agua. Dichas mediciones servirán también para analizar los posibles errores de medición de los micromedidores habitualmente utilizados en México, en presencia de almacenamiento intradomiciliario (tinacos).

De esta forma, las mediciones de demanda estocástica con resolución fina realizadas se usarán para definir el patrón de la demanda para los usos de agua típicos en un domicilio y verificar la hipótesis de forma rectangular de los pulsos de demanda, así como para la determinación de sus parámetros estadísticos.

9.4 Metodología

Para cumplir con los objetivos se utilizó la siguiente metodología:

- Se instaló un Caudalímetro electromagnético antes del depósito para la medición de variación del caudal para diferentes consumos.
- Se instaló el mismo caudalímetro electromagnético después del depósito para la medición de la variación del caudal para diferentes consumos.
- Se instaló el Caudalímetro electromagnético directamente a los accesorios obviando el depósito.
- Se realizaron 30 mediciones (10 por cada accesorio) para la determinación de la variación de caudal en el uso del agua con diferentes accesorios individuales, con la posición del Caudalímetro antes del depósito.
- Se realizaron 30 mediciones (10 por cada accesorio) para la determinación de la variación de caudal en el uso del agua con diferentes accesorios individuales, con la posición del Caudalímetro después del depósito.
- Se realizaron 30 mediciones (10 por cada accesorio) para la determinación de la variación de caudal en el uso del agua con diferentes accesorios individuales, con la posición del Caudalímetro obviando el depósito.
- Se realizaron 30 mediciones (10 por cada accesorio) para la determinación de la variación de caudal en el uso del agua con diferentes accesorios individuales, con el depósito lleno, con la posición del Caudalímetro antes del depósito y con la instalación de un medidor domiciliario normal.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

- Se realizaron mediciones por cuatro días de la variación del caudal de suministro con demanda de agua de un domicilio simulada en laboratorio y comparándolo con las lecturas de un micromedidor domiciliario normal.

9.5 Área de estudio

Los experimentos se realizaron en el laboratorio de Hidráulica de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, campus Morelos, localizado en el interior del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. En la Foto 1 del álbum fotográfico de este capítulo del informe se ilustra el sistema de depósitos y los accesorios.

9.6 Materiales

El sistema comprende de un tinaco en acrílico a escala real de 1,100 litros, que es alimentado por dos tinacos de 450 litros (ver Foto 2, del álbum fotográfico). Después del tinaco en acrílico se instalaron tres accesorios como una regadera, un escusado y una llave (ver Foto 3, del álbum fotográfico), para la medición de la variación de caudal. Por último después de los accesorios se instaló un tanque de 245 litros (ver Foto 4, del álbum fotográfico), para la medición del volumen usado en las mediciones.

Para las mediciones se utilizaron tres tipos de medidores de caudal o Caudalímetros:

9.6.1 Sistema de Caudalímetro electromagnético

El primero es un Caudalímetro electromagnético AquaMaster3 de ABB. Este es un medidor electromagnético con un amplio rango de caudal, con óptima precisión y calibración estable a largo plazo. Esta característica de bajo caudal permite medir los caudales nocturnos mínimos, que anteriormente no se registraban, lo cual es particularmente importante en aplicaciones de mediciones de facturación por volumen y mediciones en distritos. El diámetro interior libre del AquaMaster3 elimina la posibilidad de daños por partículas. Por otro lado, la ausencia de partes móviles y de fácil desgaste garantiza este nivel de rendimiento único a largo plazo. El diseño único del sensor del AquaMaster3 de paso reducido adecua el perfil de caudal a la sección de medición, de modo que se reducen las deformaciones del perfil, tanto aguas arriba como aguas abajo, dando lugar a un rendimiento de medición in situ excelente, incluso en condiciones de instalación hidráulica precaria. Las pruebas de perturbaciones hidráulicas llevadas a cabo durante el proceso de aprobación según OIML R49 han confirmado una precisión garantizada de acuerdo con la Clase 1 y la Clase 2, incluso si los elementos causantes de las perturbaciones están atornillados directamente al medidor, a cero diámetros tanto aguas arriba como aguas abajo. La versión de paso reducido de AquaMaster3 cumple con la directiva sobre instrumentos de medición (MID) de la UE. La aprobación es para:

- Precisión de clase 1 y clase 2 (opción de calibración)

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

- Clase medioambiental T50 para temperaturas del agua entre 0,1 y 50 °C (de 32,18 a 122 °F)
- Entorno electromagnético E2 (10 V/m)
- Cualquier orientación de la tubería
- 0 diámetros aguas arriba
- 0 diámetros aguas abajo
- Transmisor integral o remoto (cable de <200 m [656 pies])
- Flujo bidireccional

En el Cuadro 5 se muestran las especificaciones de caudal del medidor electromagnético utilizado.

Cuadro 5. Especificaciones del caudalímetro electromagnético.

Tamaño		Especificaciones Clase 2			Especificaciones Clase 1					
mm	"	Q ₁ m ³ /h (Ugal / min)	Q ₂ m ³ /h (Ugal / min)	Q _{0,25%} m ³ /h (Ugal / min)	Q ₂ m ³ /h (Ugal / min)	Q ₁ m ³ /h (Ugal / min)	R	Q ₂ m ³ /h (Ugal / min)	Q ₁ m ³ /h (Ugal / min)	R
15	1/2	5 (22)	4 (18)	0,11 (0,48)	0,010 (0,044)	0,006 (0,026)	630	0,016 (0,070)	0,010 (0,04)	400
20	3/4	7,9 (35)	6,3 (27,74)	0,18 (0,79)	0,016 (0,070)	0,010 (0,044)	630	0,025 (0,11)	0,016 (0,070)	400
25	1	12,5 (55)	10 (44)	0,29 (1,27)	0,025 (0,11)	0,016 (0,070)	630	0,04 (0,176)	0,025 (0,11)	400
40"	1 1/2	31 (138)	25 (110)	1,5 (6,6)	0,063 (0,28)	0,040 (0,176)	630	0,1 (0,44)	0,063 (0,28)	400
50"	2	50 (220)	40 (176)	1,5 (6,6)	0,1 (0,44)	0,063 (0,277)	630	0,16 (0,70)	0,1 (0,44)	400
65	2 1/2	79 (247)	63 (277)	3 (13,2)	0,16 (0,7)	0,1 (0,44)	630	0,25 (1,10)	0,16 (0,70)	400
80"	3	125 (550)	100 (440)	3 (13,2)	0,3 (1,32)	0,16 (0,70)	630	0,4 (1,76)	0,25 (1,10)	400
100"	4	200 (880)	160 (704)	4,6 (20,25)	0,41 (1,8)	0,25 (1,10)	630	0,64 (2,82)	0,4 (1,76)	400
125	5	200 (880)	160 (704)	4,6 (20,25)	0,41 (1,8)	0,25 (1,10)	630	0,64 (2,82)	0,4 (1,76)	400
150"	6	500 (2200)	400 (1760)	11,4 (50,19)	1,0 (4,40)	0,63 (2,77)	630	1,6 (7,04)	1,0 (4,40)	400
200"	8	788 (3470)	630 (2774)	18 (79,25)	1,6 (7,04)	1,0 (4,40)	630	2,5 (11,01)	1,6 (7,04)	400
250"	10	1250 (5504)	1000 (4400)	29 (127,7)	2,5 (11,01)	1,6 (7,04)	630	4,0 (17,61)	2,5 (11,01)	400
300"	12	2000 (8806)	1600 (7045)	46 (202)	4,1 (18,05)	2,5 (11,01)	630	6,4 (28,18)	4,0 (17,61)	400
350	14	2000 (8806)	1600 (7045)	80 (352)	6,4 (28,18)	4,0 (17,61)	400	12,8 (56,35)	8,0 (35,22)	200
375	15	2000 (8806)	1600 (7045)	80 (352)	6,4 (28,18)	4,0 (17,61)	400	12,8 (56,35)	8,0 (35,22)	200
400	16	3125 (13760)	2500 (11007)	125 (550)	10 (44)	6,3 (27,74)	400	20 (88,06)	12,5 (55,04)	200
450	18	3125 (13760)	2500 (11007)	125 (550)	10 (44)	6,3 (27,74)	400	20 (88,06)	12,5 (55,04)	200
500	20	5000 (22014)	4000 (17610)	200 (880)	16 (70,45)	10 (44)	400	32 (140,9)	20 (88,05)	200
600	24	7875 (34670)	6300 (27740)	315 (1387)	25,2 (110,9)	15,8 (69,56)	400	50,4 (221,9)	31,5 (138,7)	200

Las siguientes son las especificaciones del transmisor AquaMaster3 utilizado en las mediciones:

- Sistema de Caudalímetro electromagnético AquaMaster3, de paso reducido y montaje remoto.
- Diámetro nominal: DN 15 mm (media pulgada)
- Material: PPS
- Diseño del electrodo: Estándar
- Material de medida del electrodo: Stainless steel 316
- Accesorios de conexión a tierra: Ninguno
- Tipo de conexión de proceso: Male thread acc. ISO 228 / DIN 2999 (conical)
- Material de conexión de proceso: Latón:
- Certificaciones de uso: Estándar (Sin PED)
- Tipo de calibración: Calibración estándar de fábrica

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

- Tipo y longitud de señal del cable: Cable de 5 metros
- Certificación de protección a explosión: Uso general
- Clase de protección del transmisor/Clase de protección del sensor: IP 68 (NEMA 6P) / IP 68 (NEMA 6P).
- Conducción del cable: Estilo MIL
- Suministro de energía: Corriente alterna + batería de alta duración
- Tipo de configuración/tipo de diagnóstico: Parámetros establecidos a los valores predeterminados de fábrica / funciones activadas de diagnóstico estándar
- Protocolo y registrador: Logger con protocolo genérico (LogMaster)
- Tipo de verificación: CallMaster
- Número de puntos de prueba: 3
- Pantalla: Pantalla de 8 mm (0,31 pulg.) de altura para totales
- Almacenamiento de datos: Integrado de datos de caudal de alta resolución con un mínimo de 11361 registros e Intervalo de Registro de Intervalo de registro de 15 a 65.500 s
- Impermeabilidad total, incluso en inundaciones
- Conforme con las especificaciones OIML R49
- Salidas de alarma e impulso con tres conmutadores bidireccionales de estado sólido con aislamiento común
- Software de comunicación con computadora
- Cable de configuración RS232
- Rango de presión 1600 kPa / 16 bar / 232 psi

9.6.2 *Micromedidor domiciliario normal*

Para las mediciones también se utilizó un micromedidor domiciliario de marca Badger Meter tipo Recordall. Estos tipos de micromedidores son de desplazamiento positivo, en el que el registrador es un totalizador mecánico de seis dígitos, y tiene además un círculo de prueba de 360° con barrido en sentido de las agujas del reloj. El engranaje de registro se autolubrica para reducir la mínima fricción y proporcionar una larga vida útil y fiable. El micromedidor es de sellado permanente para evitar la humedad, la suciedad y la introducción de otros contaminantes.

9.7 Resultados

1. Instalación del caudalímetro electromagnético antes del depósito para la medición de la variación del caudal para diferentes consumos: En la Foto 6, del álbum fotográfico, se observa la instalación del caudalímetro electromagnético antes del depósito. Como se puede ver en la Foto 6, el caudalímetro electromagnético se ubica después de los tinacos de alimentación y antes del tinaco de acrílico, así mismo en esta foto se observa la instalación del micromedidor domiciliario. En las Fotos 7 y 8 se muestra a más a detalle la instalación de este caudalímetro.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

2. Instalación del caudalímetro electromagnético después del depósito para la medición de la variación del caudal para diferentes consumos: En las Fotos 9, 10, 11 y 12 se observa la instalación del caudalímetro electromagnético a la salida del tinaco en acrílico y antes de los accesorios. Así mismo se instaló después del Caudalímetro electromagnético el micromedidor domiciliario normal.
3. Instalación del caudalímetro electromagnético directamente a los accesorios obviando el depósito: Como se puede observar en la Foto 13 el caudalímetro electromagnético y el micromedidor domiciliario se encuentran antes del tinaco en acrílico, después se conectó una manguera hasta la entrada de la tubería que alimenta a los accesorios, ver Fotos 14 y 15.

Se realizaron en total 30 mediciones de la variación del caudal en el uso del agua con diferentes accesorios individuales (ver Fotos 16, 17 y 18), con la posición del caudalímetro antes del depósito. Esta prueba consistió en hacer accionar los accesorios (10 veces para escusado, 10 veces para regadera y 10 veces para llave) y registrar las mediciones hechas por el caudalímetro electromagnético. Cabe aclarar que en esta prueba el agua estaba siempre en circulación, ya que el tinaco no estaba totalmente lleno.

En la Ilustración 120 se muestra el comportamiento del caudal registrado por el caudalímetro electromagnético. El intervalo de registro con el caudalímetro fue de cada segundo, consiguiéndose así un total de 4,935 registros, con un tiempo total acumulado de 1 hora y 14 minutos, en la que duró la prueba.

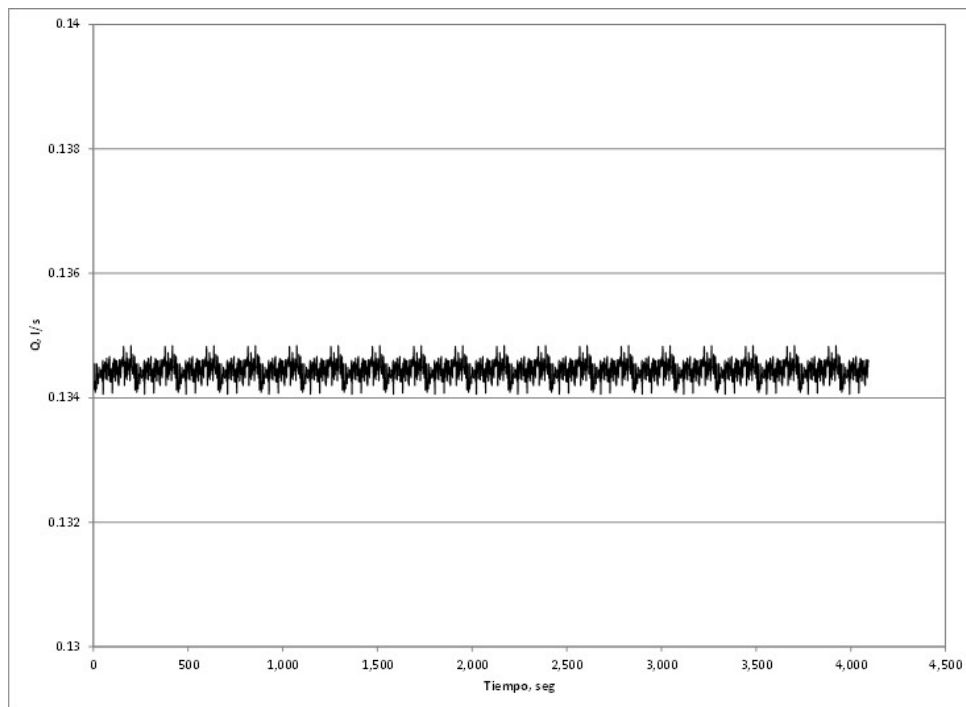


Ilustración 120. Variación de caudal del caudalímetro electromagnético antes del depósito.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

Para esta prueba se realizaron en total 30 mediciones de la variación del caudal en el uso del agua con diferentes accesorios individuales, con la posición del caudalímetro después del depósito. Esta prueba consistió en hacer accionar los accesorios de la siguiente forma: Dos veces para escusado, dos veces para llave, dos veces para regadera, dos veces para escusado, dos veces para llave, dos veces para regadera, una vez para escusado, una vez para llave y una vez para regadera, volviéndose a repetir estas 15 acciones hasta completar 30. En las Ilustraciones 121 a la 150 se muestran los registros cada segundo con el caudalímetro electromagnético para cada acción.

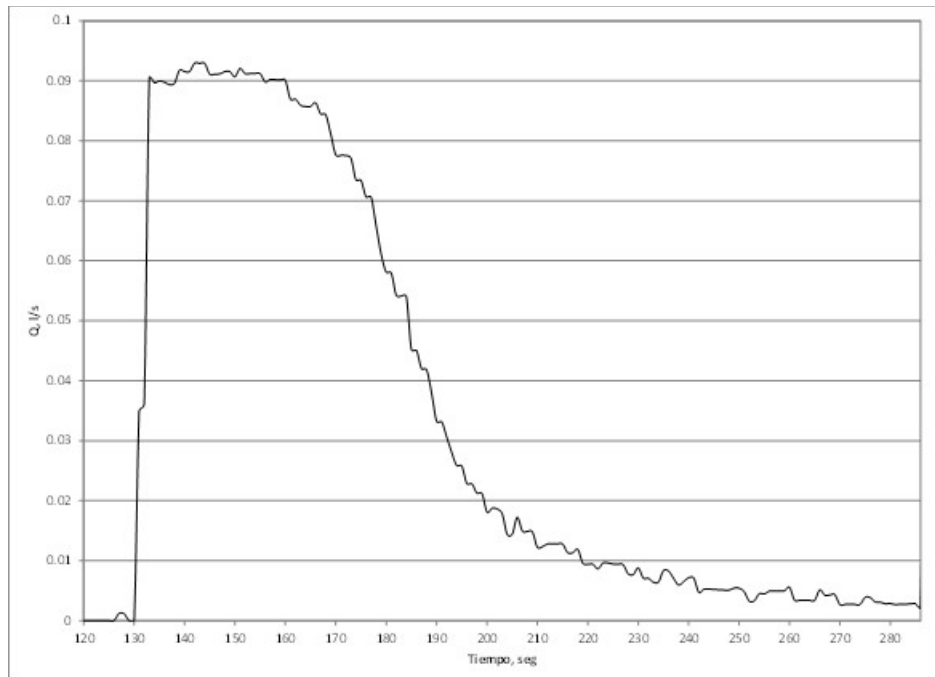


Ilustración 121. Variación de la medición 1 con el caudalímetro electromagnético después del tinaco accionando el escusado.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

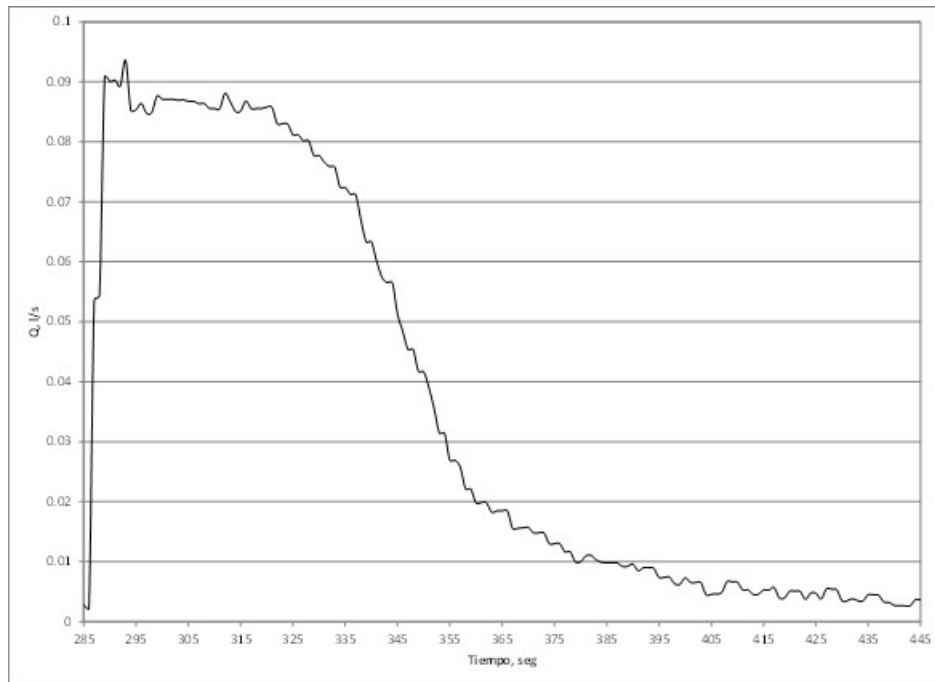


Ilustración 122. Variación de la medición 2 con el caudalímetro electromagnético después del tinaco accionando el escusado.

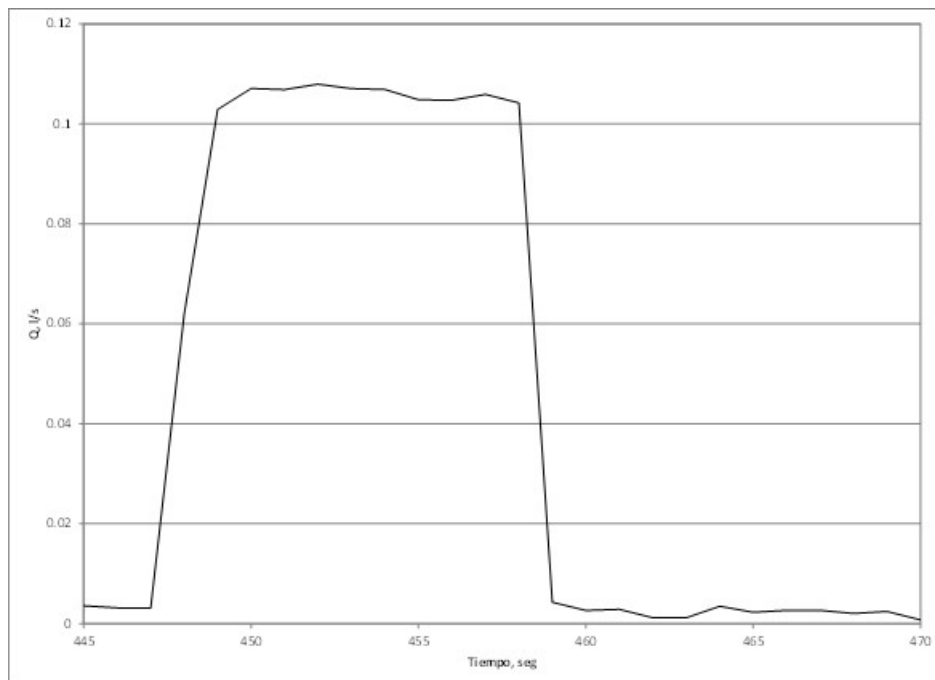


Ilustración 123. Variación de la medición 3 con el caudalímetro electromagnético después del tinaco accionando la llave.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

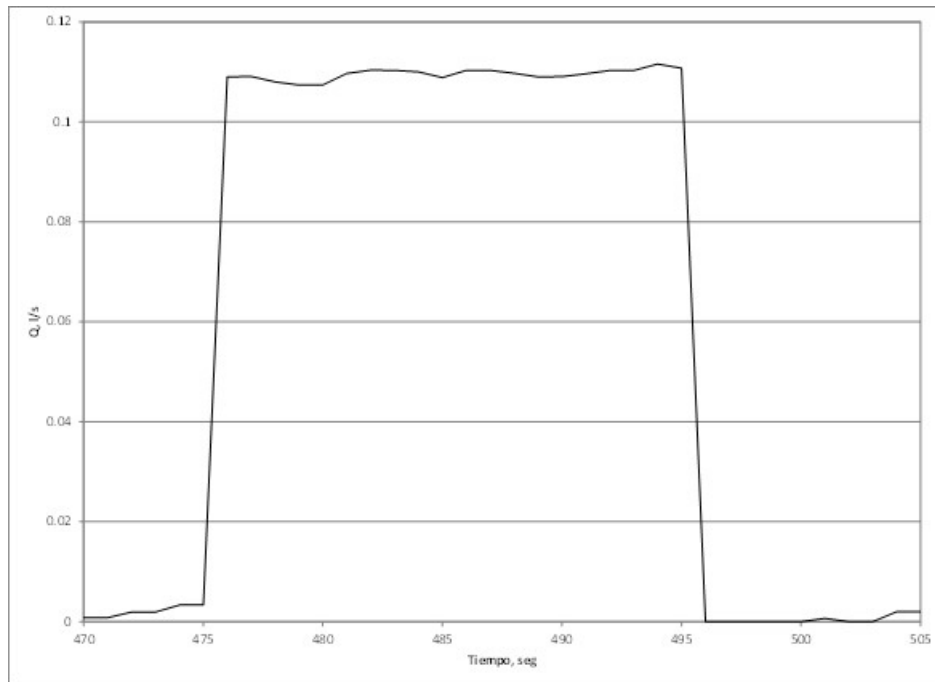


Ilustración 124. Variación de la medición 4 con el caudalímetro electromagnético después del tinaco accionando la llave.

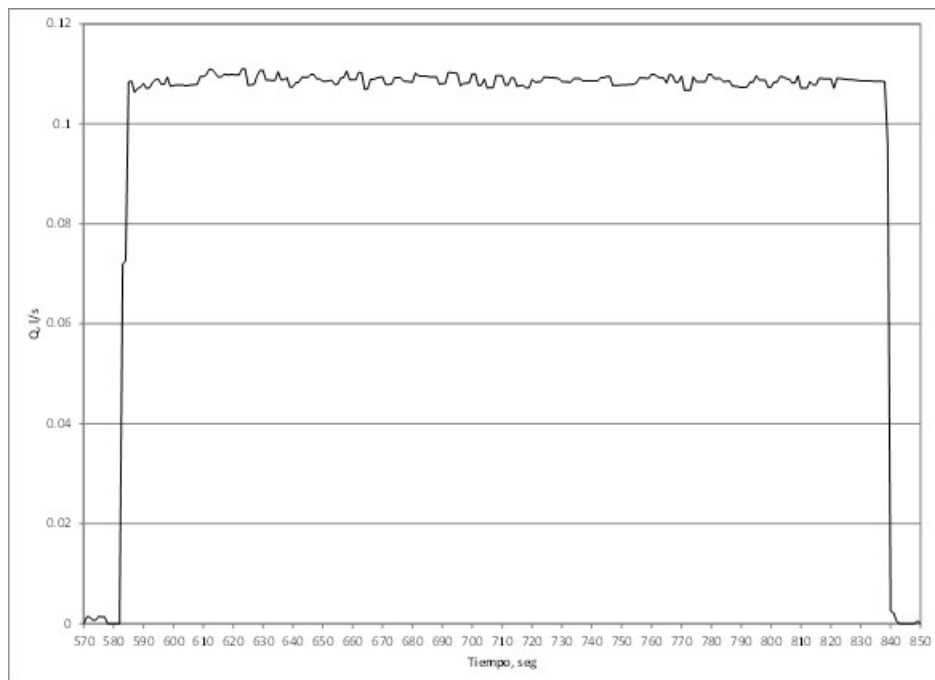


Ilustración 125. Variación de la medición 5 con el caudalímetro electromagnético después del tinaco accionando la regadera.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

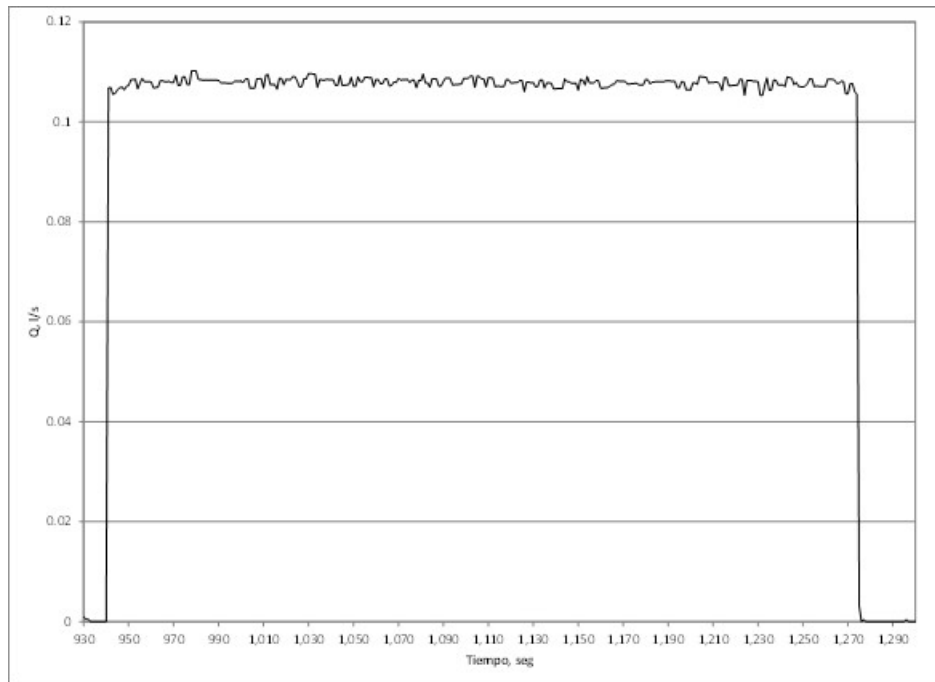


Ilustración 126. Variación de la medición 6 con el caudalímetro electromagnético después del tinaco accionando la regadera.

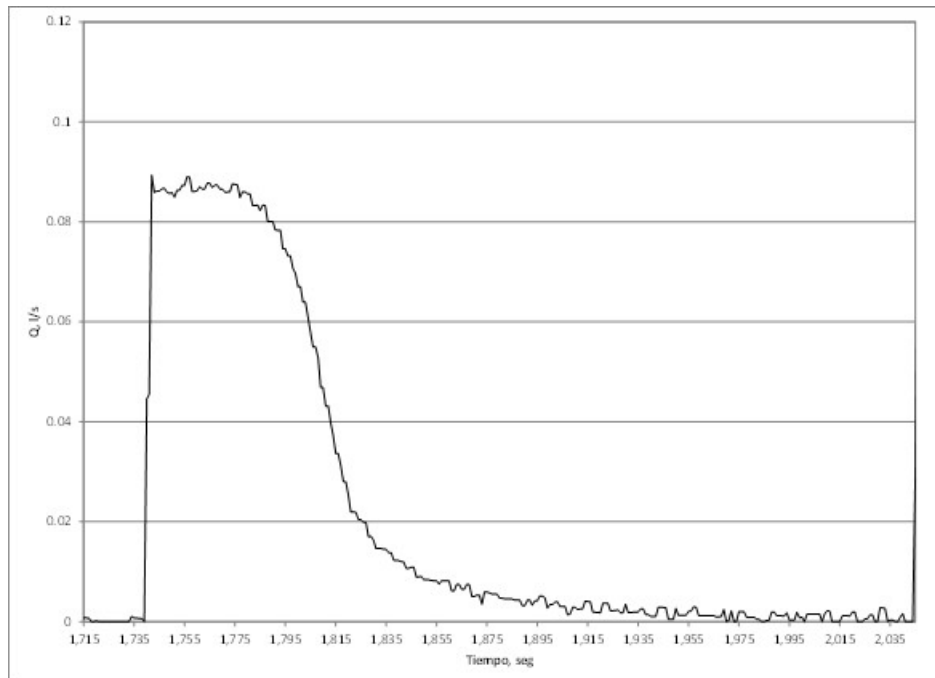


Ilustración 127. Variación de la medición 7 con el caudalímetro electromagnético después del tinaco accionando el escusado.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

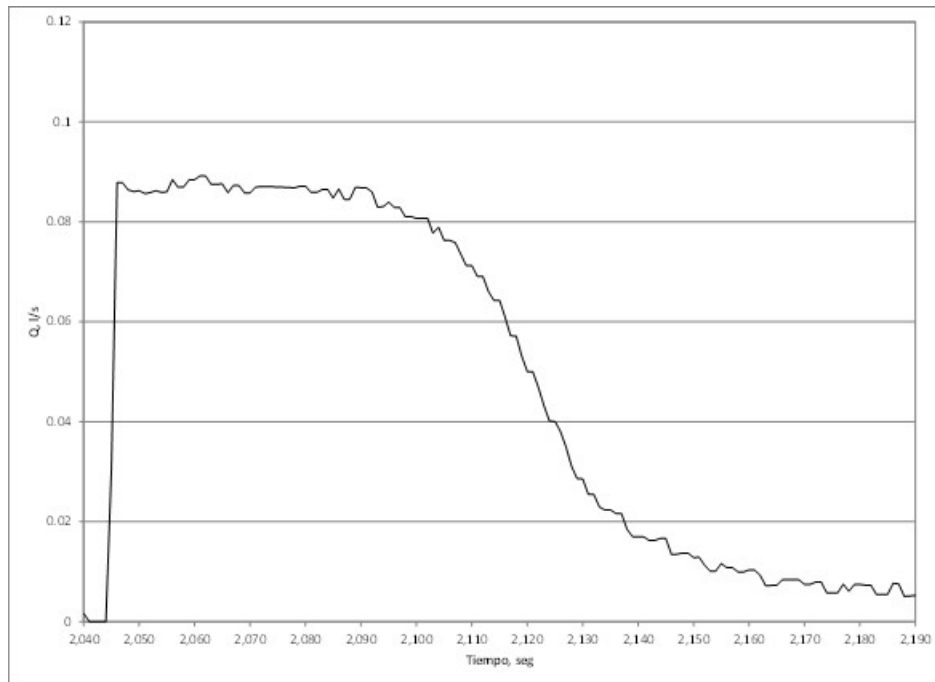


Ilustración 128. Variación de la medición 8 con el caudalímetro electromagnético después del tinaco accionando el escusado.

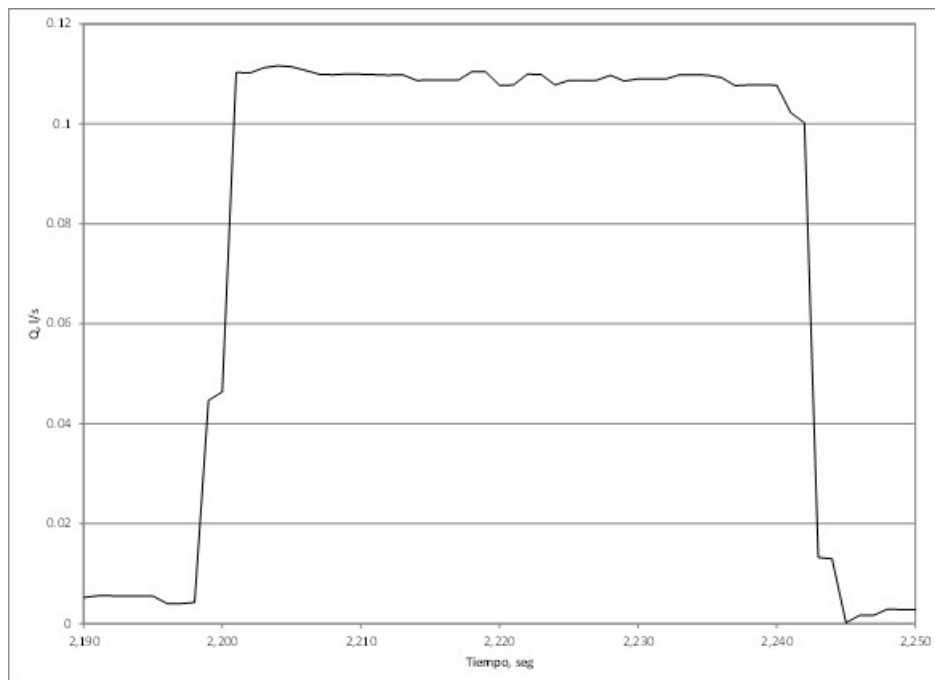


Ilustración 129. Variación de la medición 9 con el caudalímetro electromagnético después del tinaco accionando la llave.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

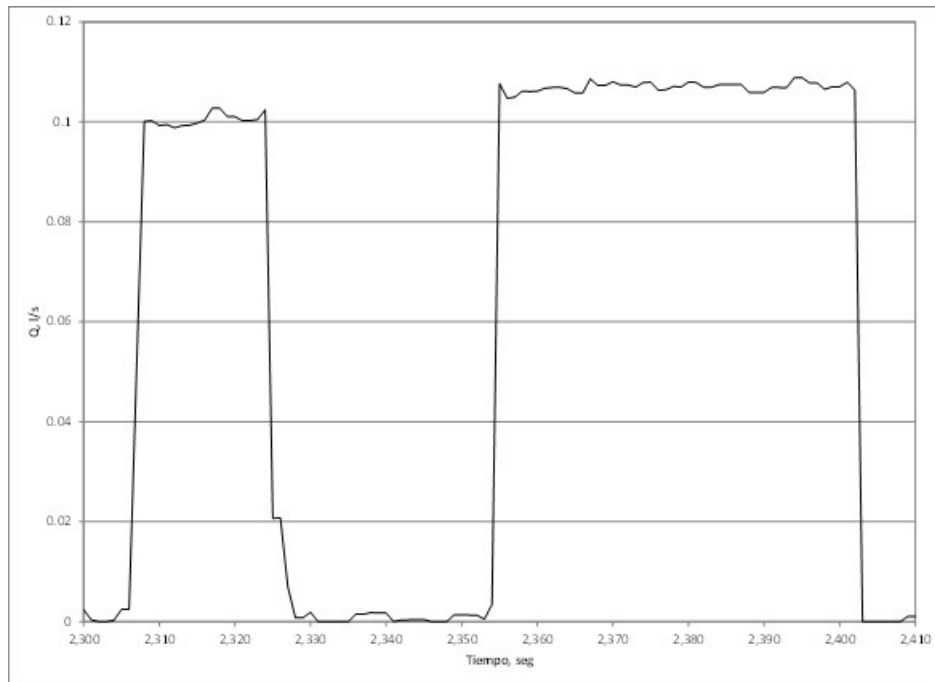


Ilustración 130. Variación de la medición 10 con el caudalímetro electromagnético después del tinaco accionando la llave.

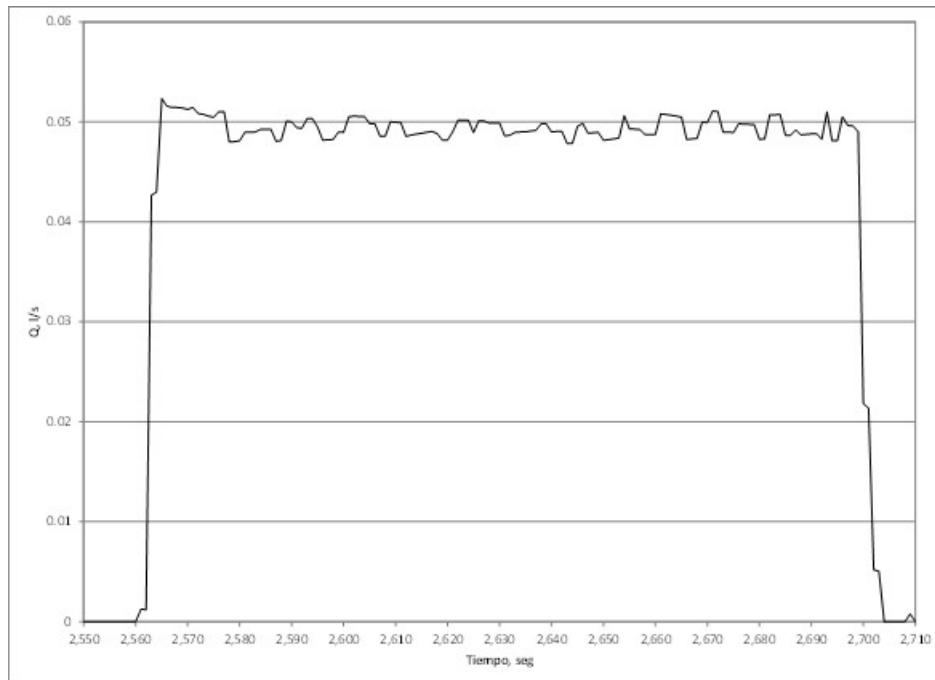


Ilustración 131. Variación de la medición 11 con el caudalímetro electromagnético después del tinaco accionando la regadera.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

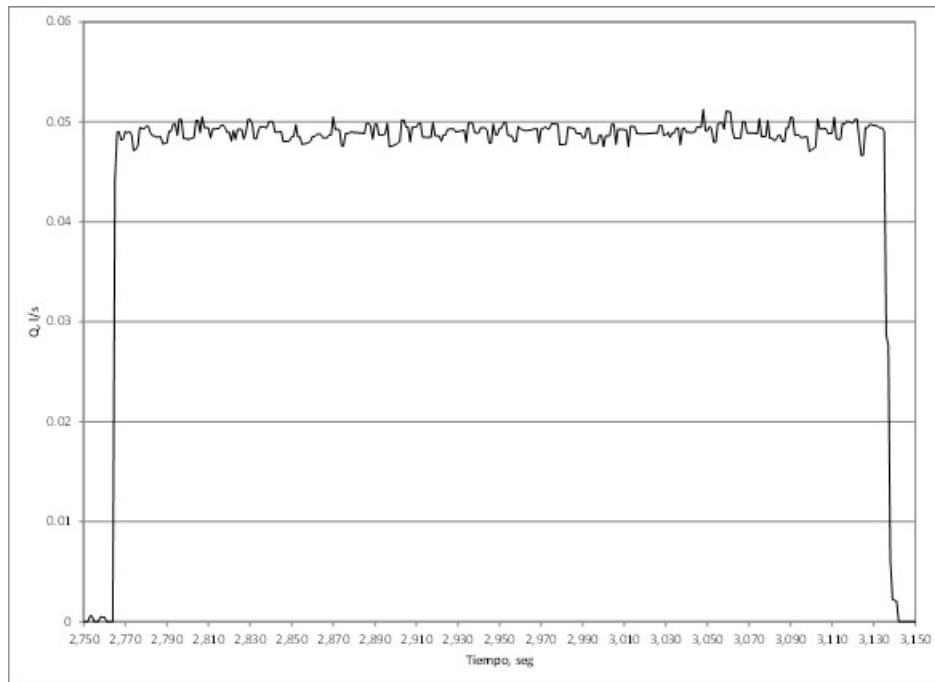


Ilustración 132. Variación de la medición 12 con el caudalímetro electromagnético después del tinaco accionando la regadera.

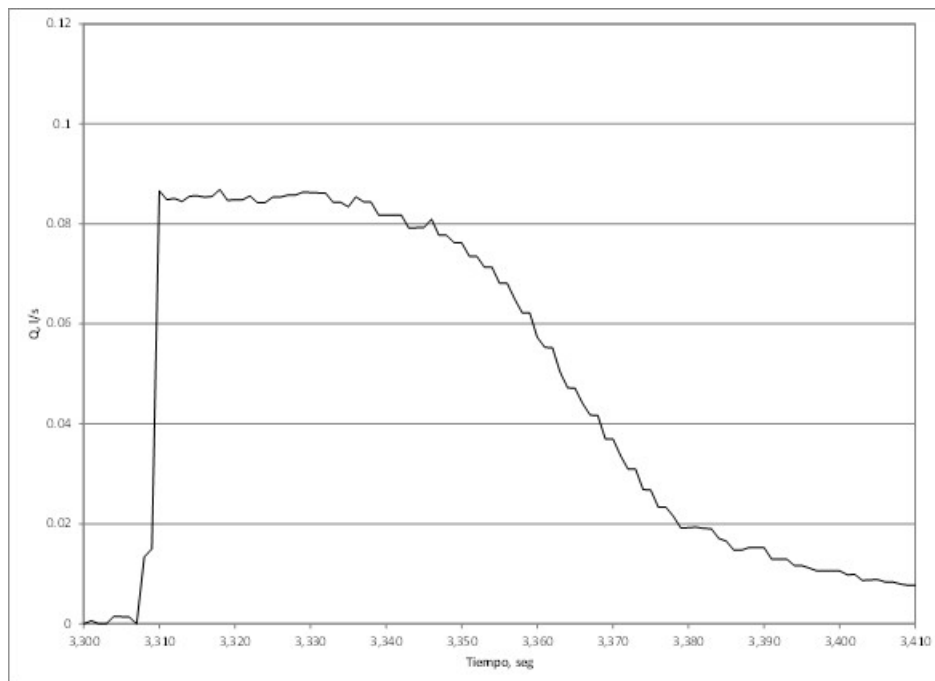


Ilustración 133. Variación de la medición 13 con el caudalímetro electromagnético después del tinaco accionando el escusado.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

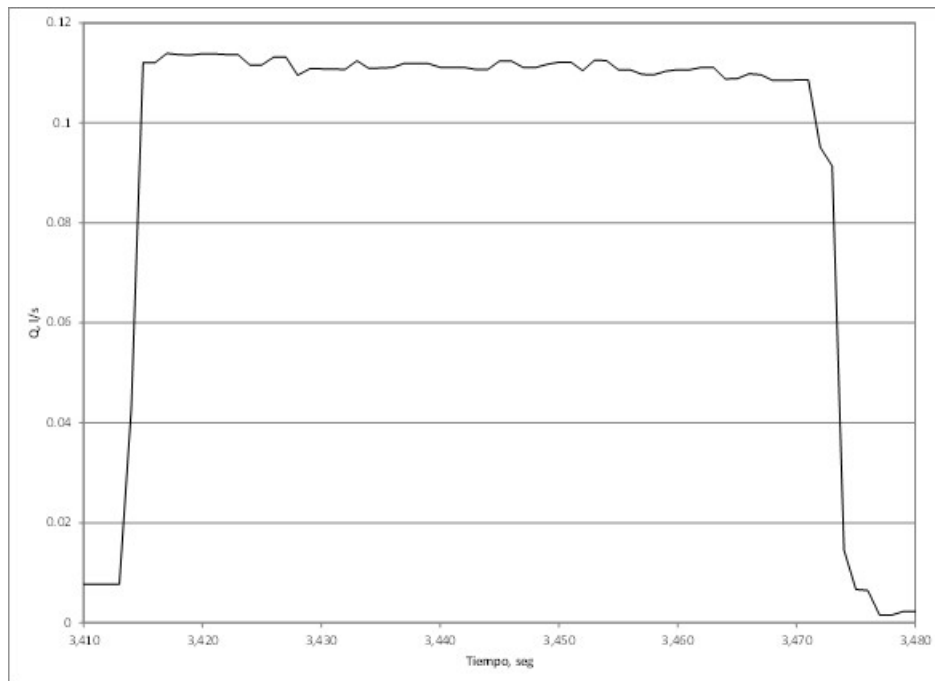


Ilustración 134. Variación de la medición 14 con el caudalímetro electromagnético después del tinaco accionando la llave.

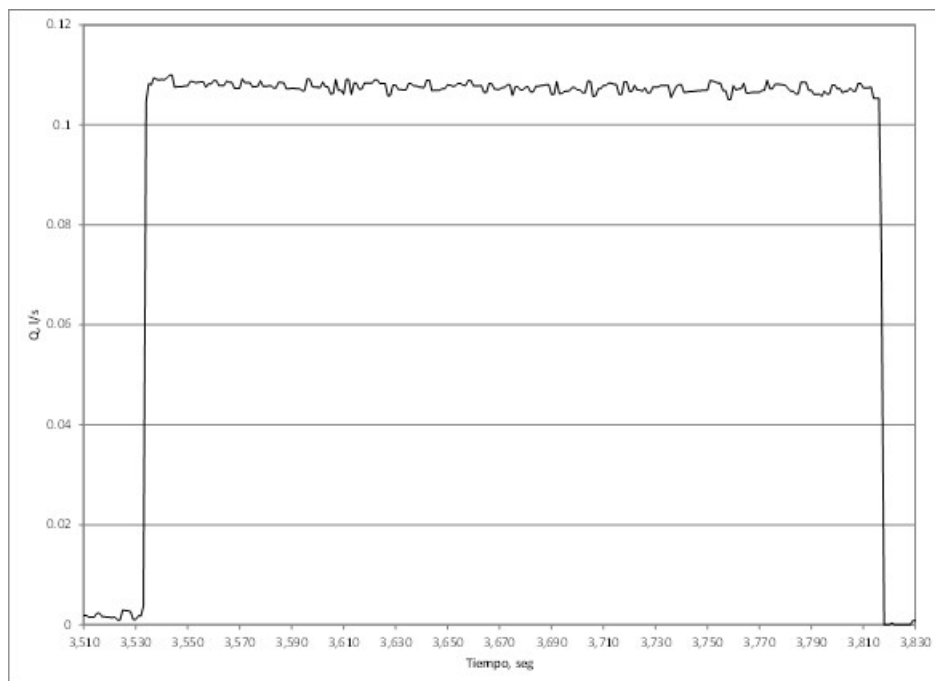


Ilustración 135. Variación de la medición 15 con el caudalímetro electromagnético después del tinaco accionando la regadera.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

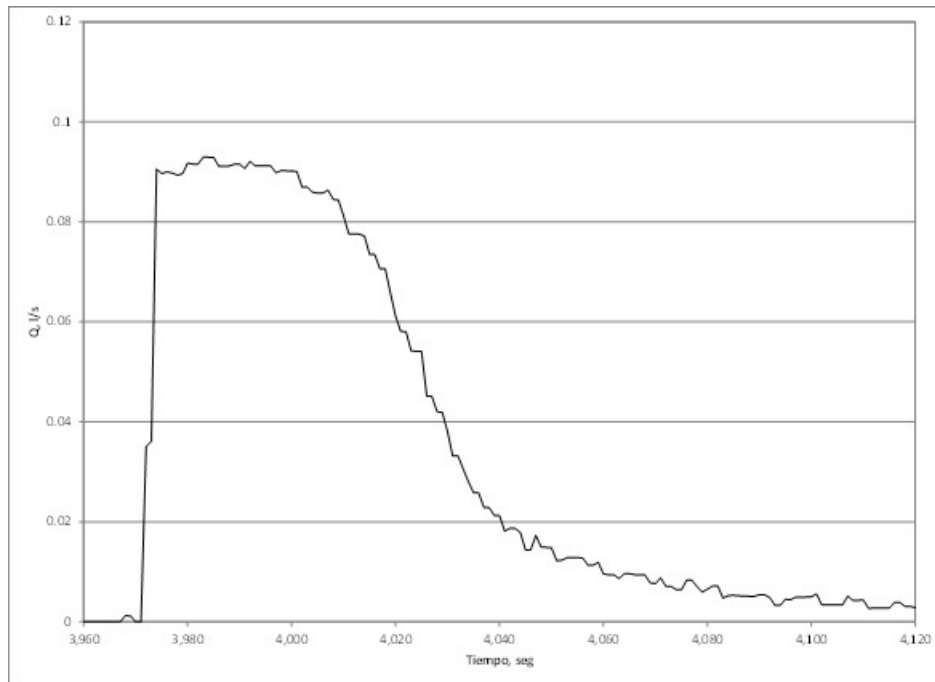


Ilustración 136. Variación de la medición 16 con el caudalímetro electromagnético después del tinaco accionando el escusado.

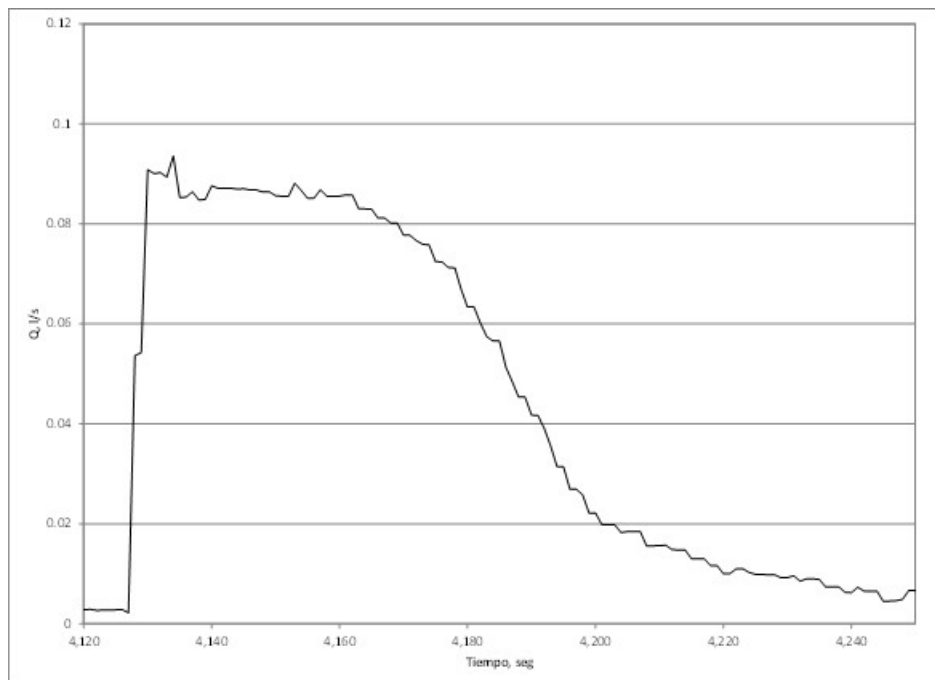


Ilustración 137. Variación de la medición 17 con el caudalímetro electromagnético después del tinaco accionando el escusado.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

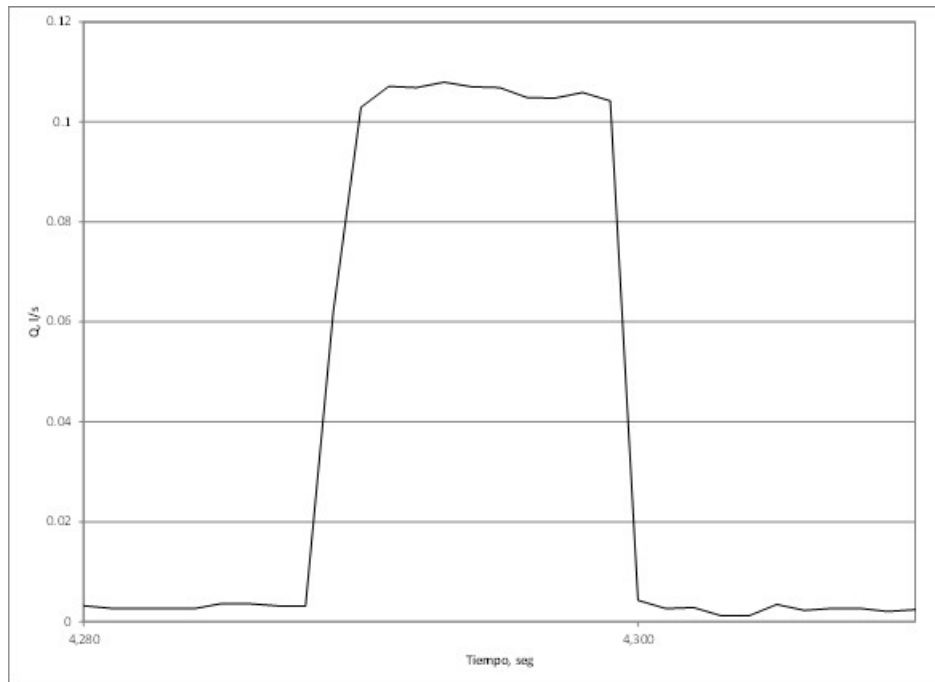


Ilustración 138. Variación de la medición 18 con el caudalímetro electromagnético después del tinaco accionando la llave.

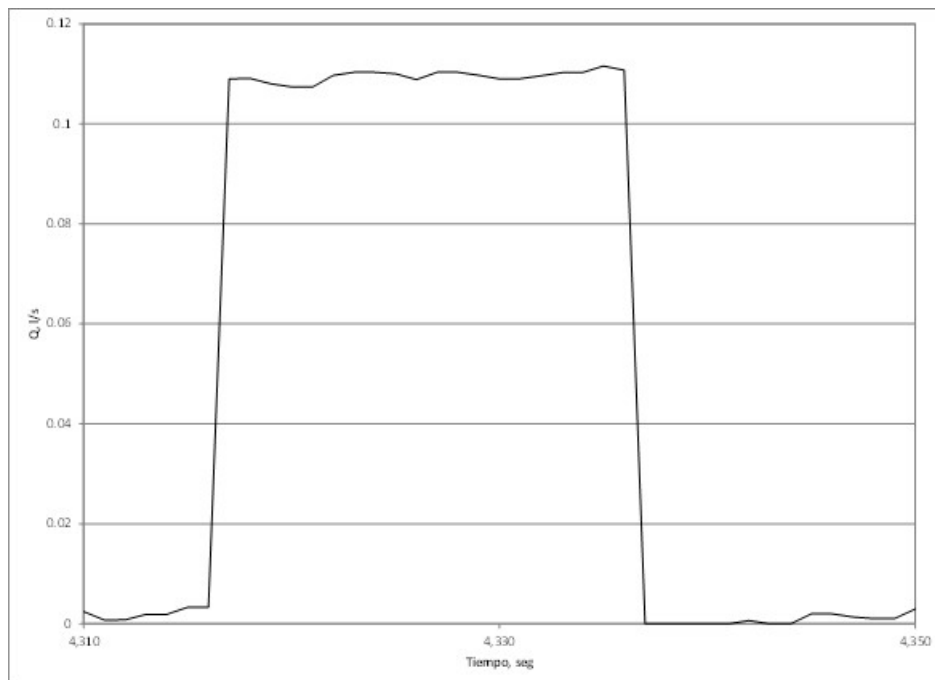


Ilustración 139. Variación de la medición 19 con el caudalímetro electromagnético después del tinaco accionando la regadera.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

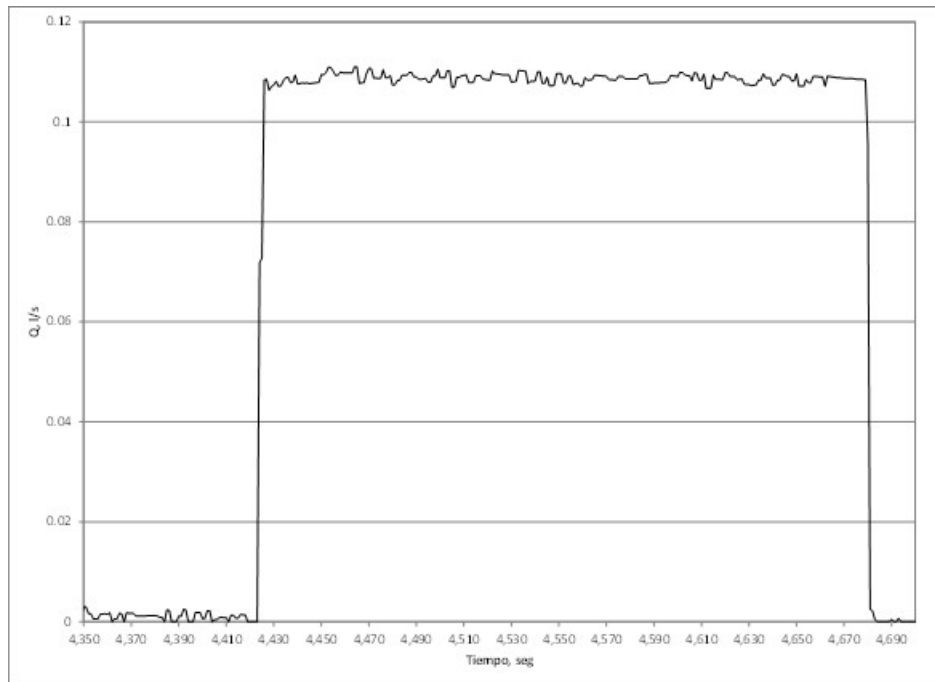


Ilustración 240. Variación de la medición 20 con el caudalímetro electromagnético después del tinaco accionando la regadera.

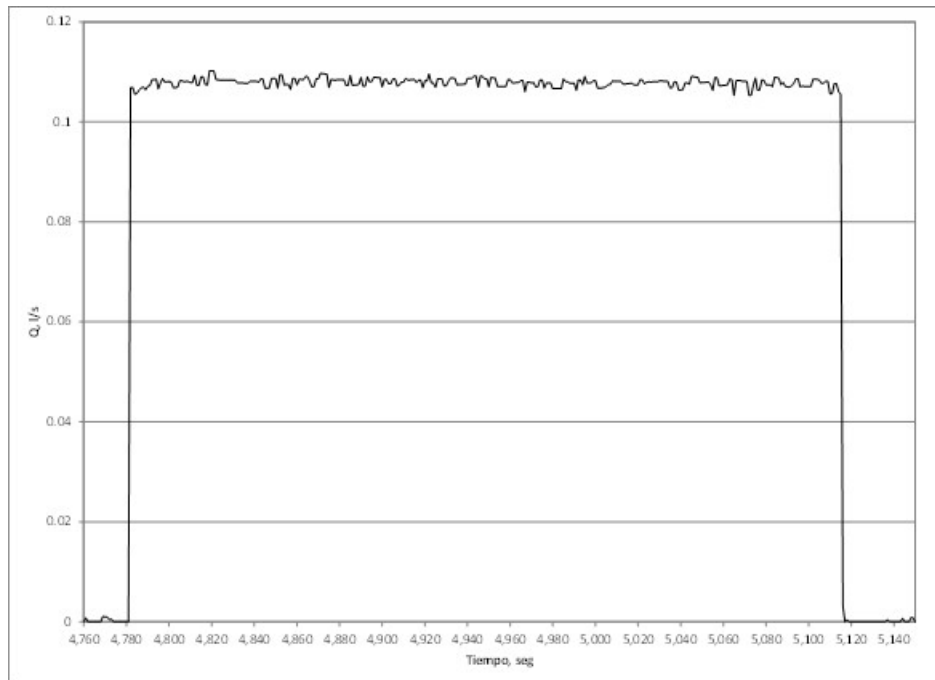


Ilustración 141. Variación de la medición 21 con el caudalímetro electromagnético después del tinaco accionando la regadera.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

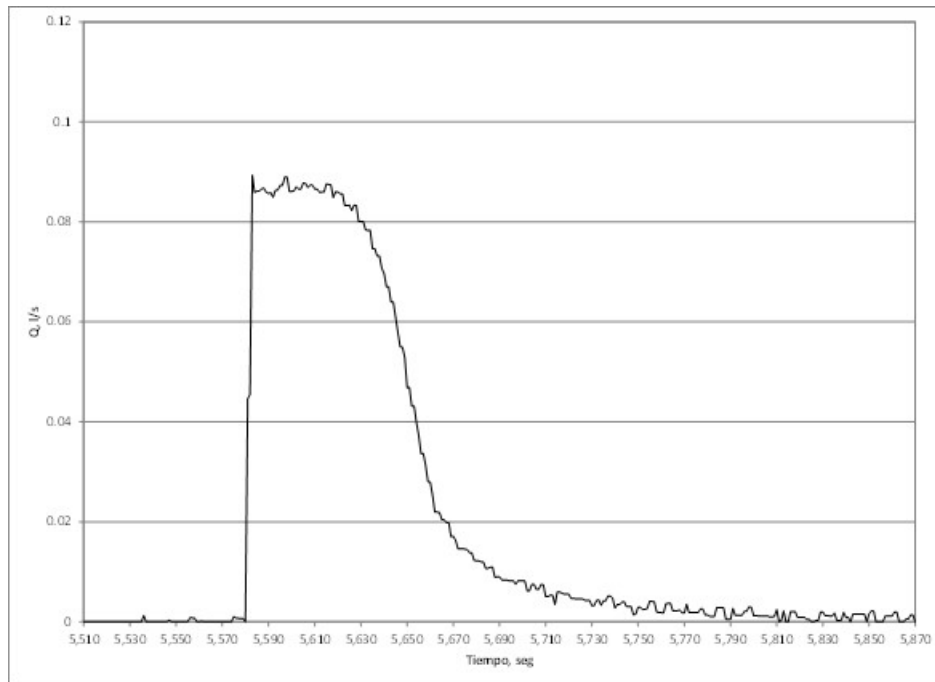


Ilustración 142. Variación de la medición 22 con el caudalímetro electromagnético después del tinaco accionando el escusado.

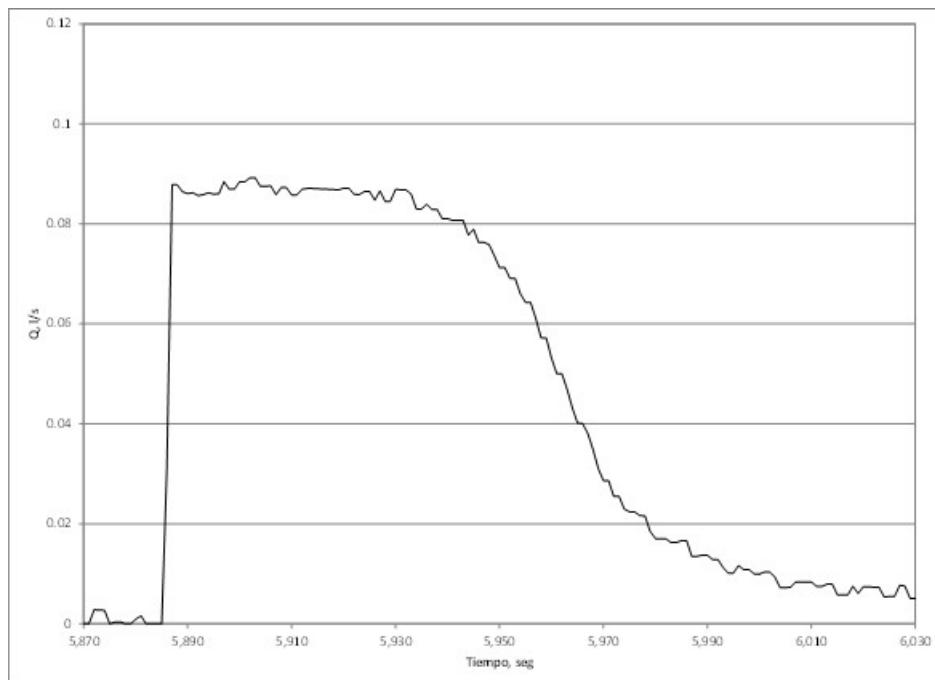


Ilustración 143. Variación de la medición 23 con el caudalímetro electromagnético después del tinaco accionando el escusado.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

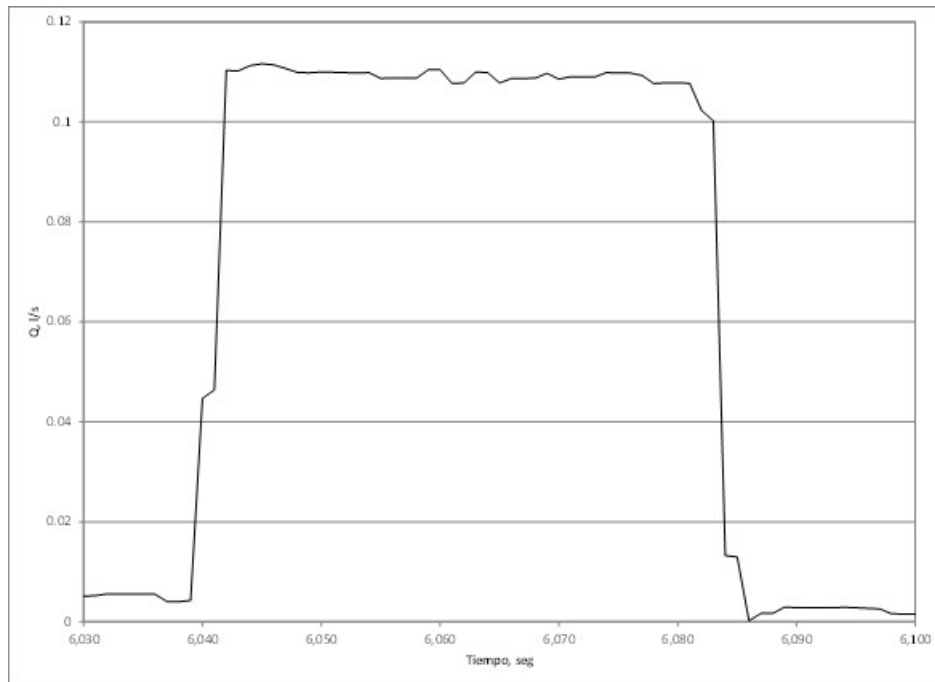


Ilustración 144. Variación de la medición 24 con el caudalímetro electromagnético después del tinaco accionando la llave.

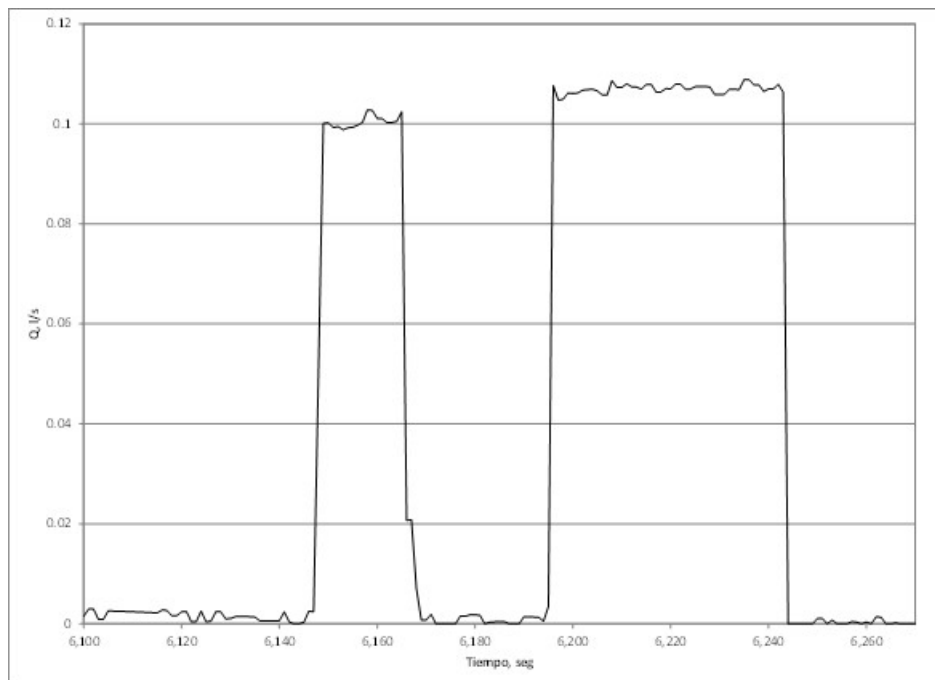


Ilustración 145. Variación de la medición 25 con el caudalímetro electromagnético después del tinaco accionando la llave.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

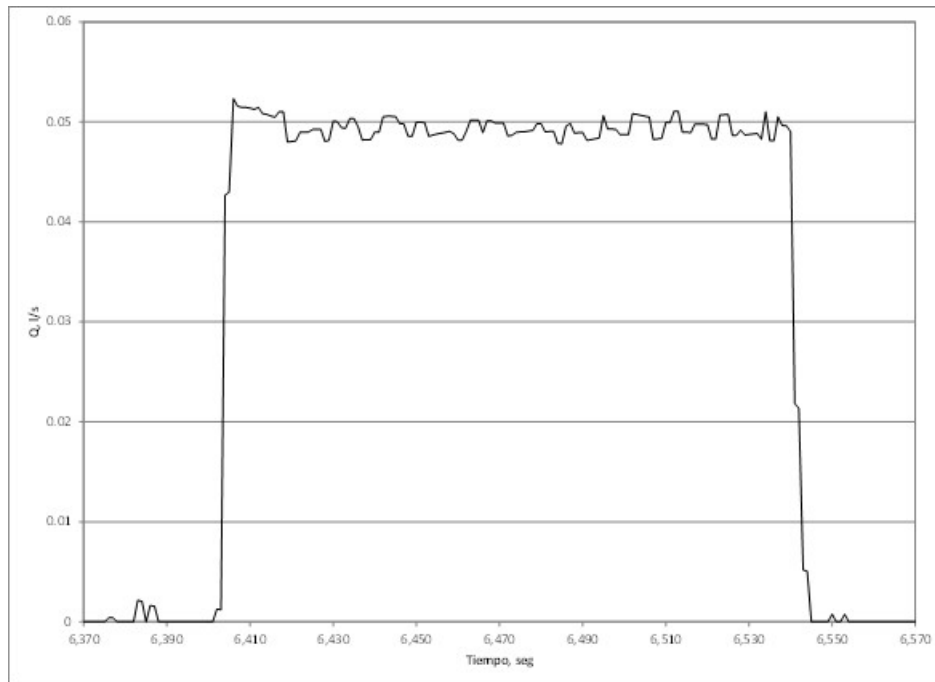


Ilustración 146. Variación de la medición 26 con el caudalímetro electromagnético después del tinaco accionando la regadera.

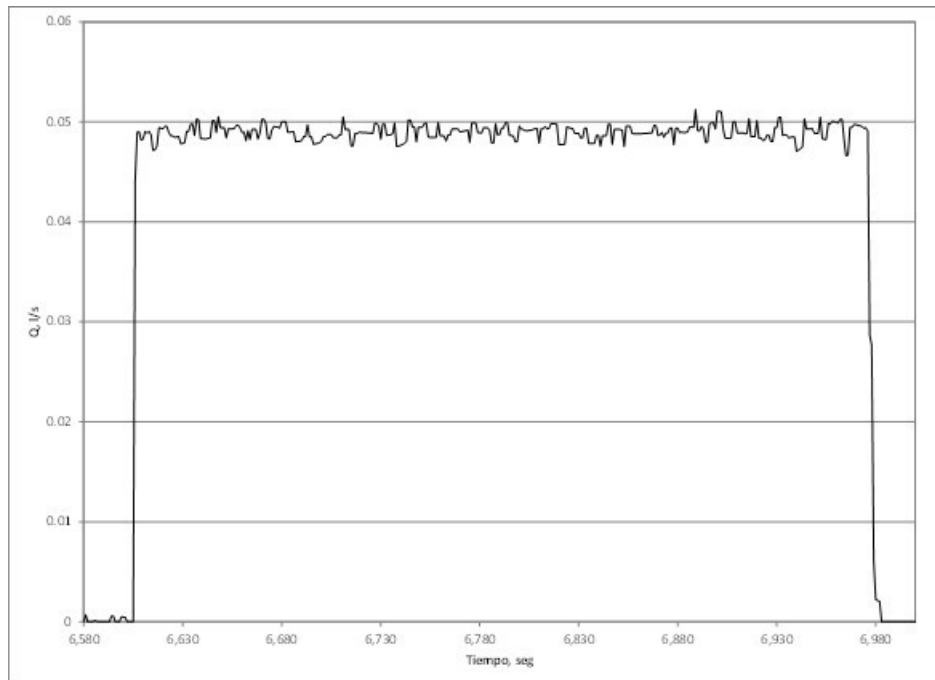


Ilustración 147. Variación de la medición 27 con el caudalímetro electromagnético después del tinaco accionando la regadera.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

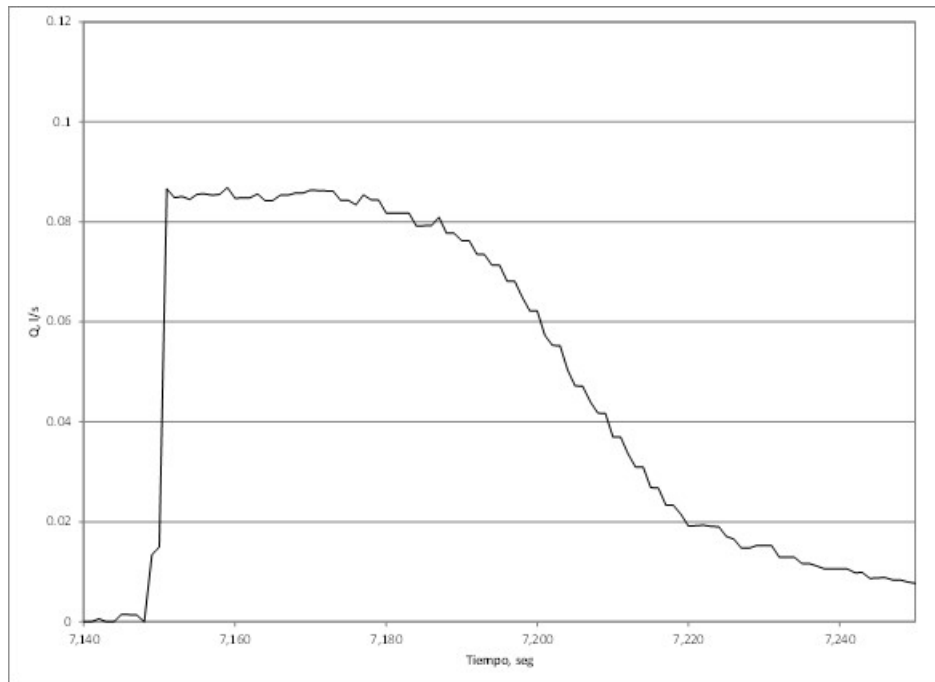


Ilustración 148. Variación de la medición 28 con el caudalímetro electromagnético después del tinaco accionando el escusado.

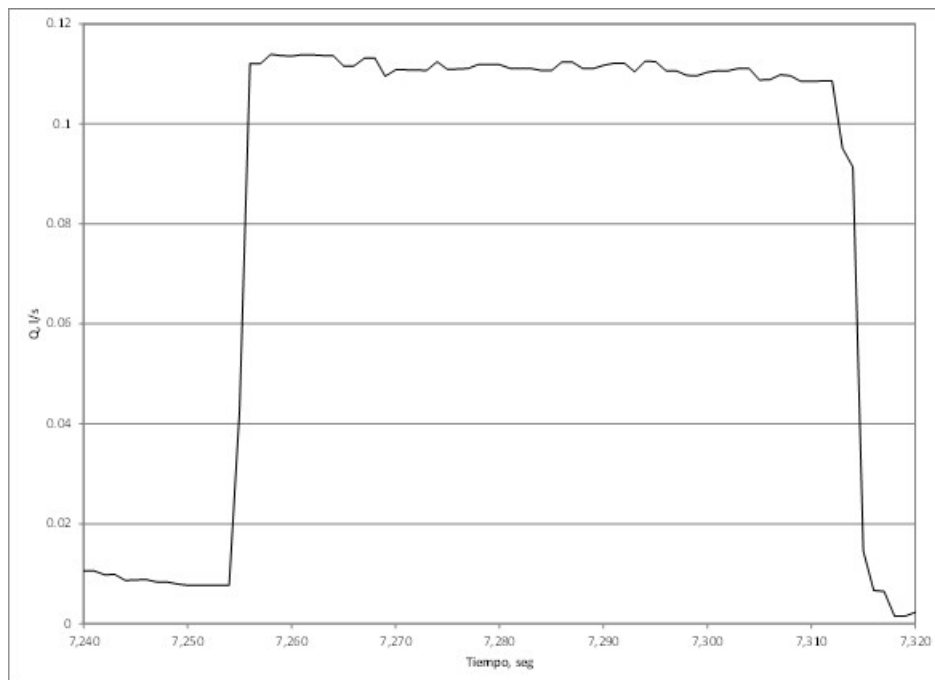


Ilustración 149. Variación de la medición 29 con el caudalímetro electromagnético después del tinaco accionando la llave.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

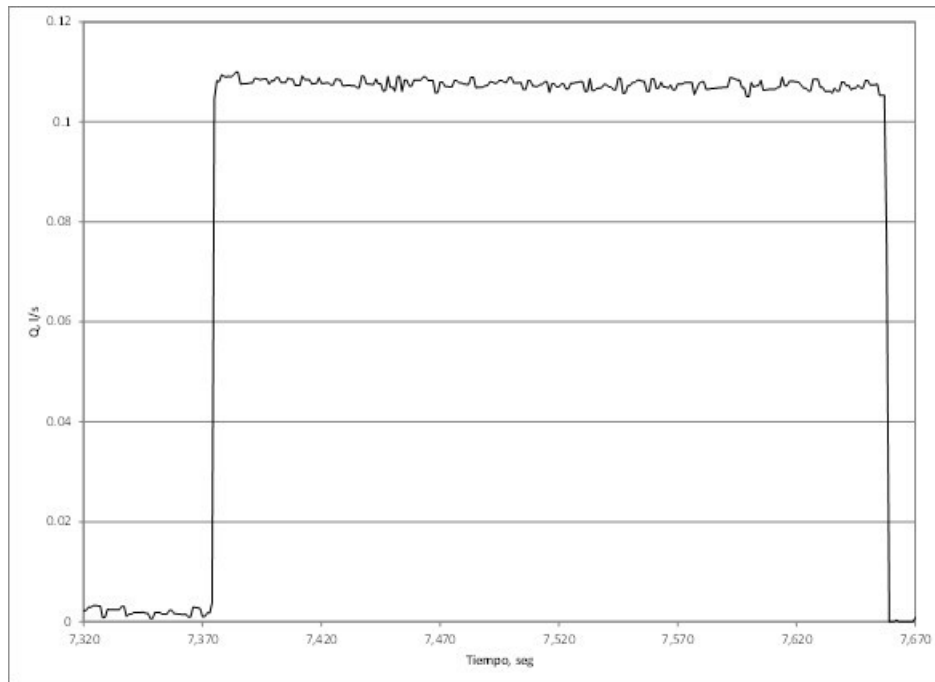


Ilustración 150. Variación de la medición 30 con el caudalímetro electromagnético después del tinaco accionando la regadera.

En la Ilustración 151 se muestra el comportamiento de las 30 mediciones.

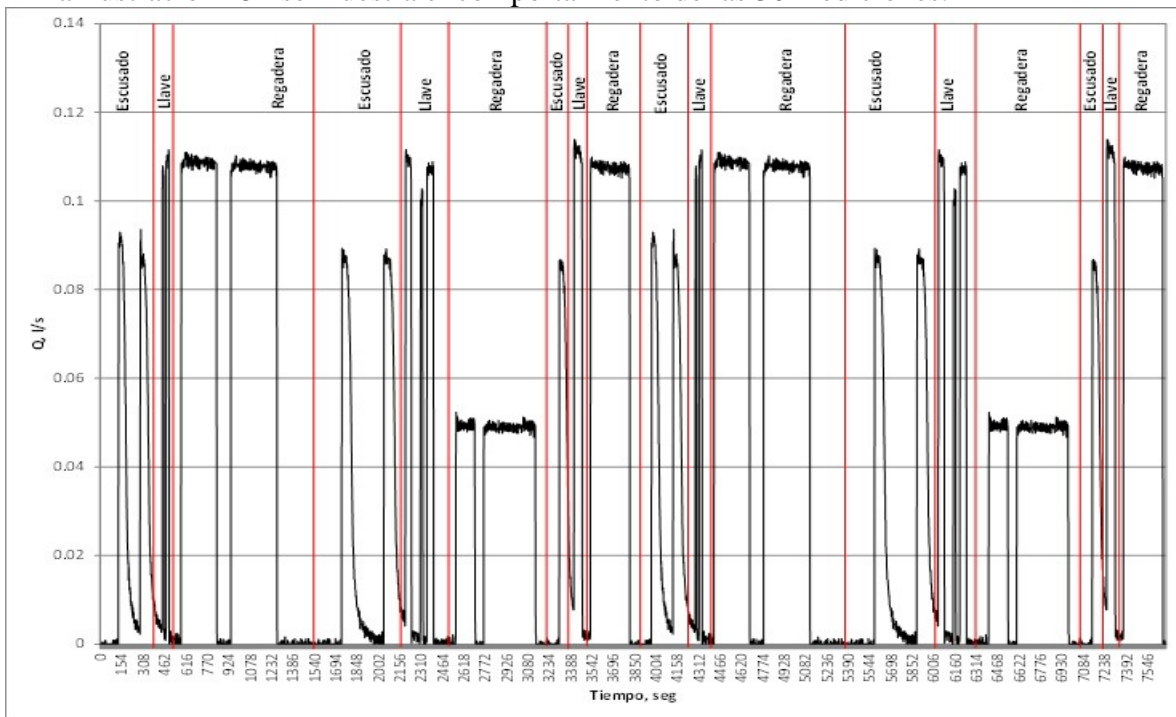


Ilustración 151. Variación de las mediciones de caudal con el caudalímetro electromagnético después del tinaco.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

En la Ilustración anterior se delimitó el uso de cada accesorio con el fin de determinar el comportamiento de cada uno. Como habría de esperarse el uso del escusado produce una curva descendente lenta debido al llenado lento del depósito; el uso de la llave produce un gasto constante pero corto; y el uso de la regadera produce un gasto constante de mayor duración.

El tiempo total de la prueba fue de dos horas con 8 minutos. Este tiempo fue mayor que el anterior debido a que se esperó un tiempo considerable, después de cada accionar de los accesorios, con el fin de identificarlos.

Similarmente que la prueba anterior, se realizaron 30 mediciones de la variación del caudal en el uso del agua con diferentes accesorios individuales, con la posición del caudalímetro directo a los accesorios, eliminando el tinaco. Igual como en la prueba 4, se hicieron accionar los accesorios (dos veces para escusado, dos veces para llave, dos veces para regadera, y así sucesivamente de a dos por accesorio hasta completar las 30) y registrar las mediciones hechas por el caudalímetro electromagnético. En las Ilustraciones 152 a la 181 se ilustra el comportamiento de cada acción mostrando la variación de caudal para cada segundo registrado por el caudalímetro electromagnético.

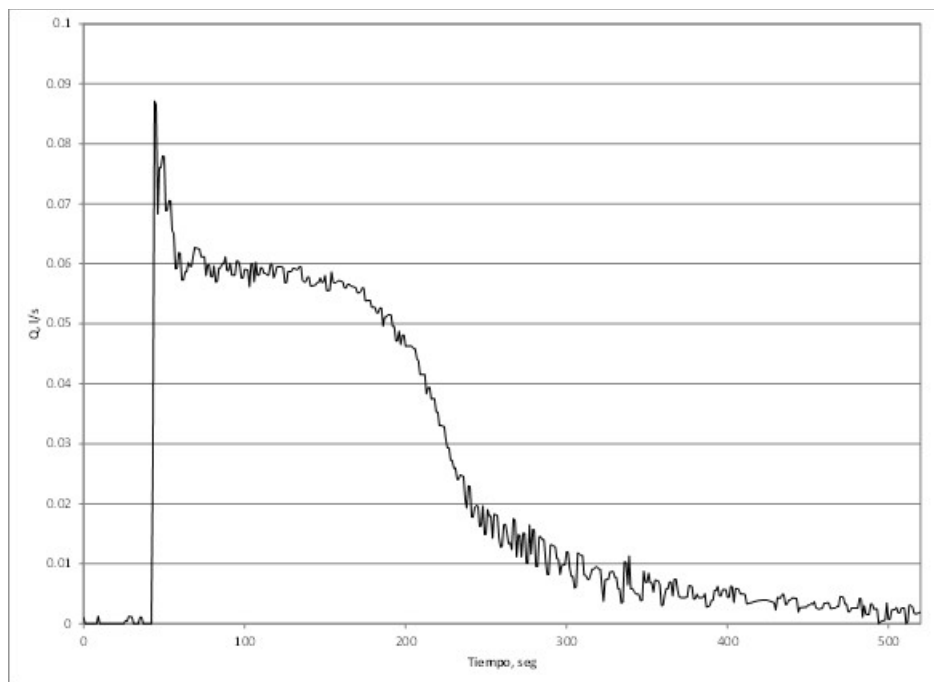


Ilustración 152. Variación de la medición 1 con el caudalímetro electromagnético obviando el depósito accionando el escusado.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

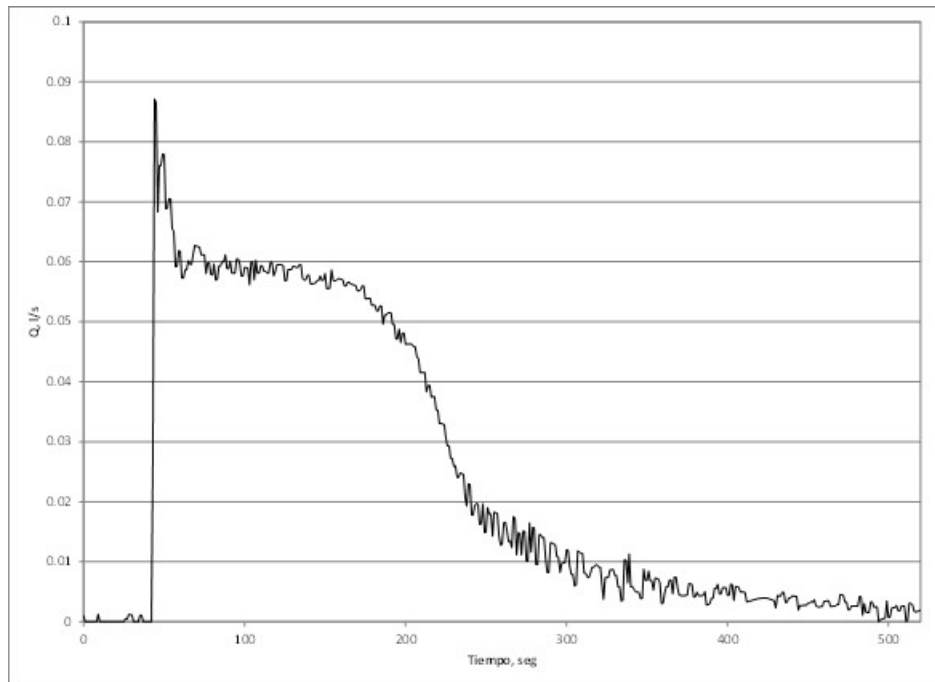


Ilustración 153. Variación de la medición 2 con el caudalímetro electromagnético obviando el depósito accionando el escusado.

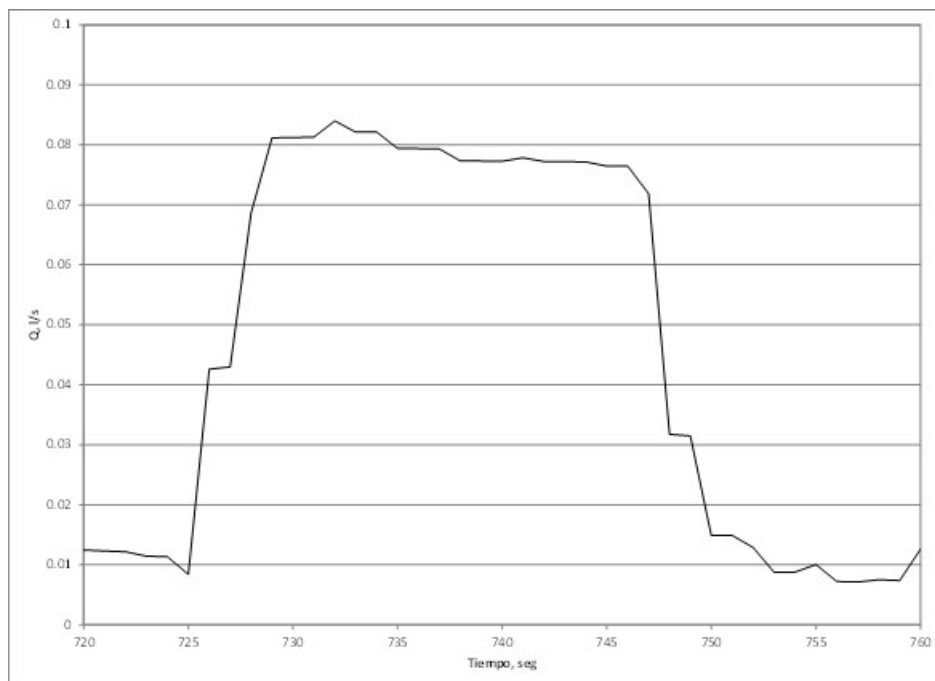


Ilustración 154. Variación de la medición 3 con el caudalímetro electromagnético obviando el depósito accionando la llave.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

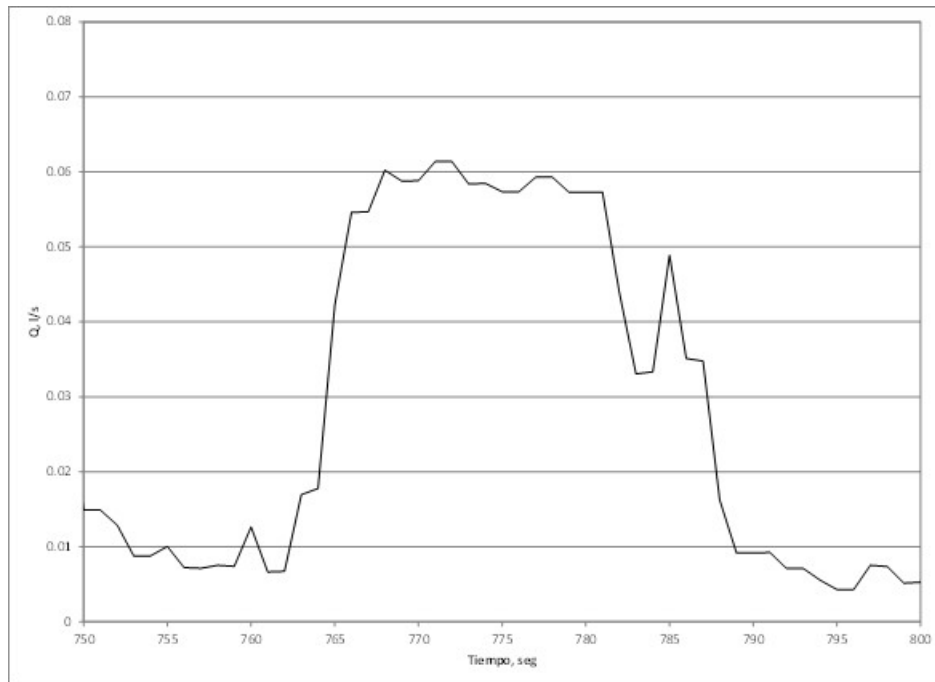


Ilustración 155. Variación de la medición 4 con el caudalímetro electromagnético obviando el depósito accionando la llave.

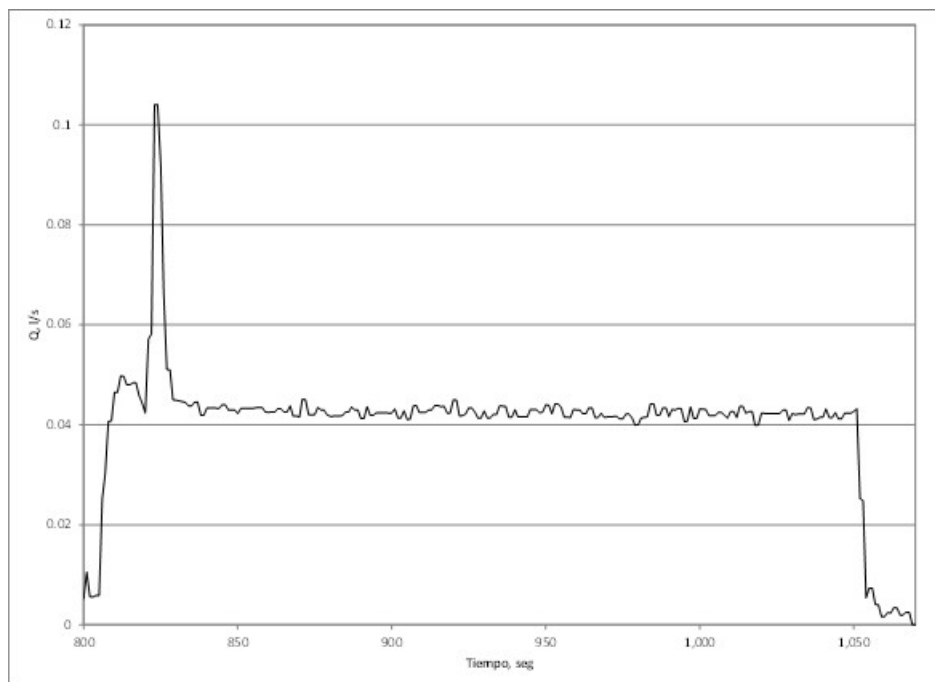


Ilustración 156. Variación de la medición 5 con el caudalímetro electromagnético obviando el depósito accionando la regadera.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

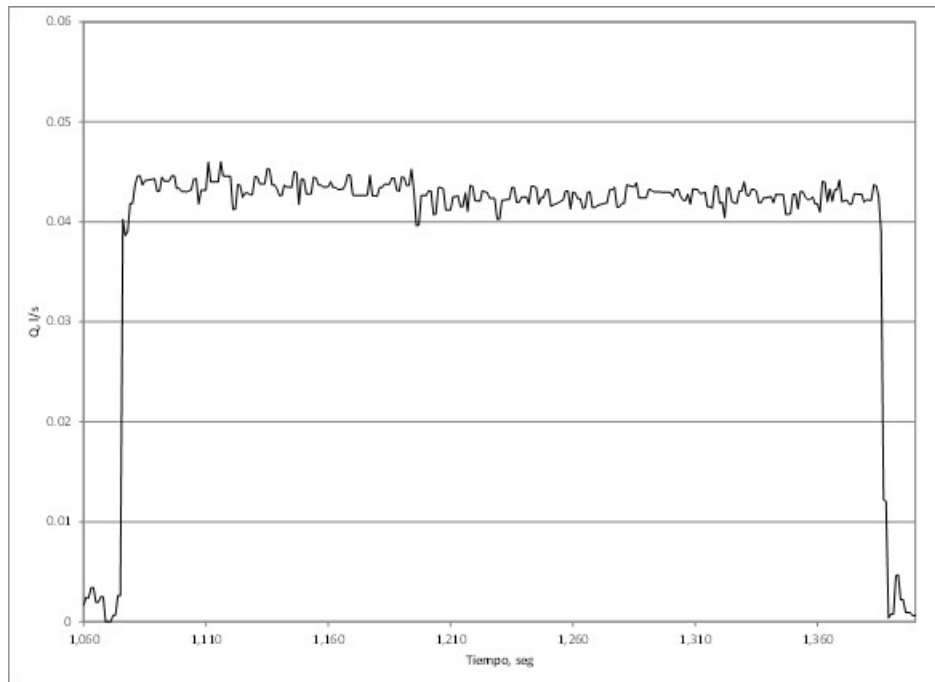


Ilustración 157. Variación de la medición 6 con el caudalímetro electromagnético obviando el depósito accionando la regadera.

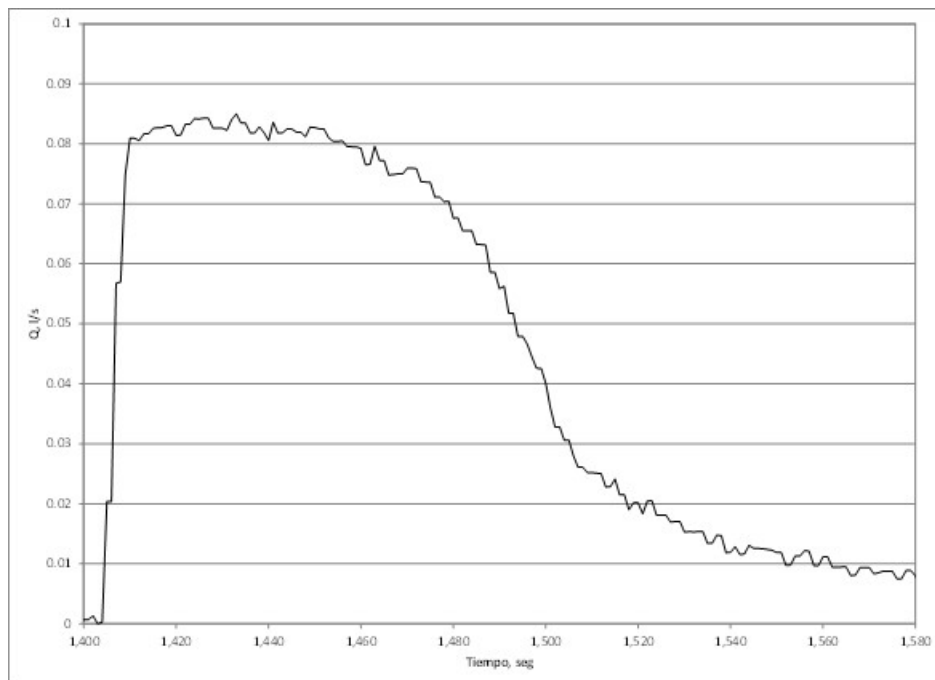


Ilustración 158. Variación de la medición 7 con el caudalímetro electromagnético obviando el depósito accionando el escusado.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

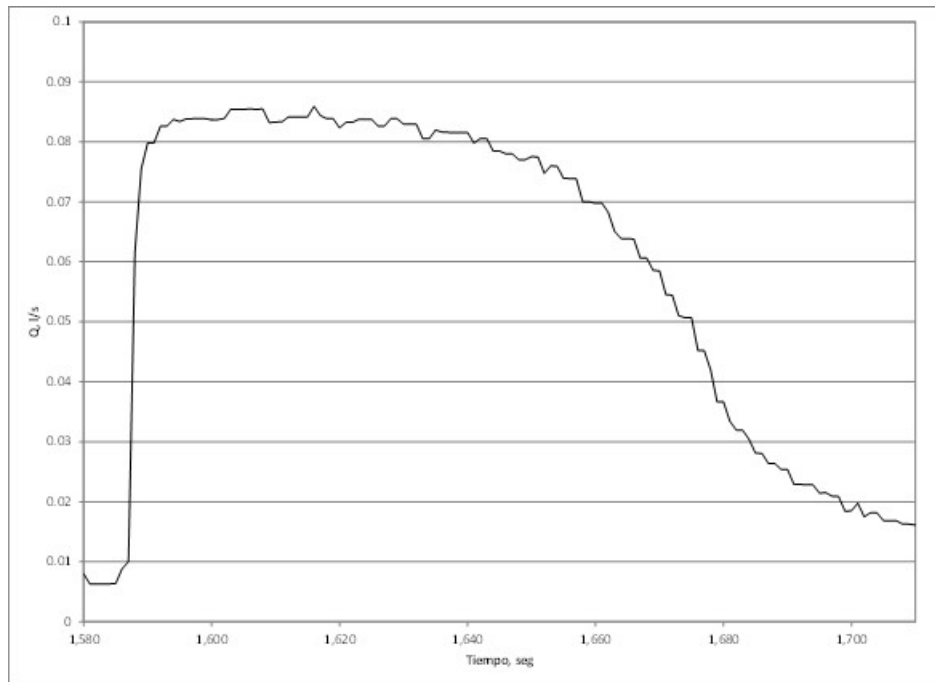


Ilustración 159. Variación de la medición 8 con el caudalímetro electromagnético obviando el depósito accionando el escusado.

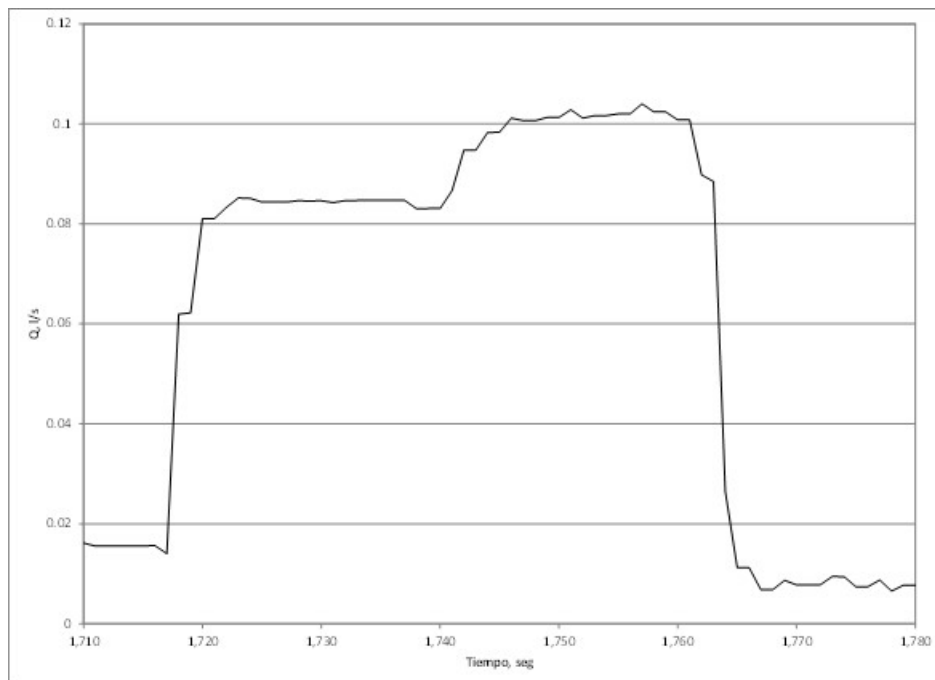


Ilustración 160. Variación de la medición 9 con el caudalímetro electromagnético obviando el depósito accionando la llave.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

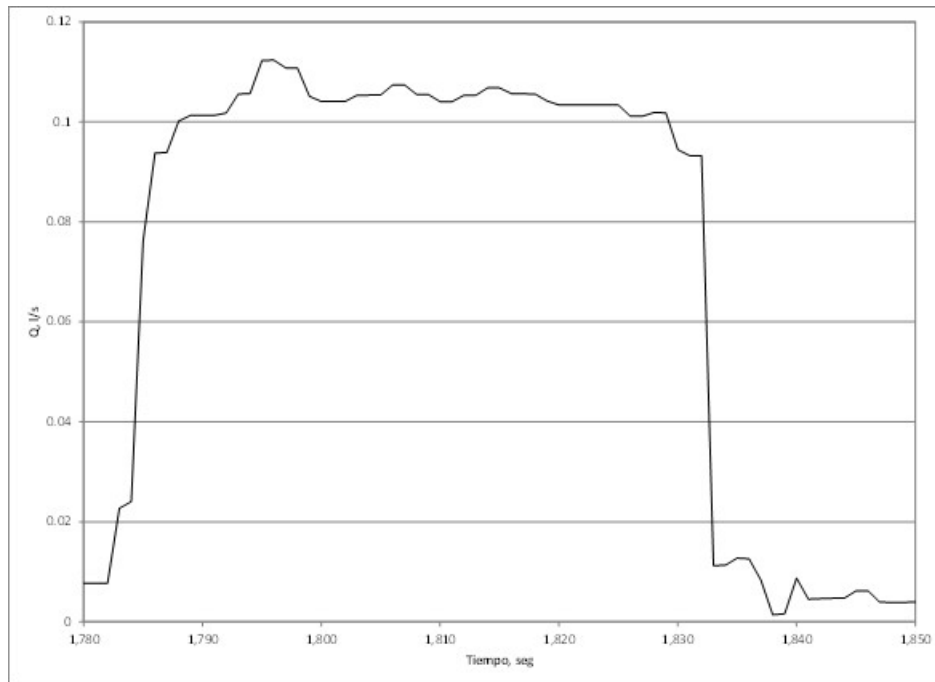


Ilustración 161. Variación de la medición 10 con el caudalímetro electromagnético obviando el depósito accionando la llave.

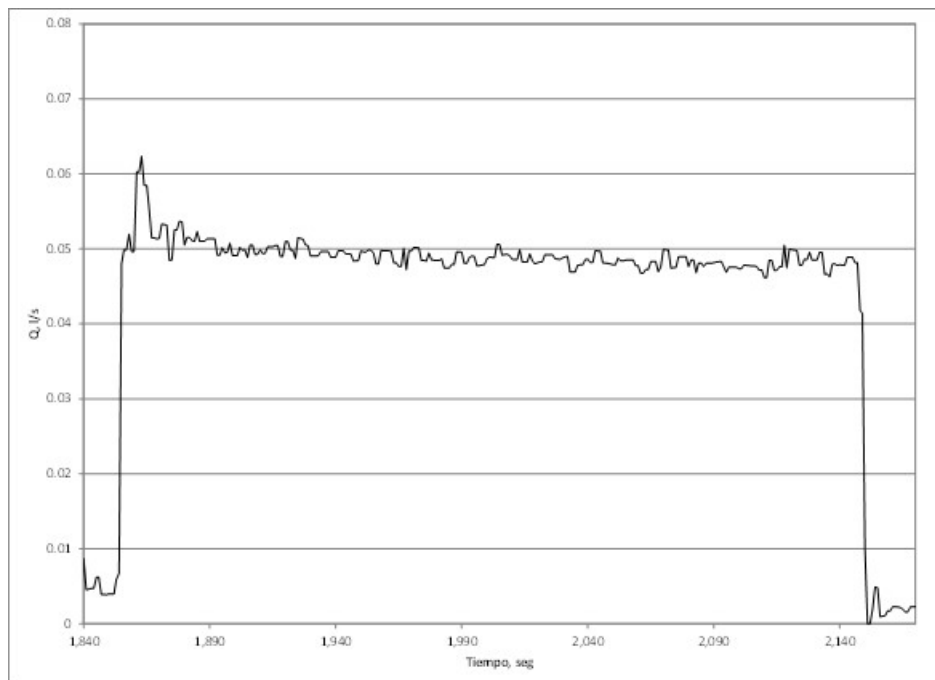


Ilustración 162. Variación de la medición 11 con el caudalímetro electromagnético obviando el depósito accionando la regadera.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

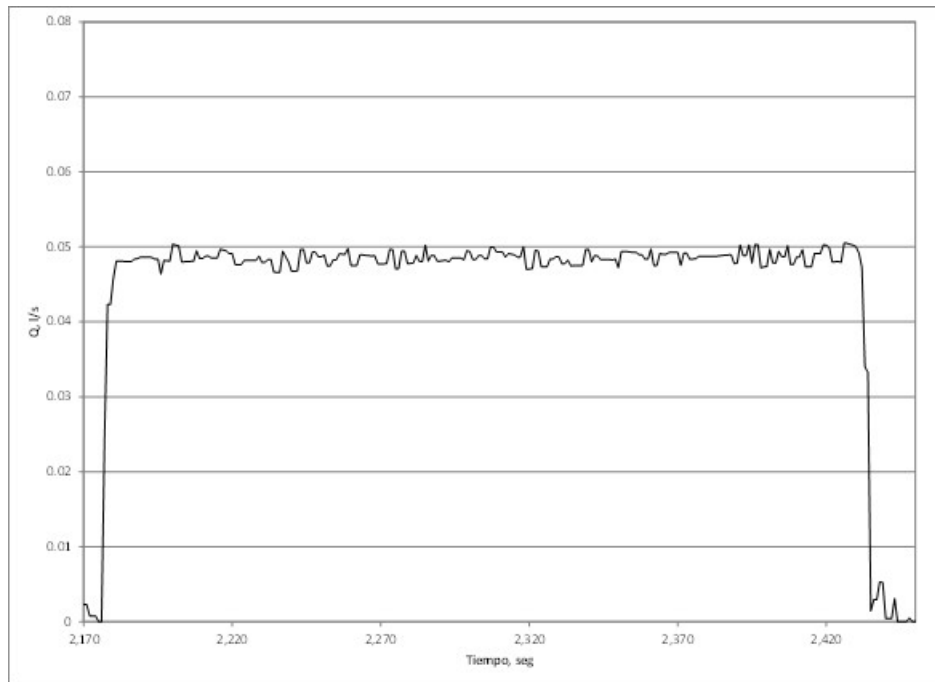


Ilustración 33. Variación de la medición 12 con el caudalímetro electromagnético obviando el depósito accionando la regadera.

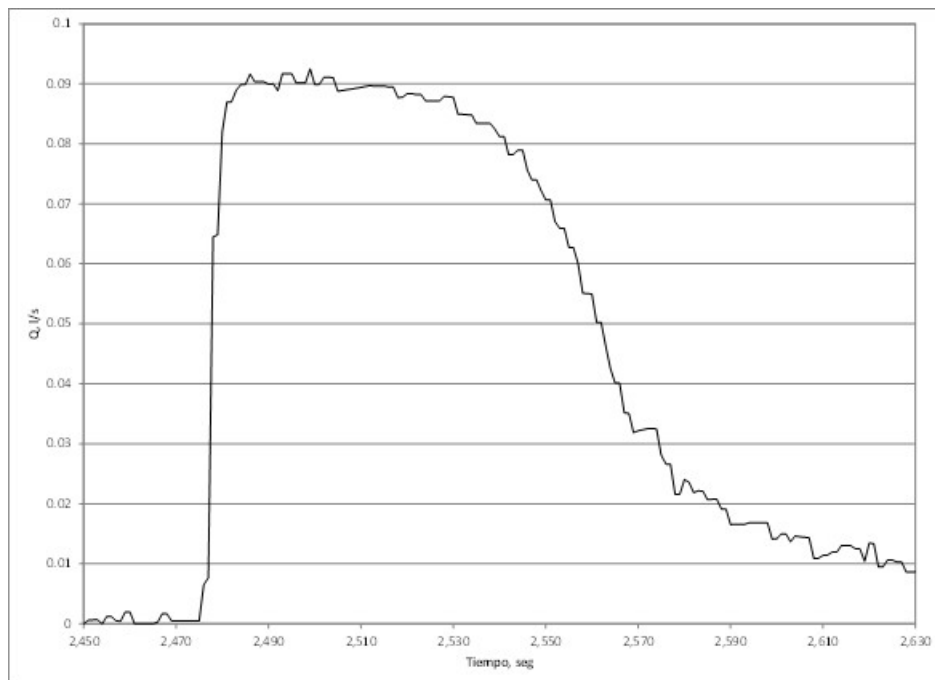


Ilustración 164. Variación de la medición 13 con el caudalímetro electromagnético obviando el depósito accionando el escusado.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

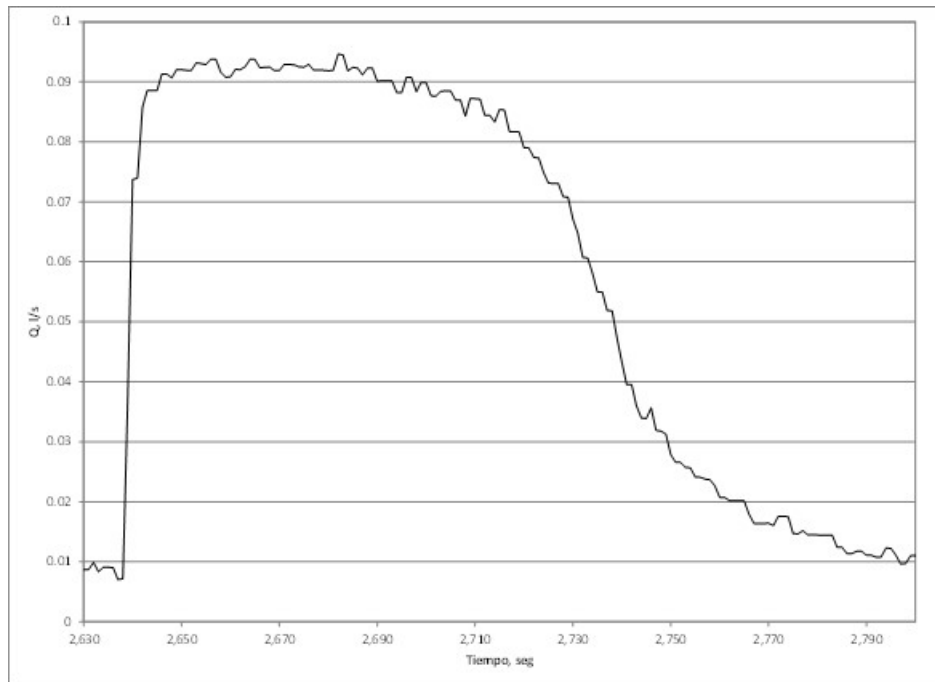


Ilustración 165. Variación de la medición 14 con el caudalímetro electromagnético obviando el depósito accionando el escusado.

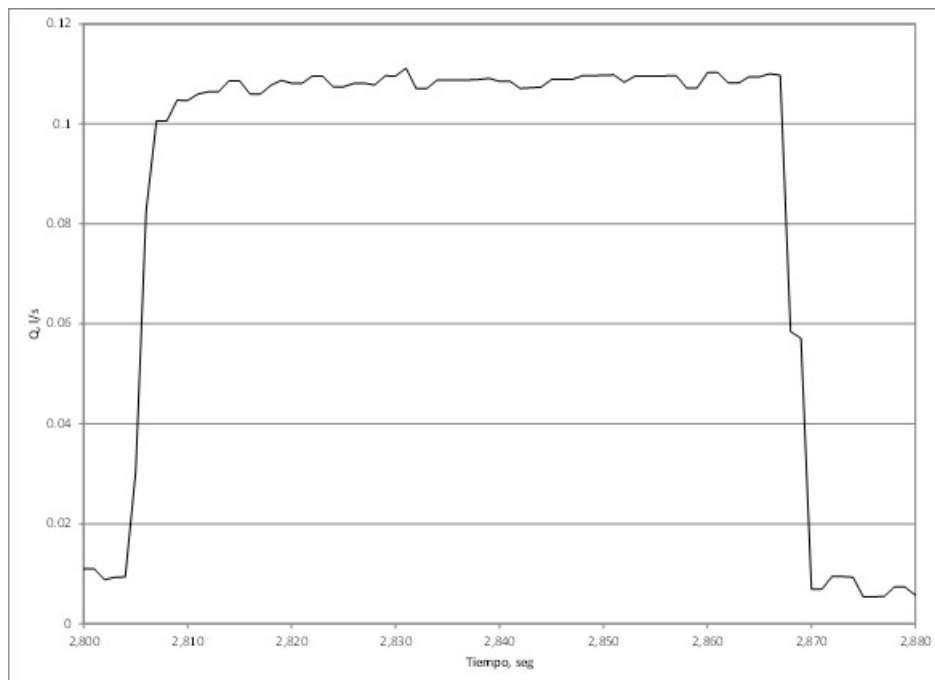


Ilustración 166. Variación de la medición 15 con el caudalímetro electromagnético obviando el depósito accionando la llave.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

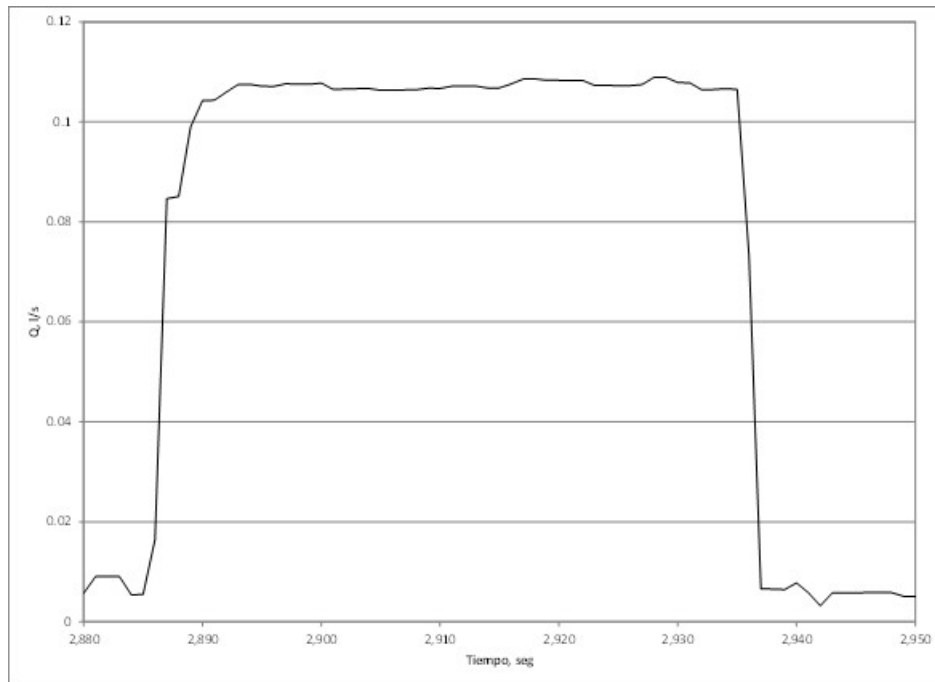


Ilustración 167. Variación de la medición 16 con el caudalímetro electromagnético obviando el depósito accionando la llave.

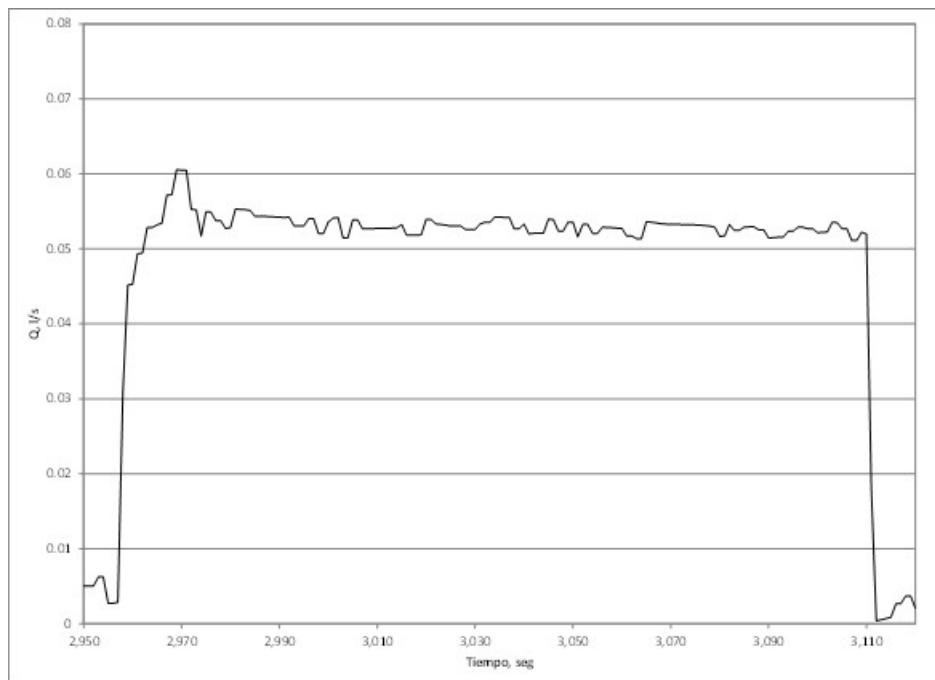


Ilustración 168. Variación de la medición 17 con el caudalímetro electromagnético obviando el depósito accionando la regadera.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

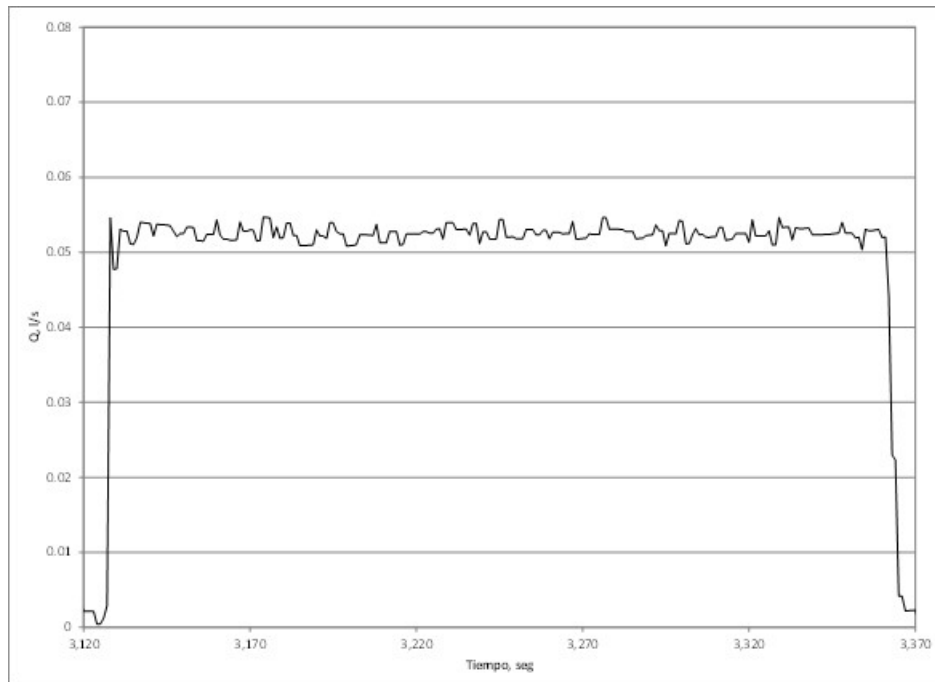


Ilustración 169. Variación de la medición 18 con el caudalímetro electromagnético obviando el depósito accionando la regadera.

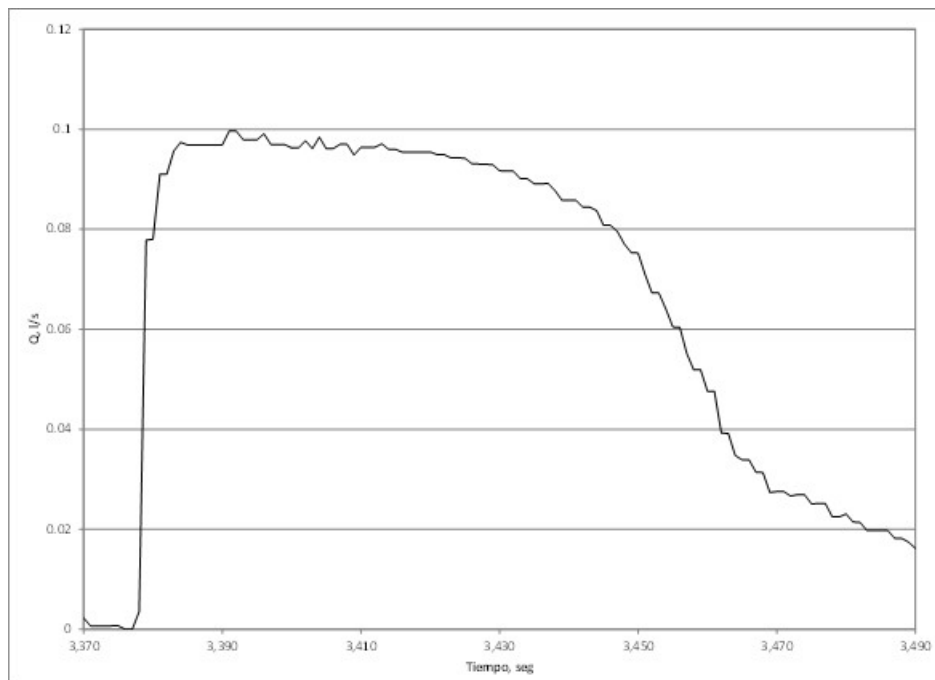


Ilustración 170. Variación de la medición 19 con el caudalímetro electromagnético obviando el depósito accionando el escusado.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

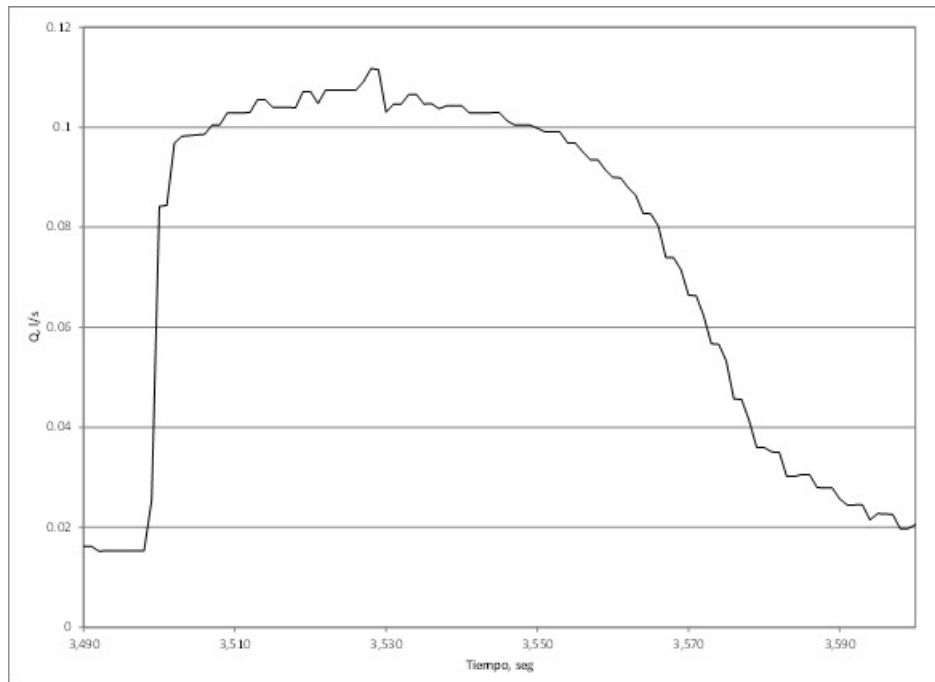


Ilustración 171. Variación de la medición 20 con el caudalímetro electromagnético obviando el depósito accionando el escusado.

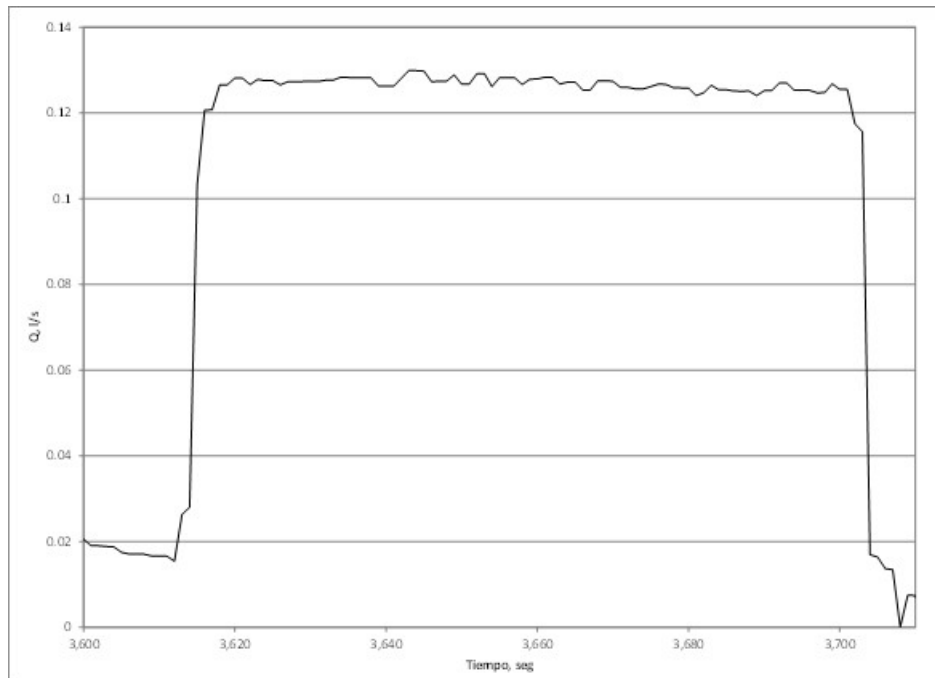


Ilustración 172. Variación de la medición 21 con el caudalímetro electromagnético obviando el depósito accionando la llave.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

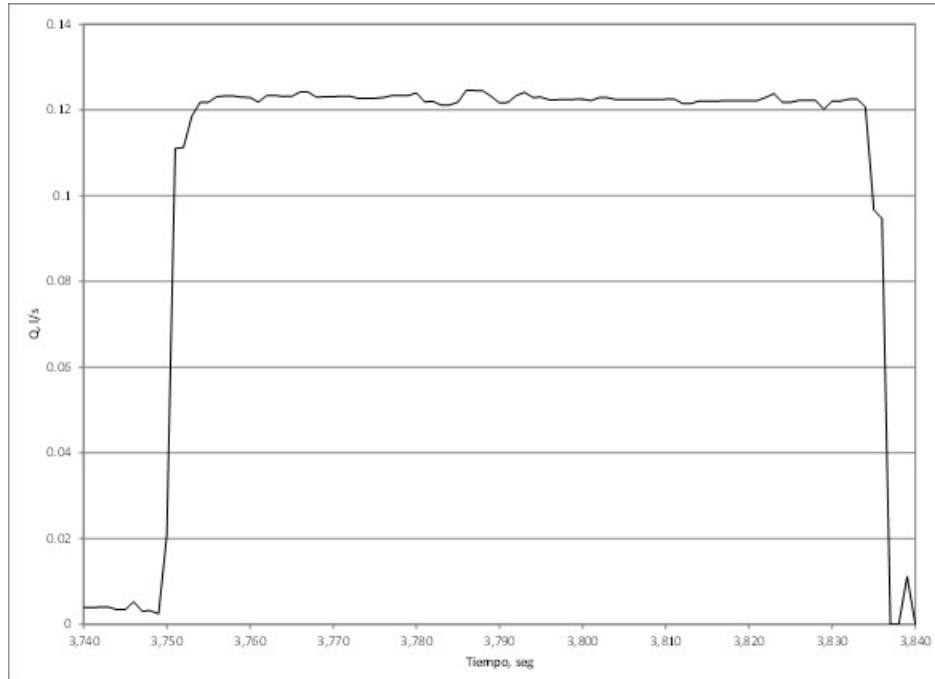


Ilustración 173. Variación de la medición 22 con el caudalímetro electromagnético obviando el depósito accionando la llave.

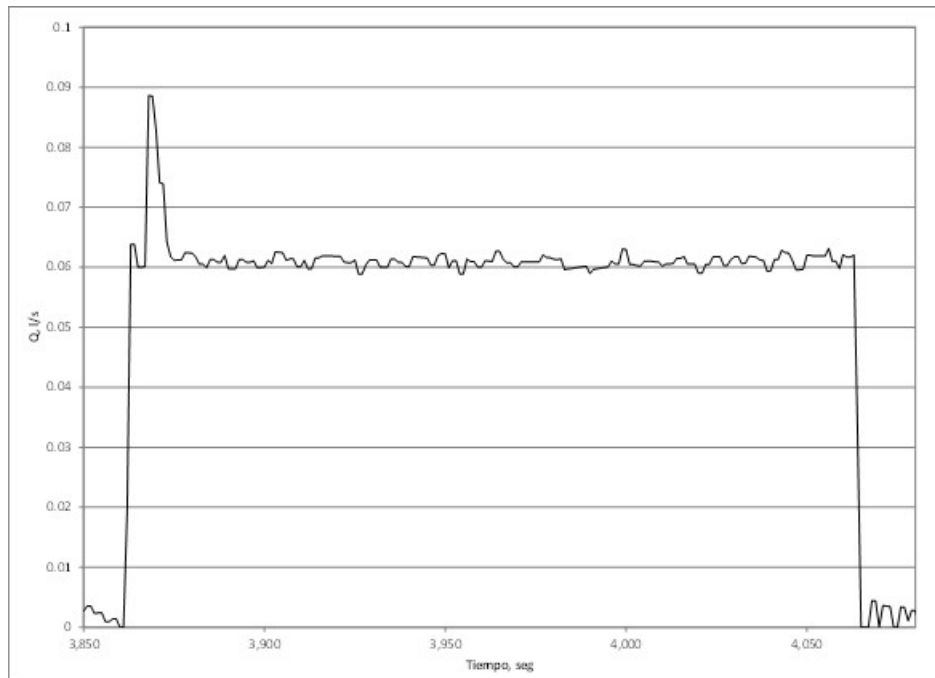


Ilustración 174. Variación de la medición 23 con el caudalímetro electromagnético obviando el depósito accionando la regadera.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

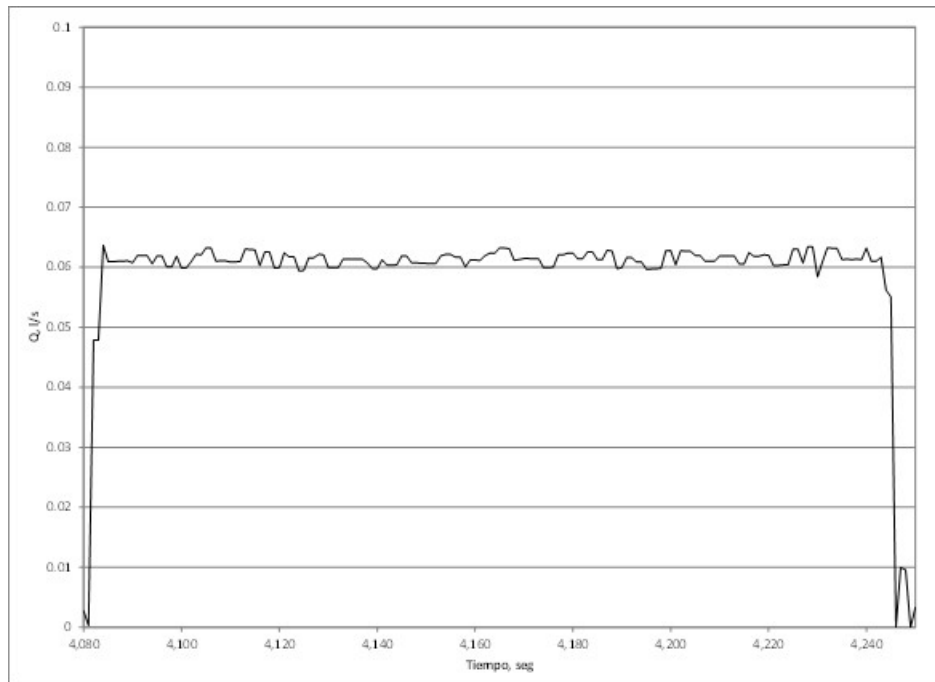


Ilustración 175. Variación de la medición 24 con el caudalímetro electromagnético obviando el depósito accionando la regadera.

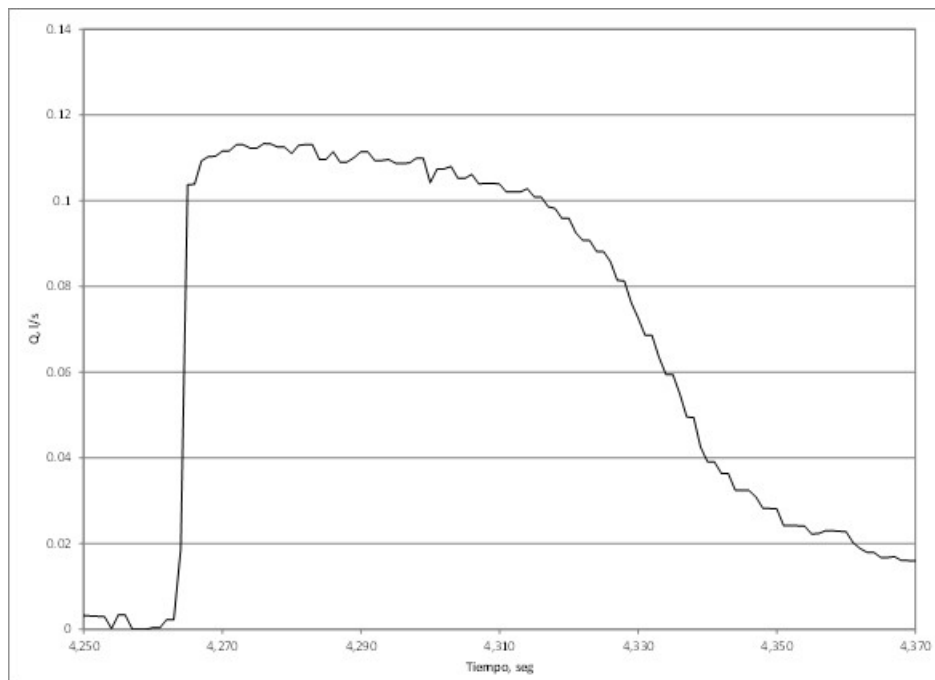


Ilustración 176. Variación de la medición 25 con el caudalímetro electromagnético obviando el depósito accionando el escusado.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

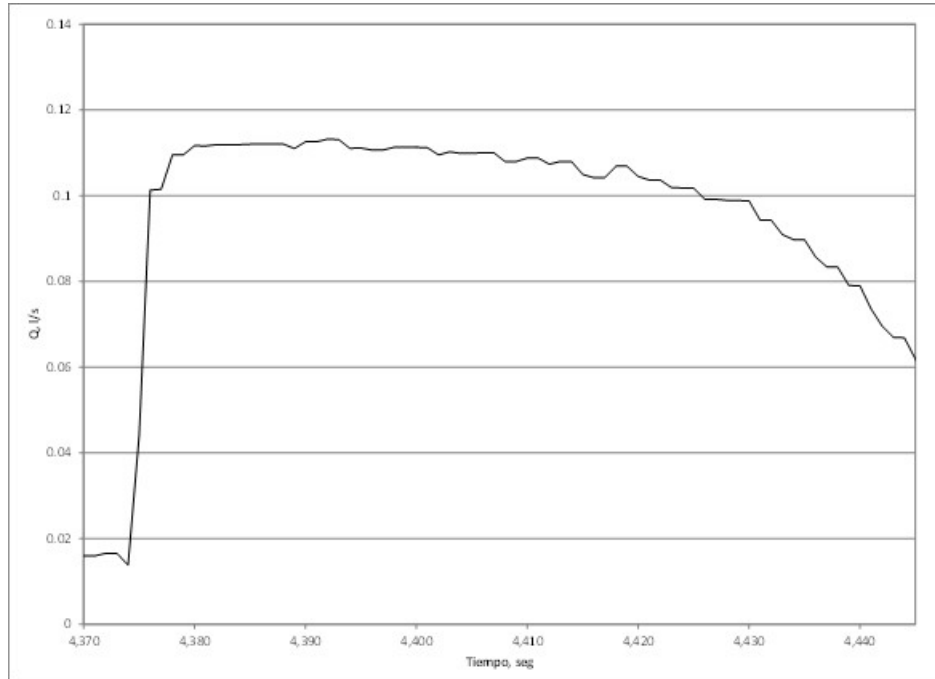


Ilustración 177. Variación de la medición 26 con el caudalímetro electromagnético obviando el depósito accionando el escusado.

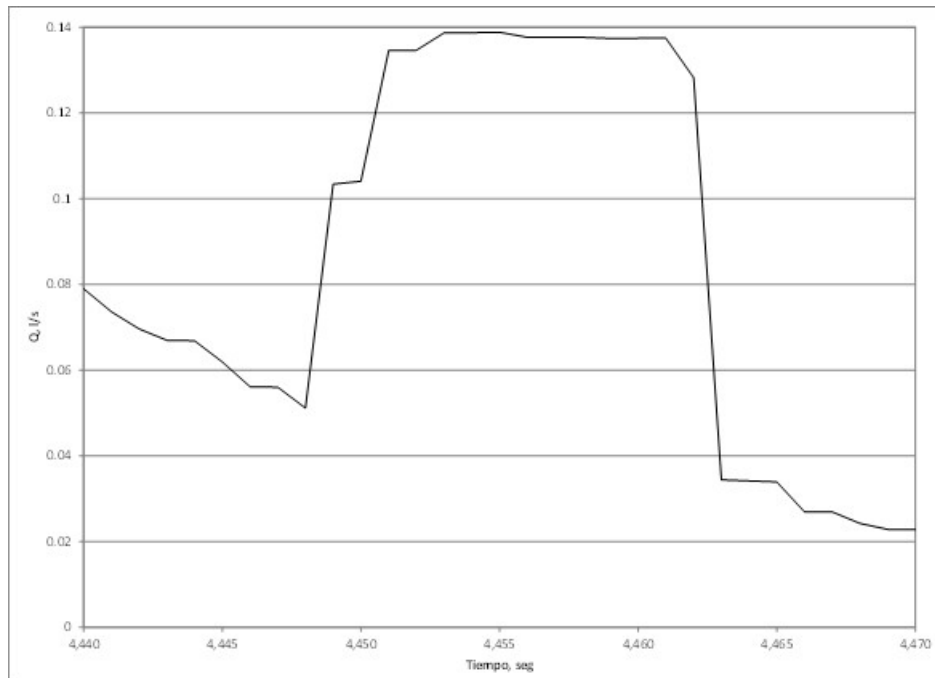


Ilustración 178. Variación de la medición 27 con el caudalímetro electromagnético obviando el depósito accionando la llave.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

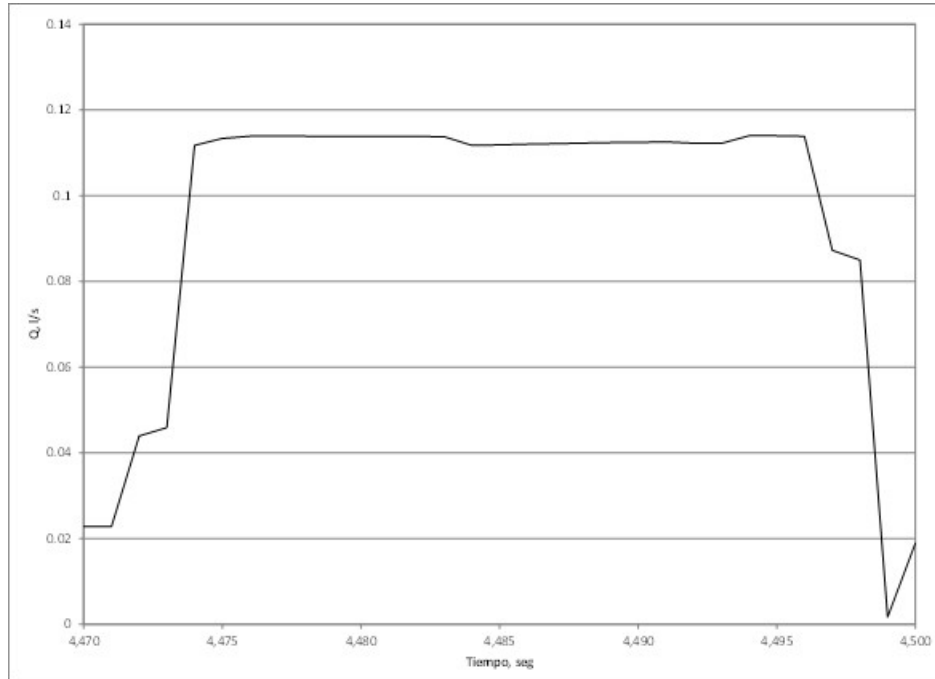


Ilustración 179. Variación de la medición 28 con el caudalímetro electromagnético obviando el depósito accionando la llave.

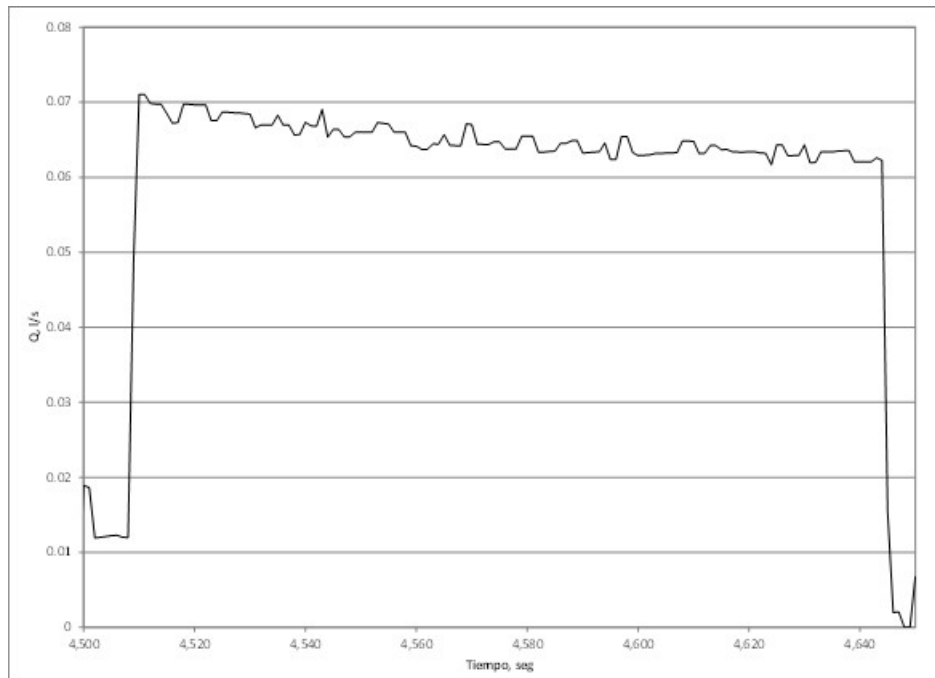


Ilustración 180. Variación de la medición 29 con el caudalímetro electromagnético obviando el depósito accionando la regadera.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

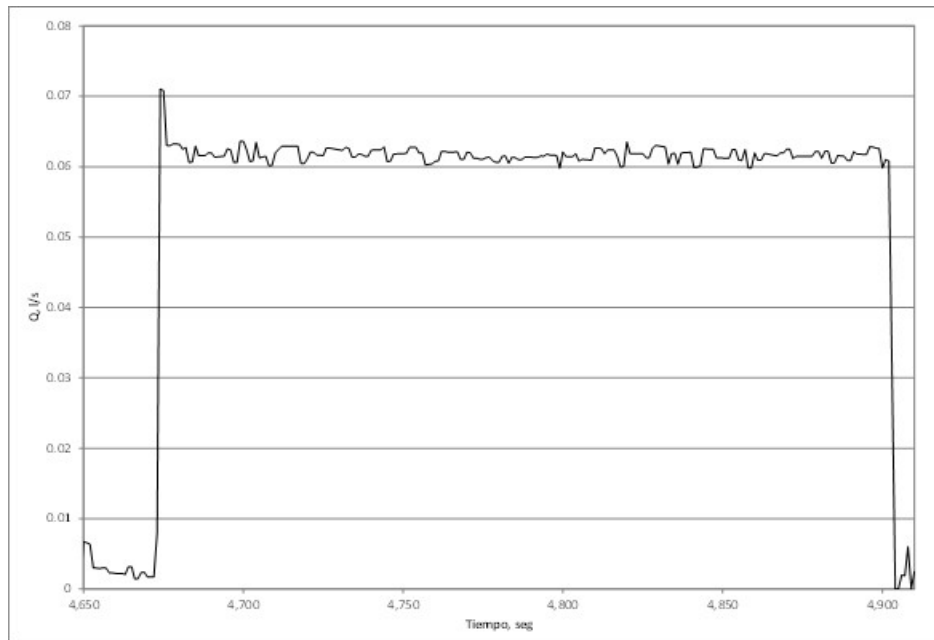


Ilustración 181. Variación de la medición 30 con el caudalímetro electromagnético obviando el depósito accionando la regadera.

En la Ilustración 182 se muestra el comportamiento de las 30 acciones consecutivas, delimitando con una línea roja el par de cada acción. El tiempo total de la prueba fue de una hora con 22 minutos.

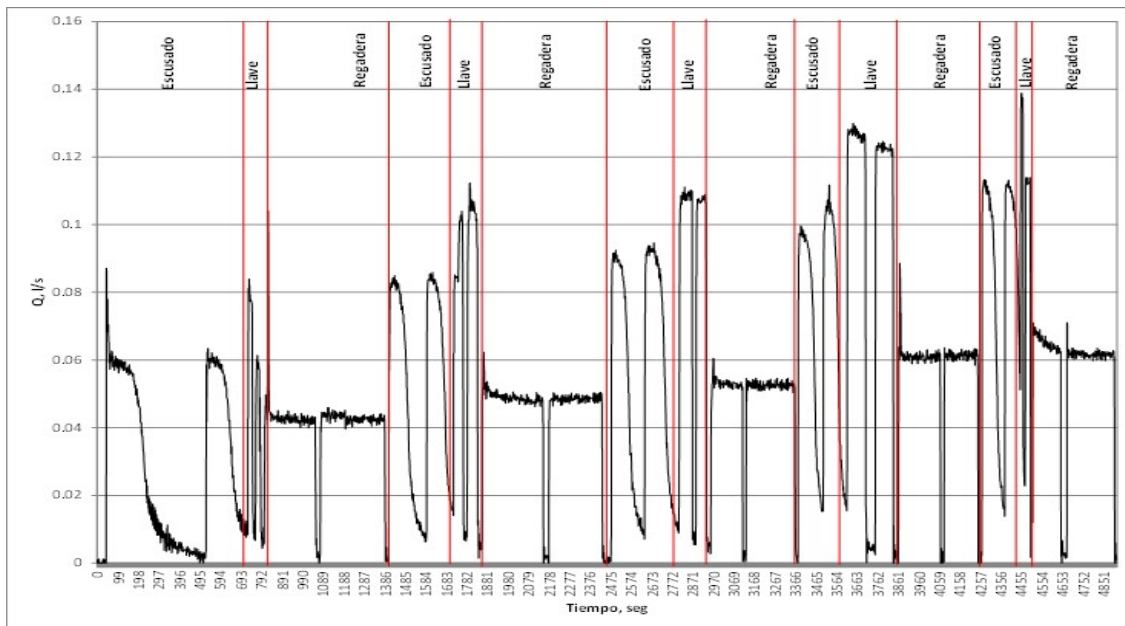


Ilustración 182. Variación de las mediciones de caudal con el caudalímetro electromagnético obviando el tinaco.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

Se realizaron 30 mediciones de la variación del caudal en el uso del agua con diferentes accesorios individuales, con la posición del caudalímetro antes del tinaco. Igual como en la prueba 5, consistieron en hacer accionar los accesorios (dos veces para escusado, dos veces para llave, dos veces para regadera, dos veces para escusado, dos veces para llave, dos veces para regadera, una vez para escusado, una vez para llave y una vez para regadera, volviéndose a repetir estas 15 acciones hasta completar 30). La diferencia con la prueba 5 es que el tinaco está totalmente lleno. Se puede decir que esta prueba se dividió en dos partes. La primera parte comprendió hacer accionar los accesorios (dos veces para escusado, dos veces para llave, dos veces para regadera, dos veces para escusado, dos veces para llave, dos veces para regadera, una vez para escusado, una vez para llave y una vez para regadera) sin permitir que el tinaco recupere el volumen inicial, es decir sin que se llene totalmente, por lo que la válvula de flotador no se cierra totalmente; y la segunda parte comprende en hacer accionar los accesorios (dos veces para escusado, dos veces para llave, dos veces para regadera, dos veces para escusado, dos veces para llave, dos veces para regadera, una vez para escusado, una vez para llave y una vez para regadera) permitiendo que el tinaco se llene totalmente antes de accionar el siguiente accesorio.

Adicionalmente en esta prueba se instaló un micromedidor domiciliario entre el caudalímetro y el tinaco, con el fin de determinar la diferencia de volumen registrado con el caudalímetro electromagnético. En la Foto 19 se puede observar la instalación de este micromedidor.

En las Ilustraciones 183 a la 197 se muestra el comportamiento de cada acción de la parte 1, mostrando la variación de caudal, para cada segundo, registrado por el caudalímetro electromagnético.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

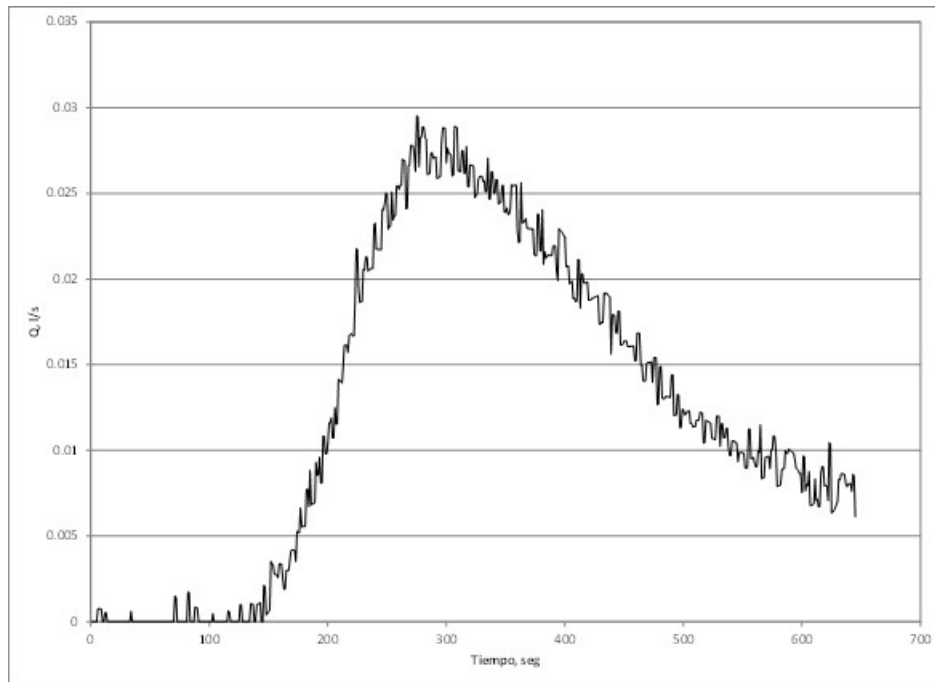


Ilustración 183. Variación de la medición 1 con el caudalímetro electromagnético antes y con depósito lleno accionando el escusado.

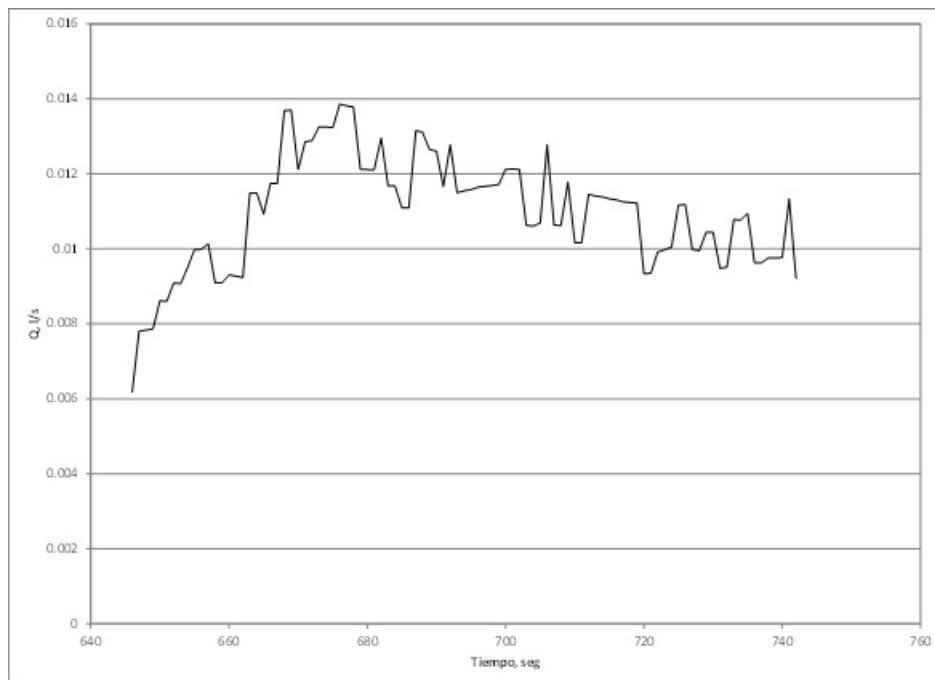


Ilustración 184. Variación de la medición 2 con el caudalímetro electromagnético antes y con depósito lleno accionando el escusado.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

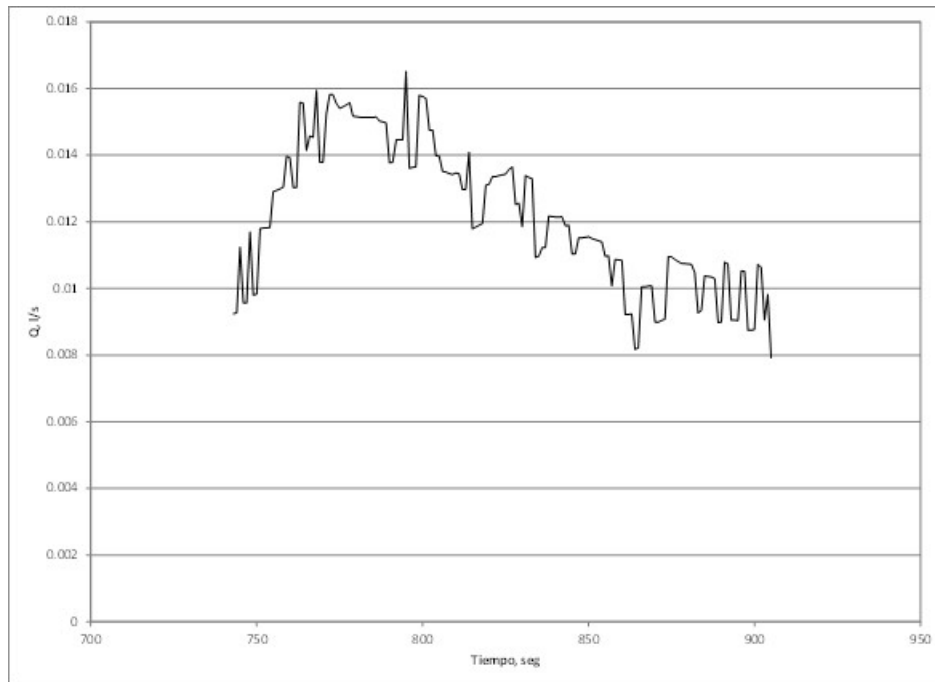


Ilustración 185. Variación de la medición 3 con el caudalímetro electromagnético antes y con depósito lleno accionando la llave.

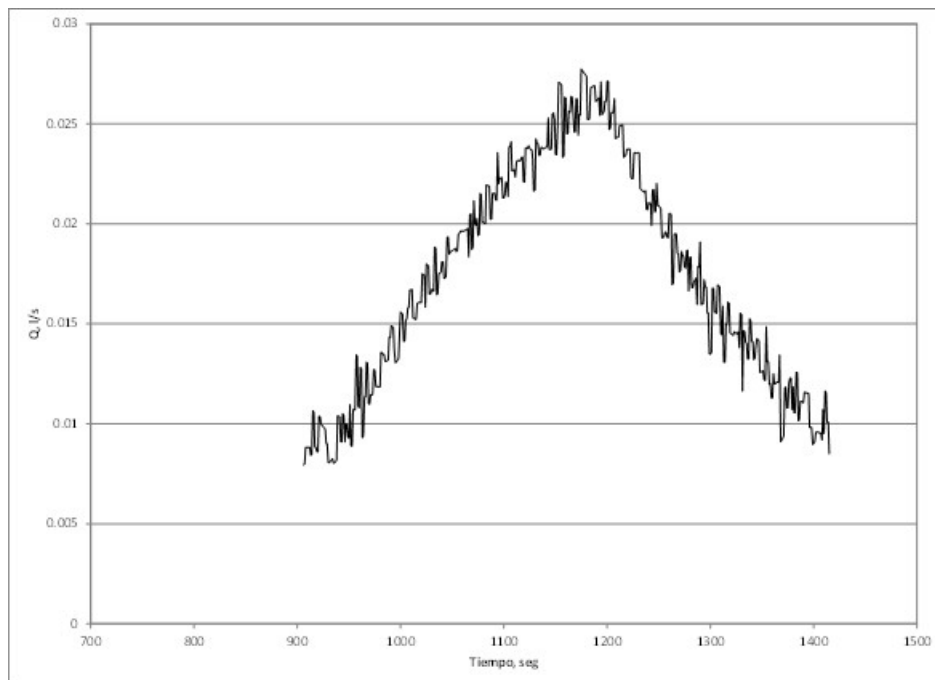


Ilustración 186. Variación de la medición 4 con el caudalímetro electromagnético antes y con depósito lleno accionando la llave.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

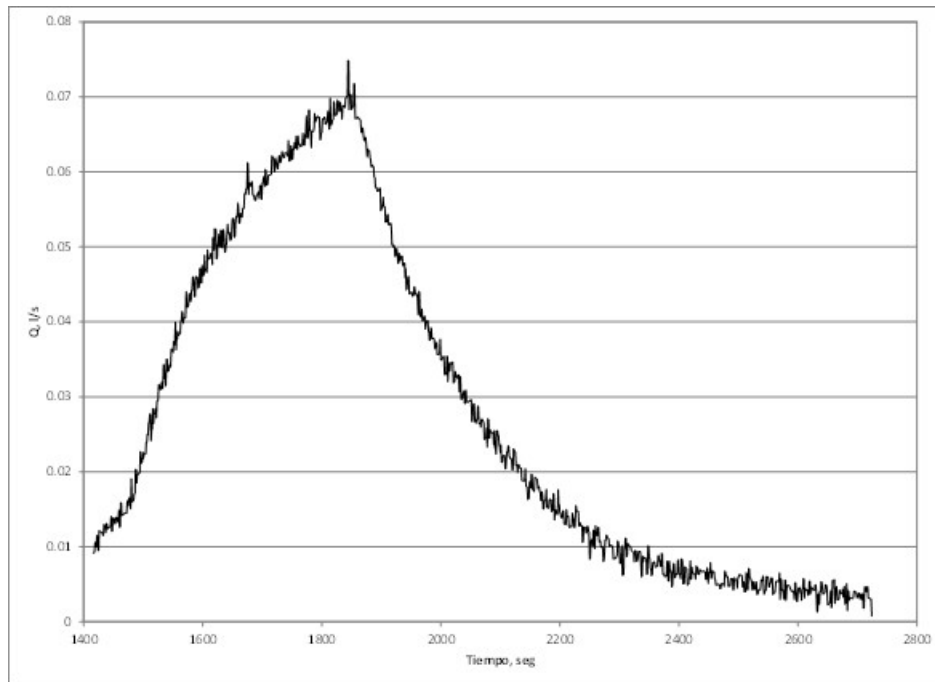


Ilustración 187. Variación de la medición 5 con el caudalímetro electromagnético antes y con depósito lleno accionando la regadera.

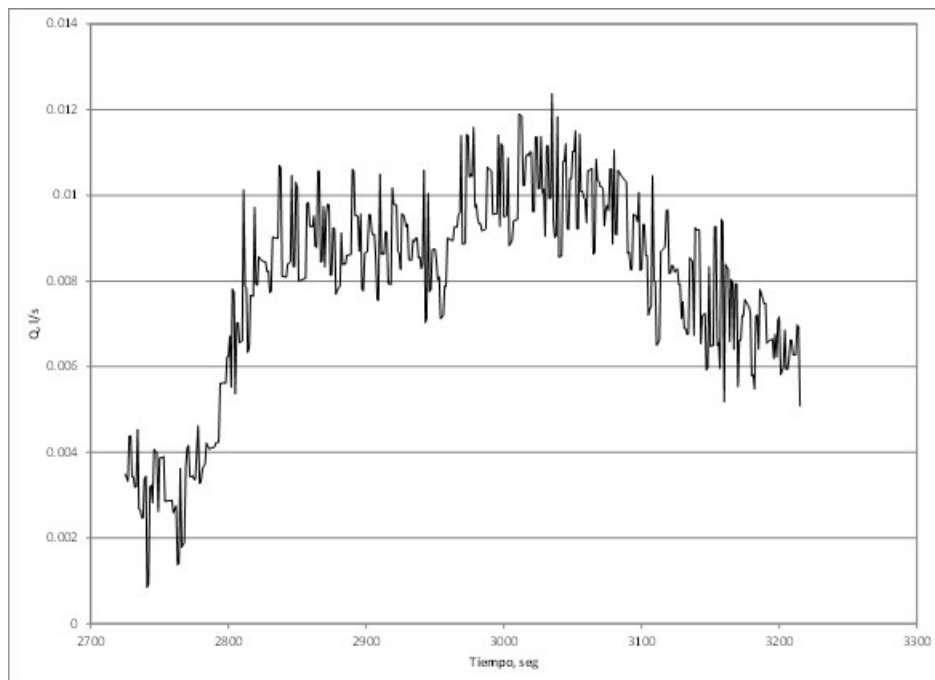


Ilustración 188. Variación de la medición 6 con el caudalímetro electromagnético antes y con depósito lleno accionando la regadera.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

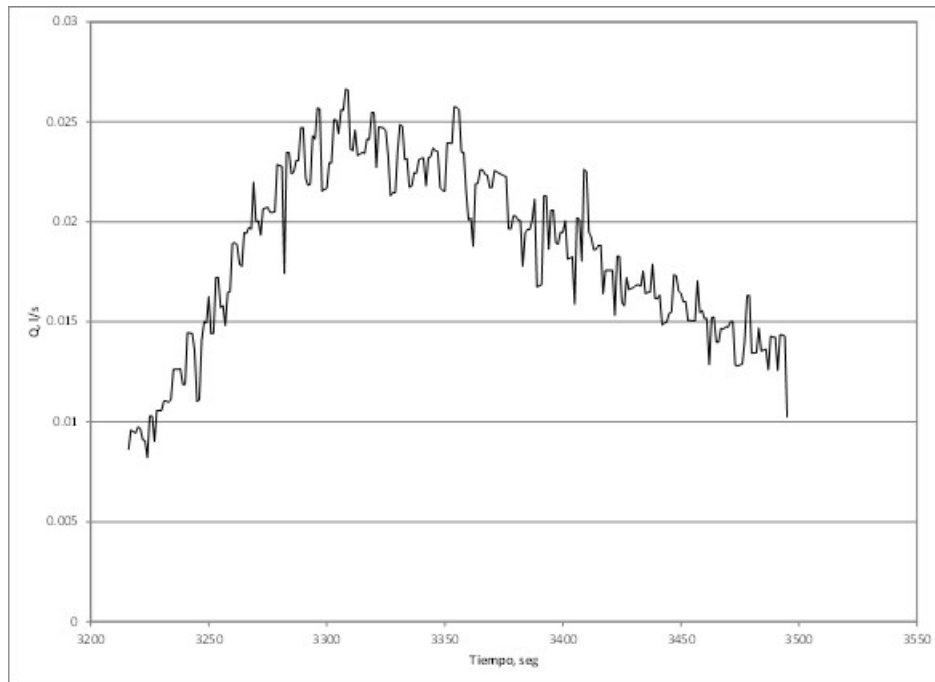


Ilustración 189. Variación de la medición 7 con el caudalímetro electromagnético antes y con depósito lleno accionando el escusado.

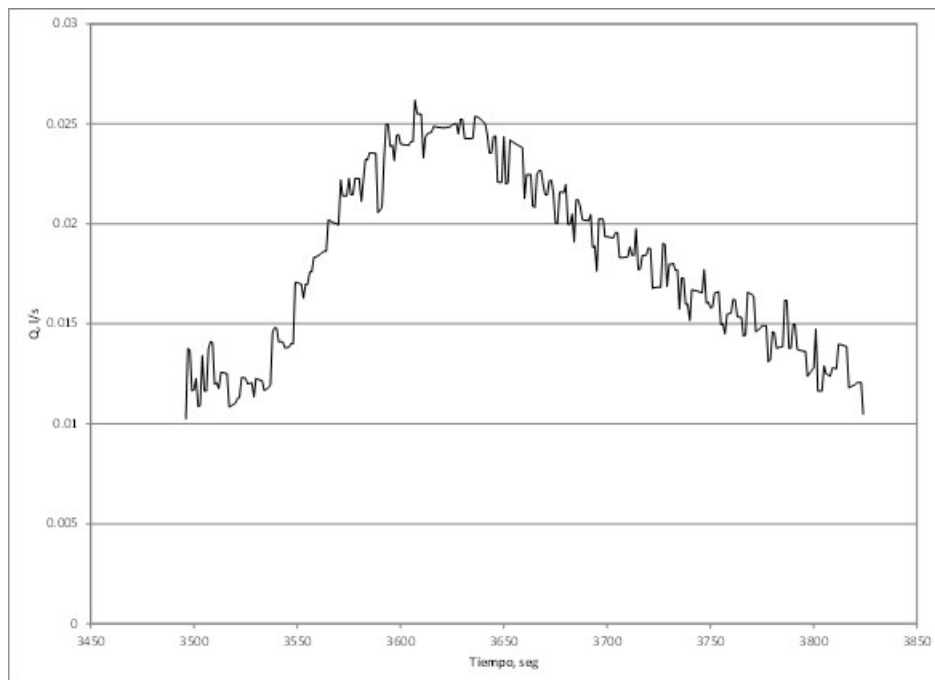


Ilustración 190. Variación de la medición 8 con el caudalímetro electromagnético antes y con depósito lleno accionando el escusado.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

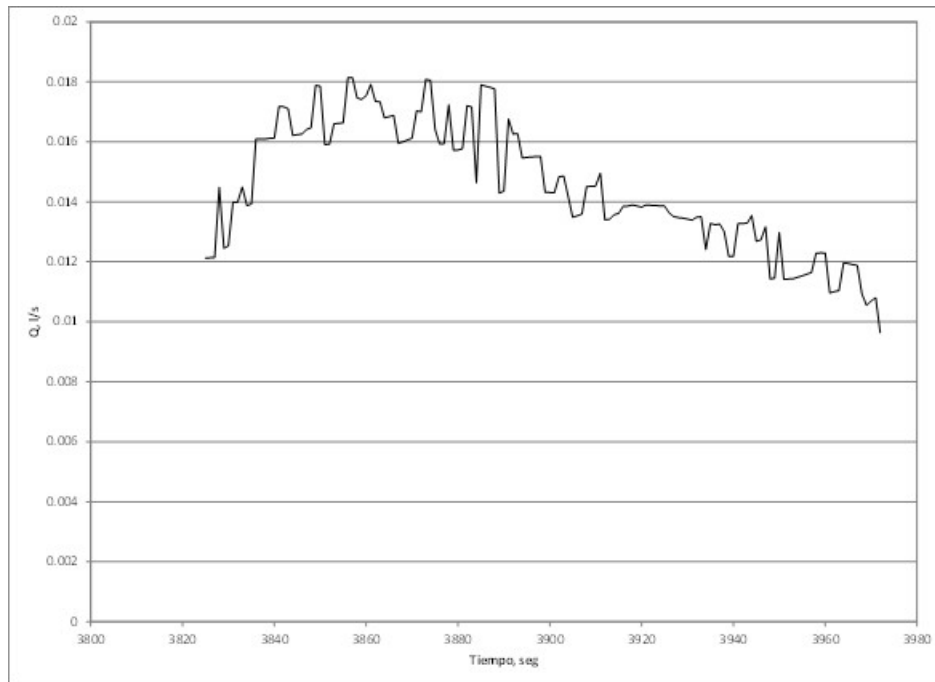


Ilustración 191. Variación de la medición 9 con el caudalímetro electromagnético antes y con depósito lleno accionando la llave.

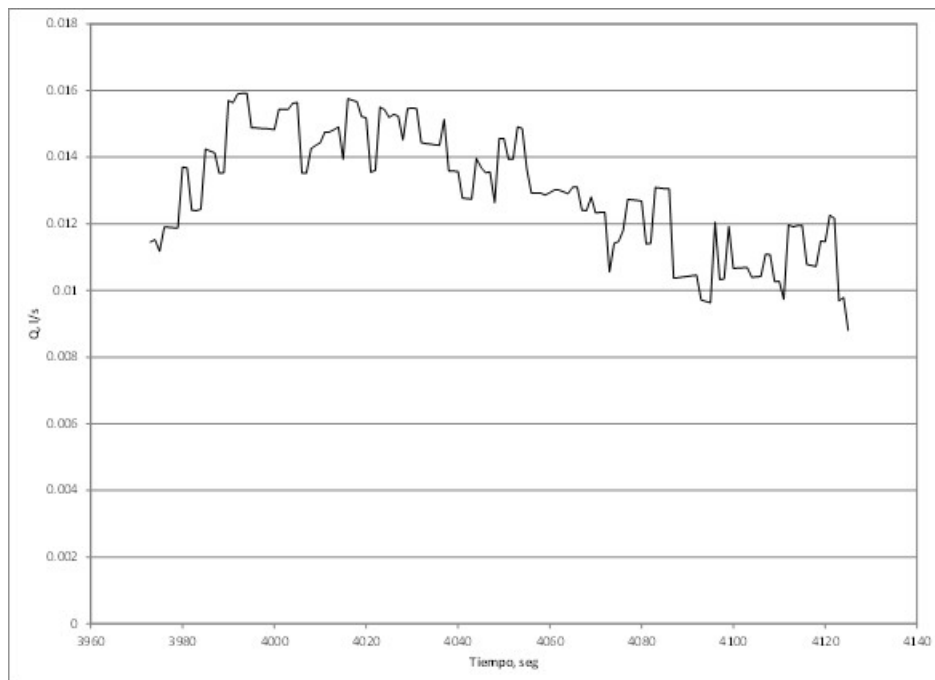


Ilustración 192. Variación de la medición 10 con el caudalímetro electromagnético antes y con depósito lleno accionando la llave.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

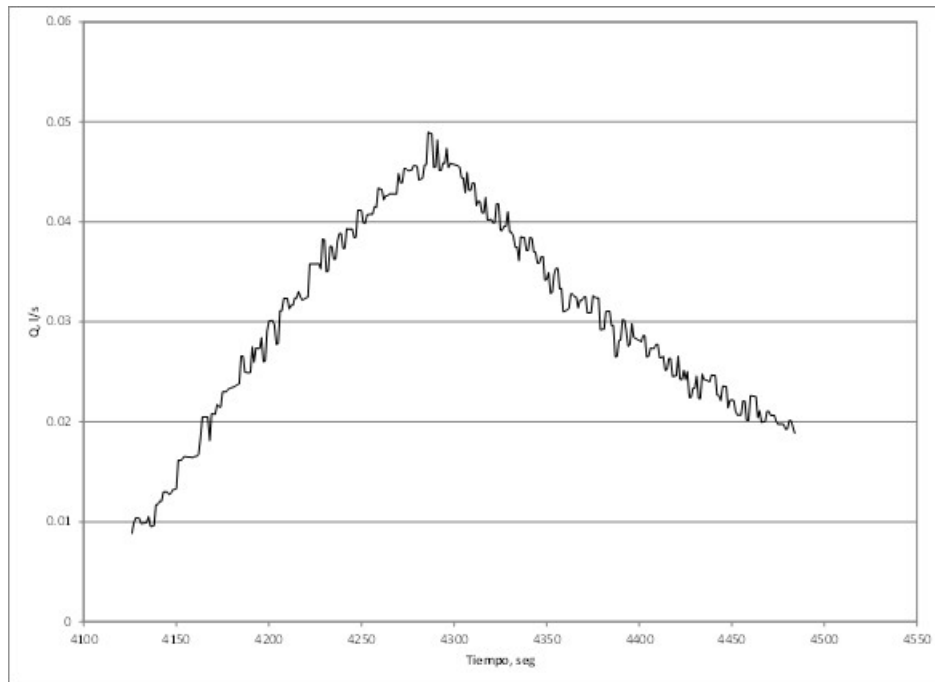


Ilustración 193. Variación de la medición 11 con el caudalímetro electromagnético antes y con depósito lleno accionando la regadera.

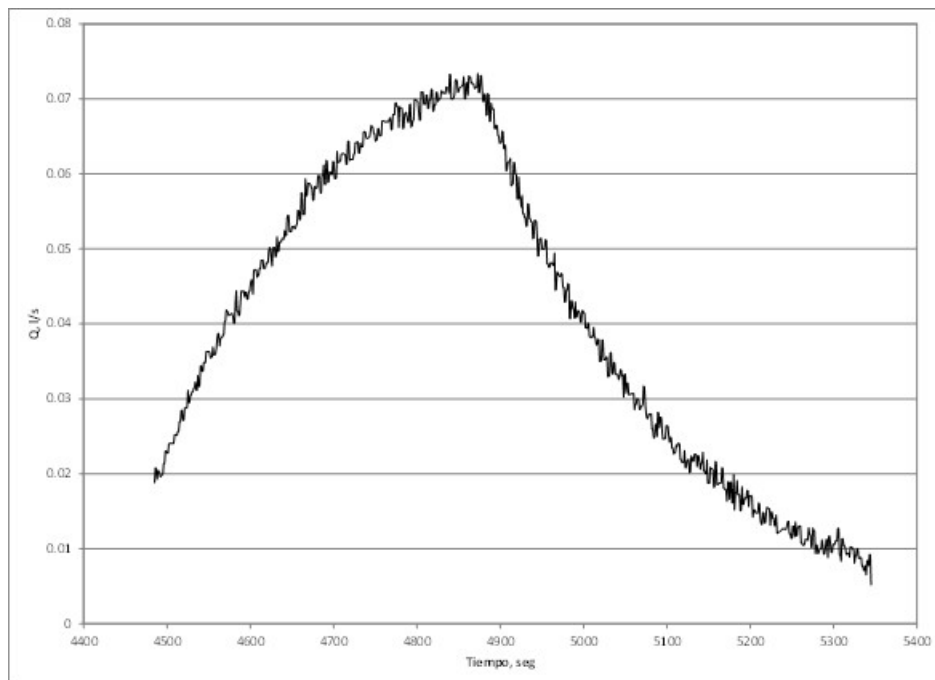


Ilustración 194. Variación de la medición 12 con el caudalímetro electromagnético antes y con depósito lleno accionando la regadera.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

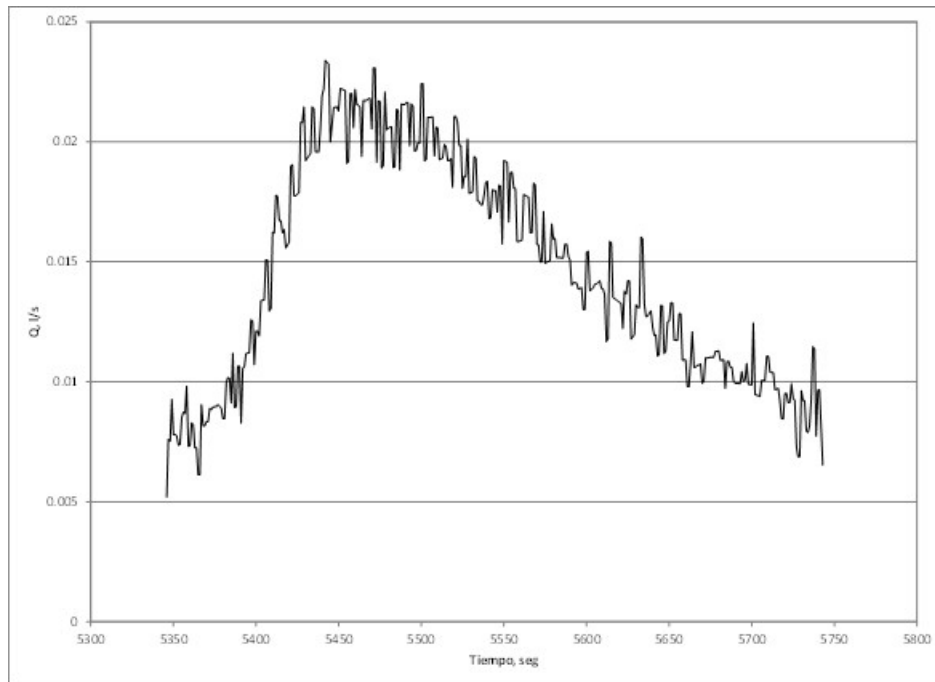


Ilustración 195. Variación de la medición 13 con el caudalímetro electromagnético antes y con depósito lleno accionando el escusado.

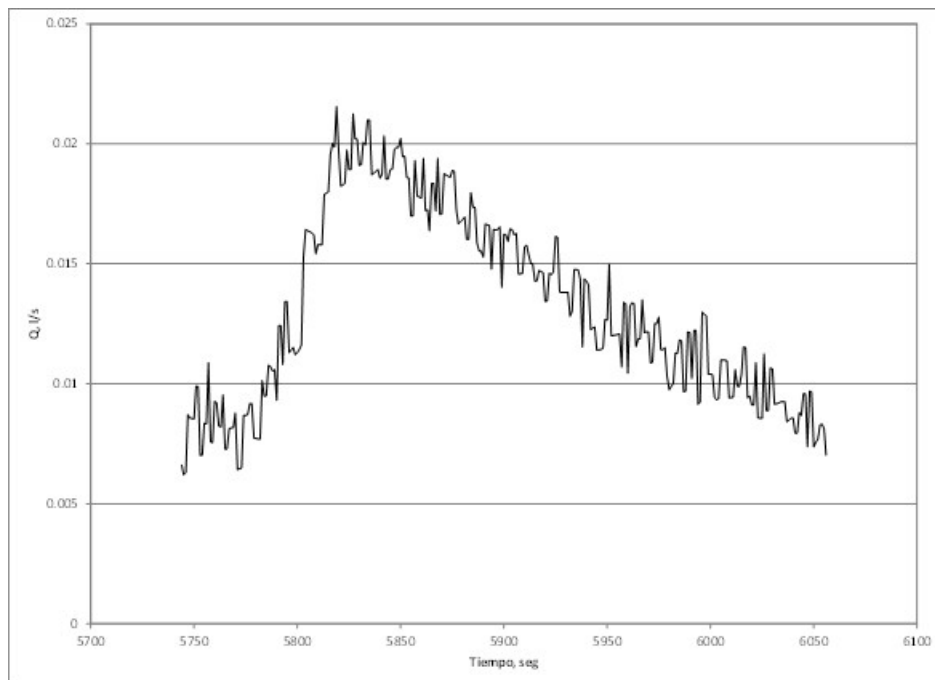


Ilustración 196. Variación de la medición 14 con el caudalímetro electromagnético antes y con depósito lleno accionando la llave.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

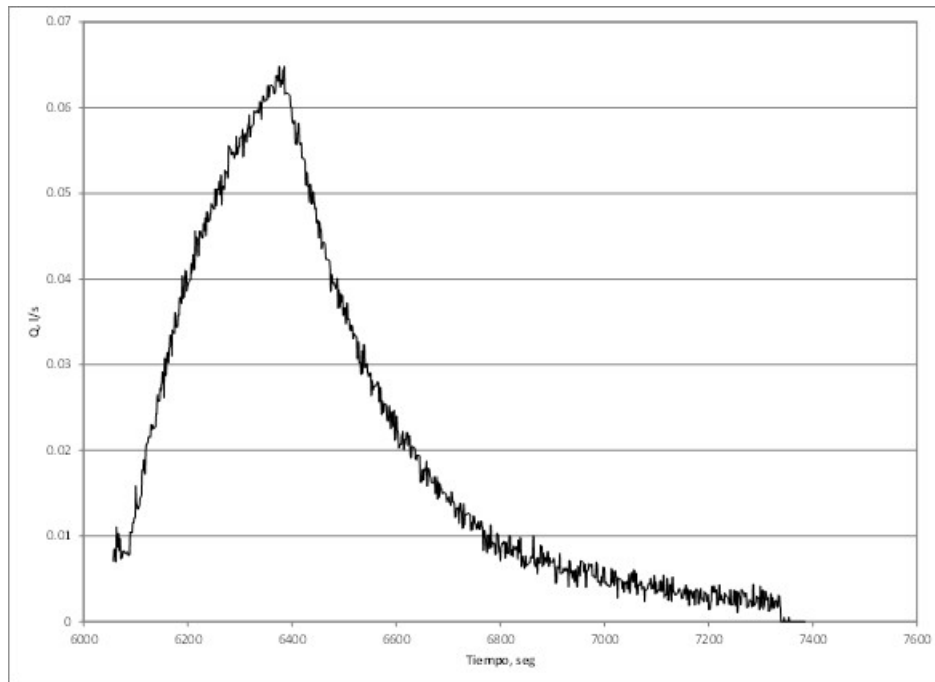


Ilustración 197. Variación de la medición 15 con el caudalímetro electromagnético antes y con depósito lleno accionando la regadera.

En la Ilustración 198 se muestran las 15 primeras mediciones de la parte 1.

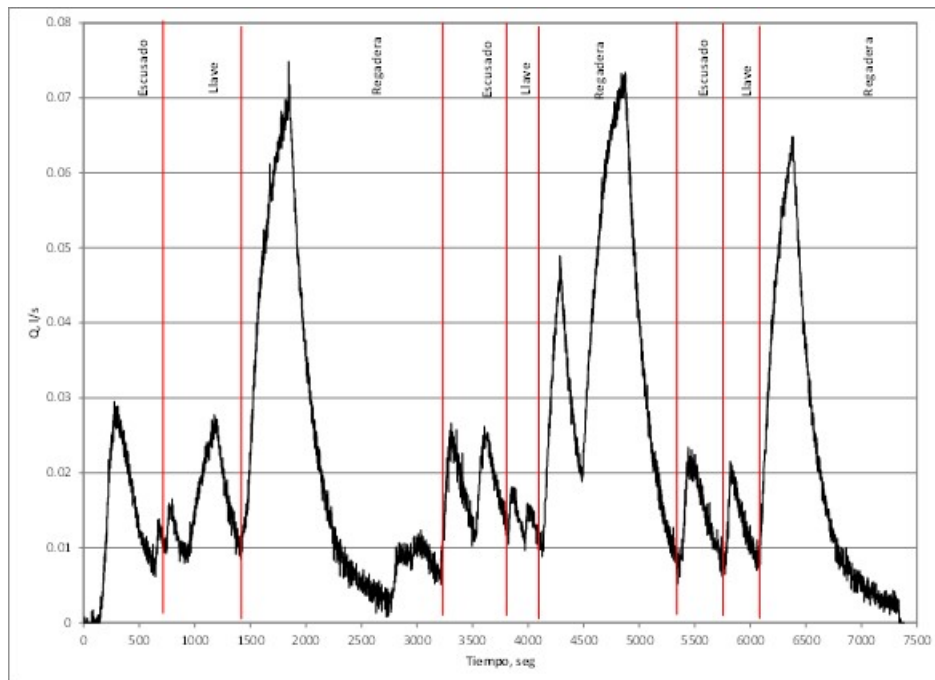


Ilustración 198. Variación de las primeras 15 mediciones con el caudalímetro electromagnético antes y con depósito lleno.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

Para la primera parte de la prueba, con tinaco lleno y caudalímetro antes del depósito, el tiempo transcurrido desde el inicio hasta el final de la acción 15 fue de dos horas con 3 minutos y el volumen de agua utilizado fue de 157.5 litros.

En cambio el volumen de agua registrado por el micromedidor domiciliario fue de 166.3 litros, generando así una diferencia con el caudalímetro electromagnético de 8.8 litros (5.3%).

En las Ilustraciones 199 a 213 se muestra el comportamiento del caudal registrado por el caudalímetro electromagnético con tinaco lleno permitiendo que éste se llene totalmente antes de la siguiente acción.

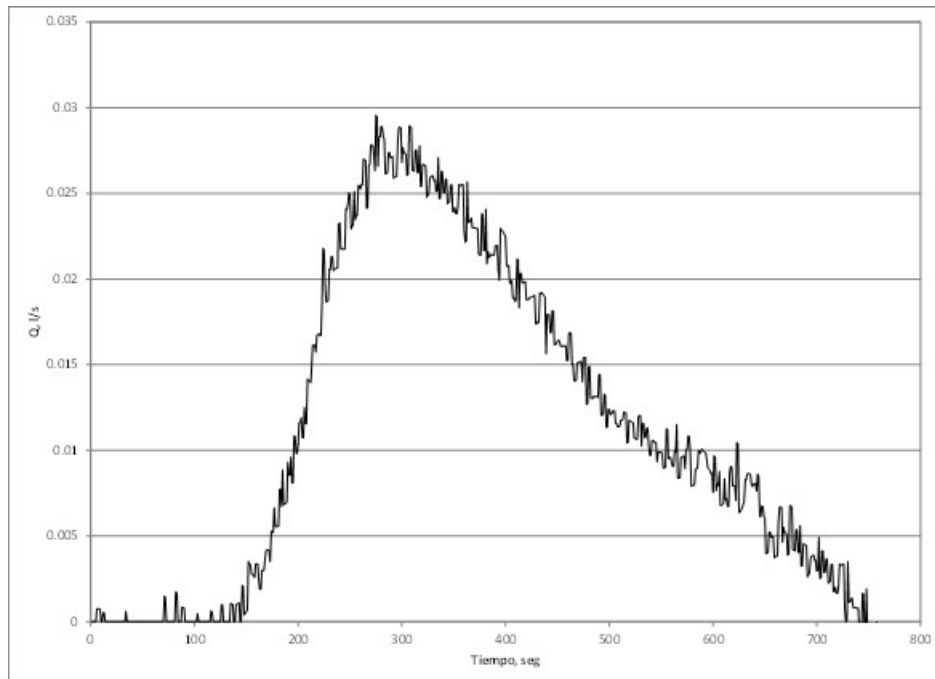


Ilustración 199. Variación de la medición 16 con el caudalímetro electromagnético antes y con depósito lleno accionando el escusado.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

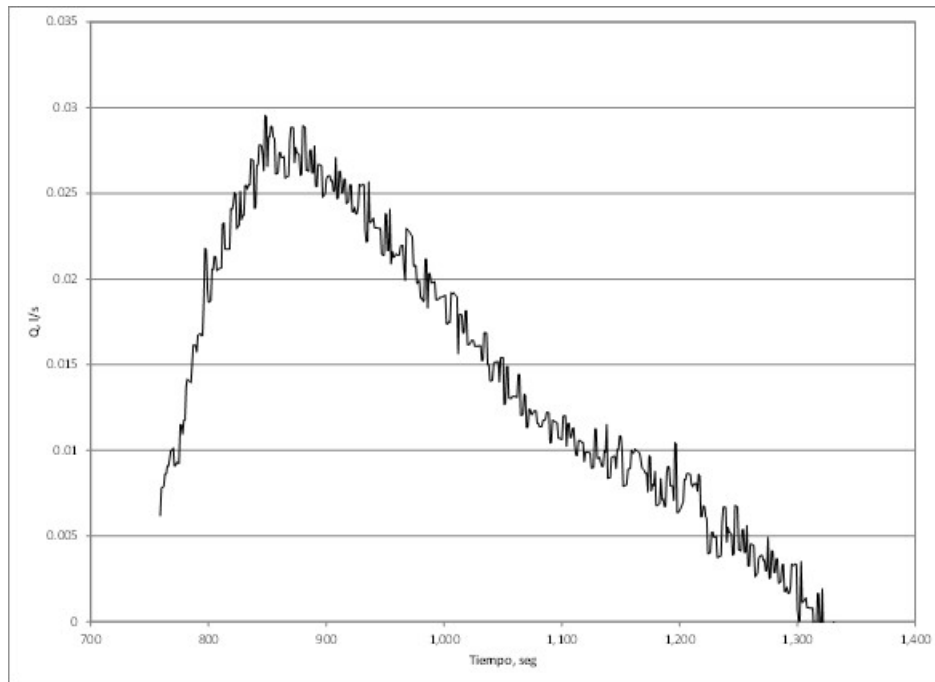


Ilustración 200. Variación de la medición 17 con el caudalímetro electromagnético antes y con depósito lleno accionando el escusado.

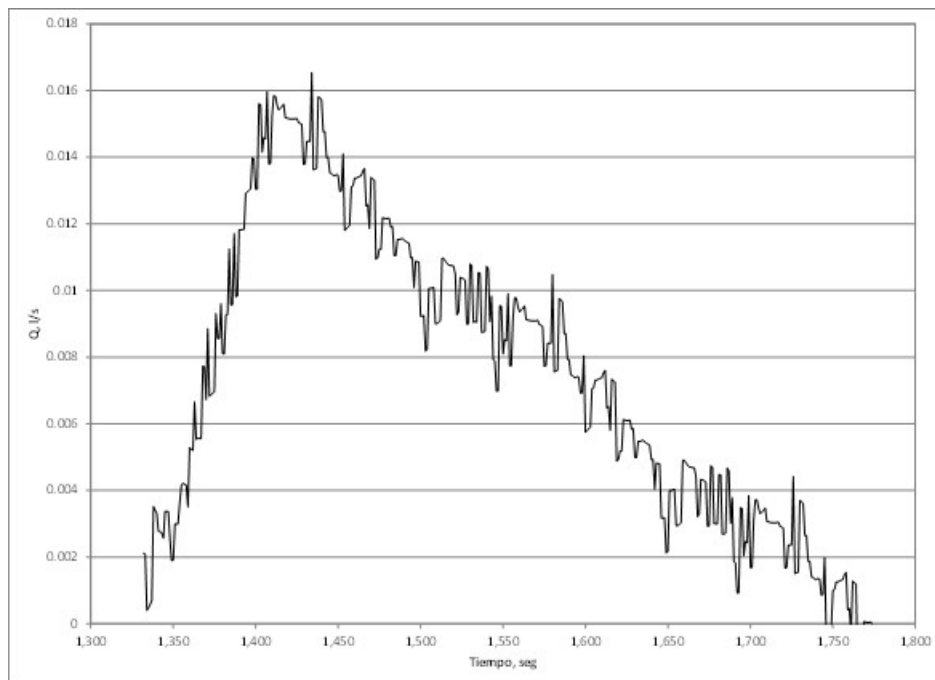


Ilustración 201. Variación de la medición 18 con el caudalímetro electromagnético antes y con depósito lleno accionando la llave.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

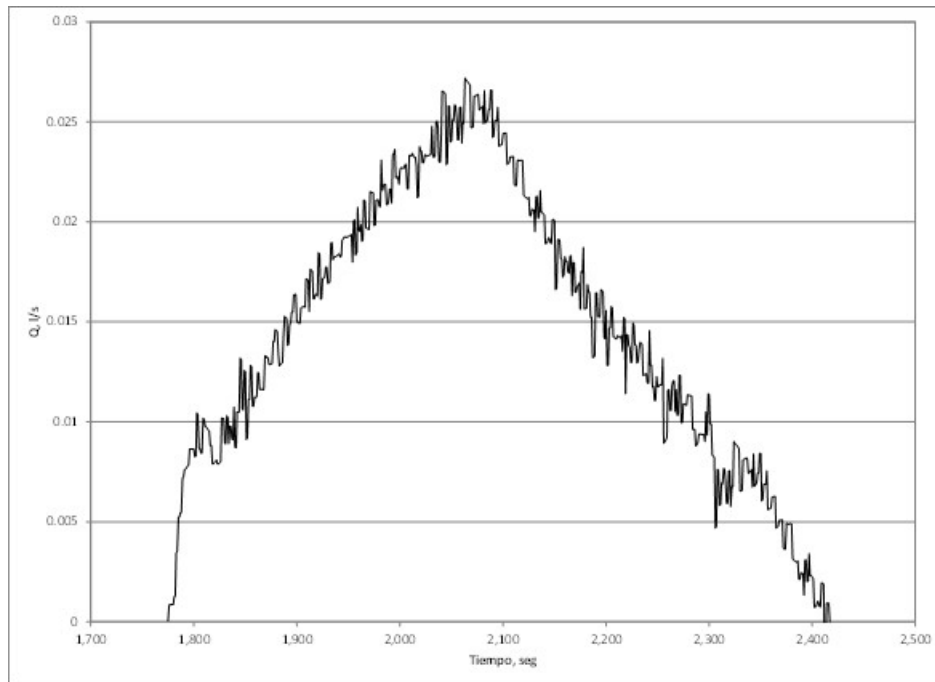


Ilustración 202. Variación de la medición 19 con el caudalímetro electromagnético antes y con depósito lleno accionando la llave.

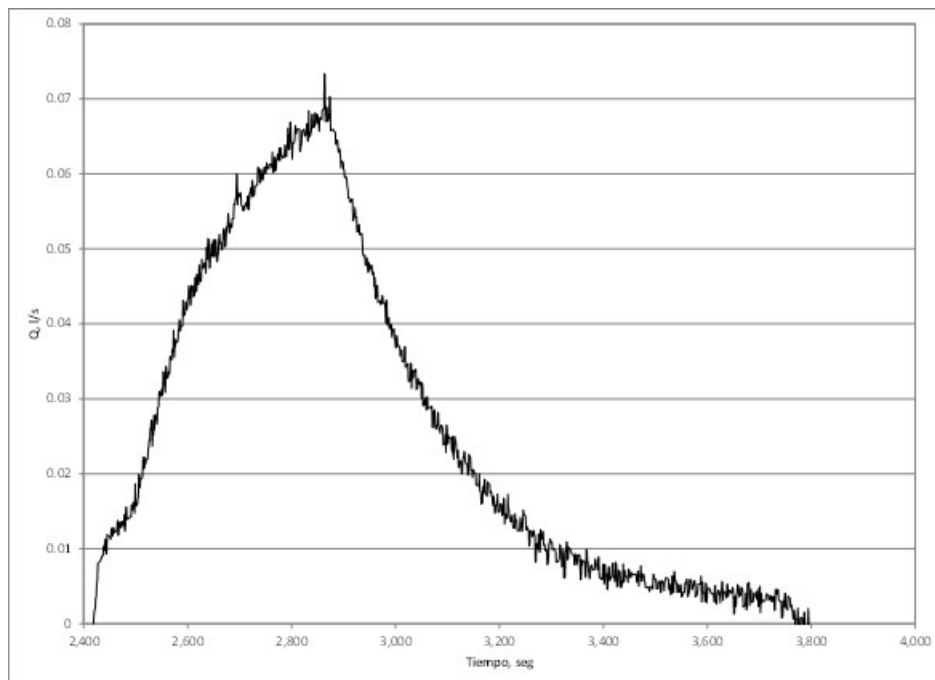


Ilustración 203. Variación de la medición 20 con el caudalímetro electromagnético antes y con depósito lleno accionando la regadera.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

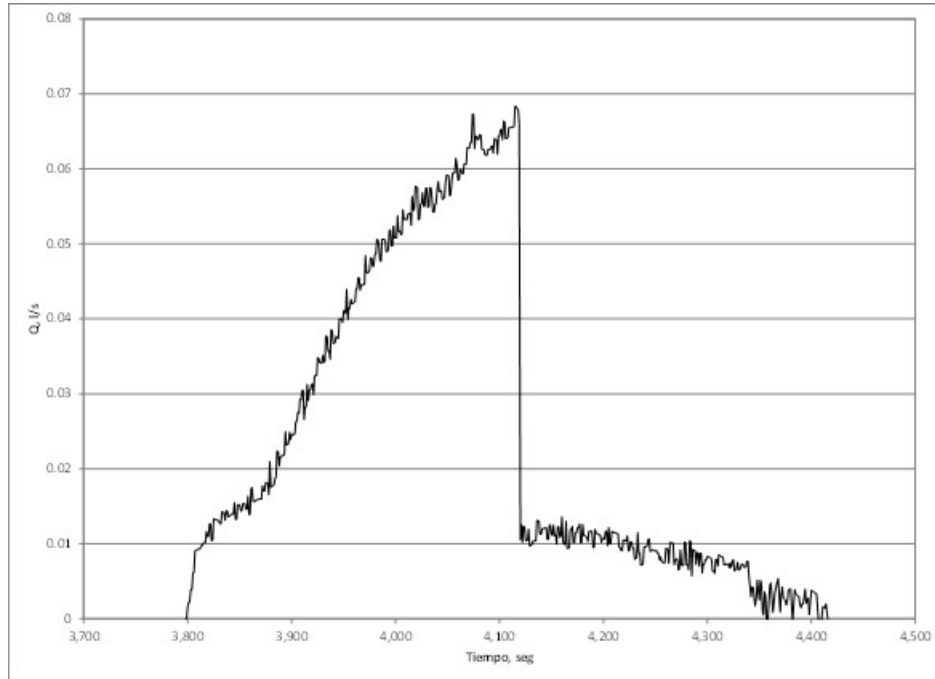


Ilustración 204. Variación de la medición 21 con el caudalímetro electromagnético antes y con depósito lleno accionando la regadera.

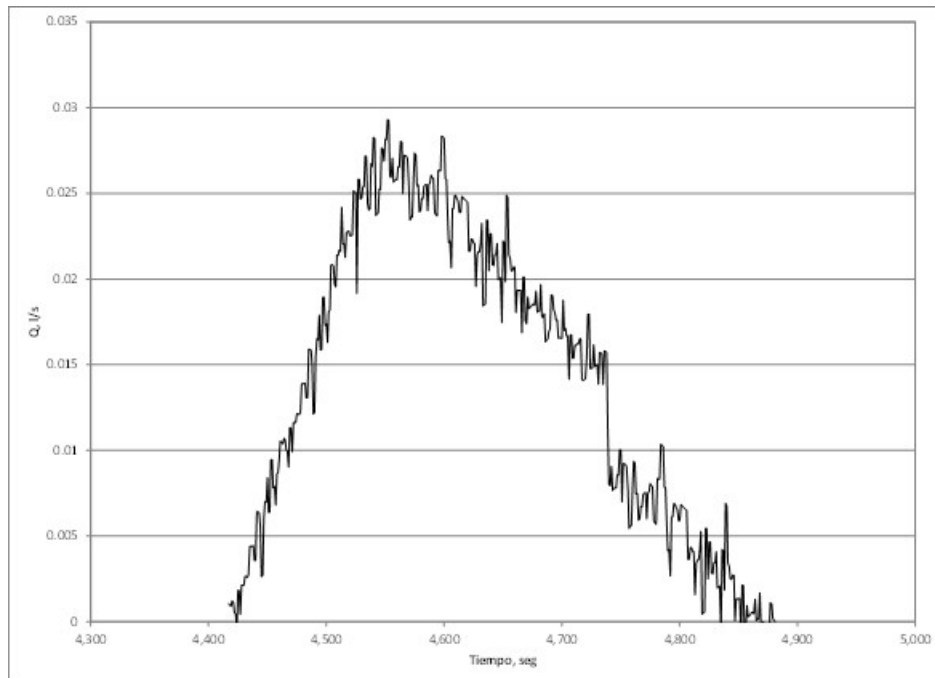


Ilustración 205. Variación de la medición 22 con el caudalímetro electromagnético antes y con depósito lleno accionando el escusado.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

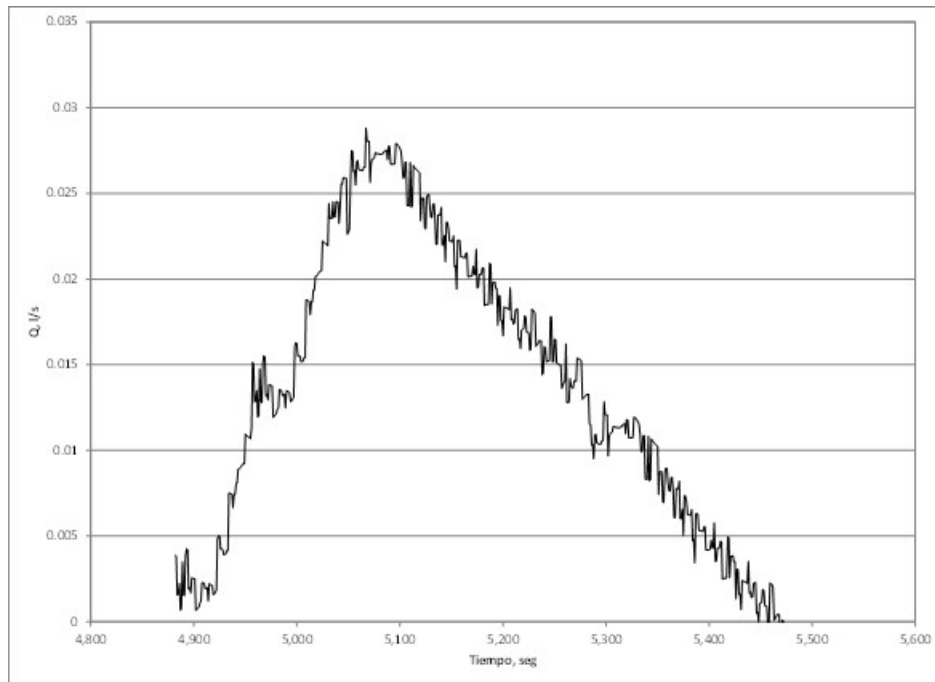


Ilustración 206. Variación de la medición 23 con el caudalímetro electromagnético antes y con depósito lleno accionando el escusado.

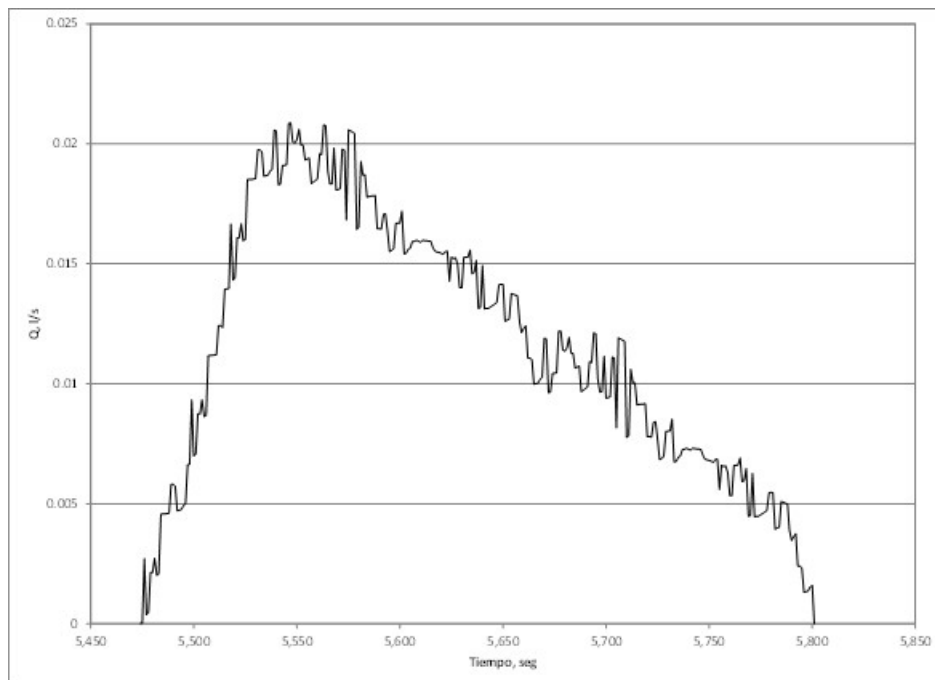


Ilustración 207. Variación de la medición 24 con el caudalímetro electromagnético antes y con depósito lleno accionando la llave.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

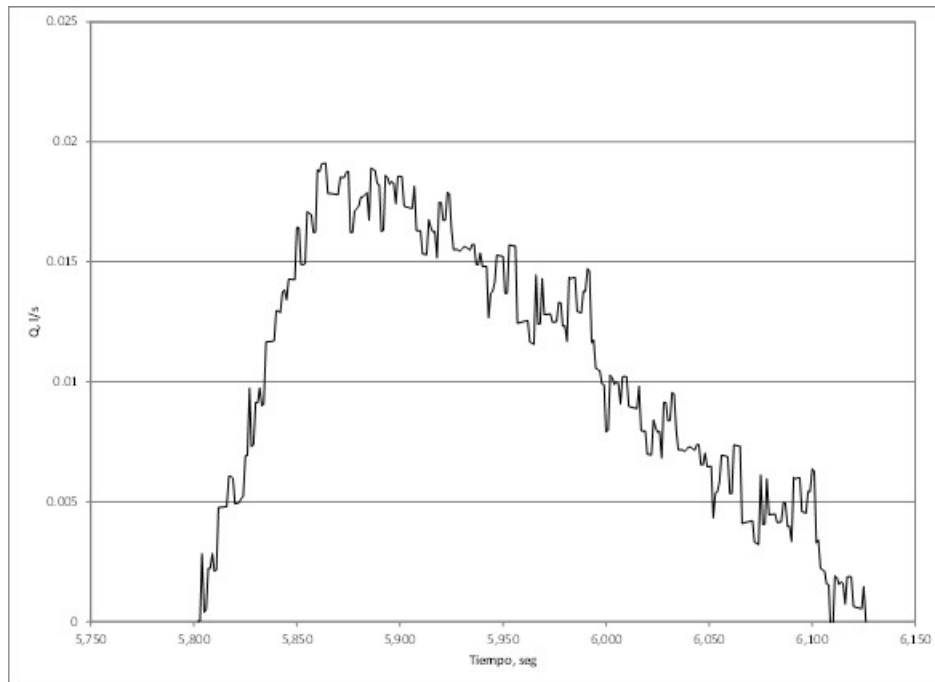


Ilustración 208. Variación de la medición 25 con el caudalímetro electromagnético antes y con depósito lleno accionando la llave.

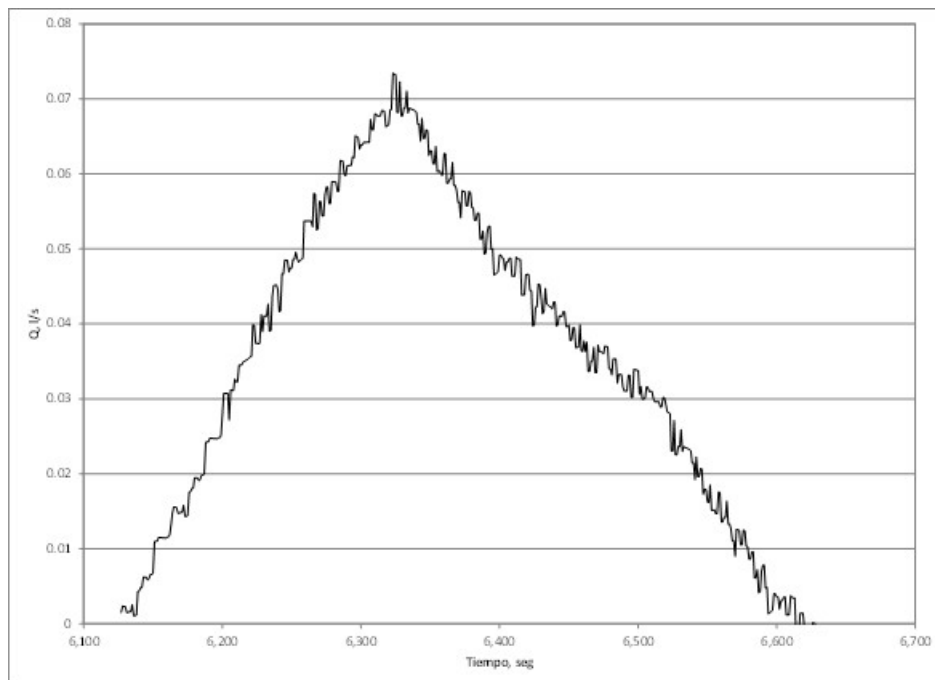


Ilustración 209. Variación de la medición 26 con el caudalímetro electromagnético antes y con depósito lleno accionando la regadera.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

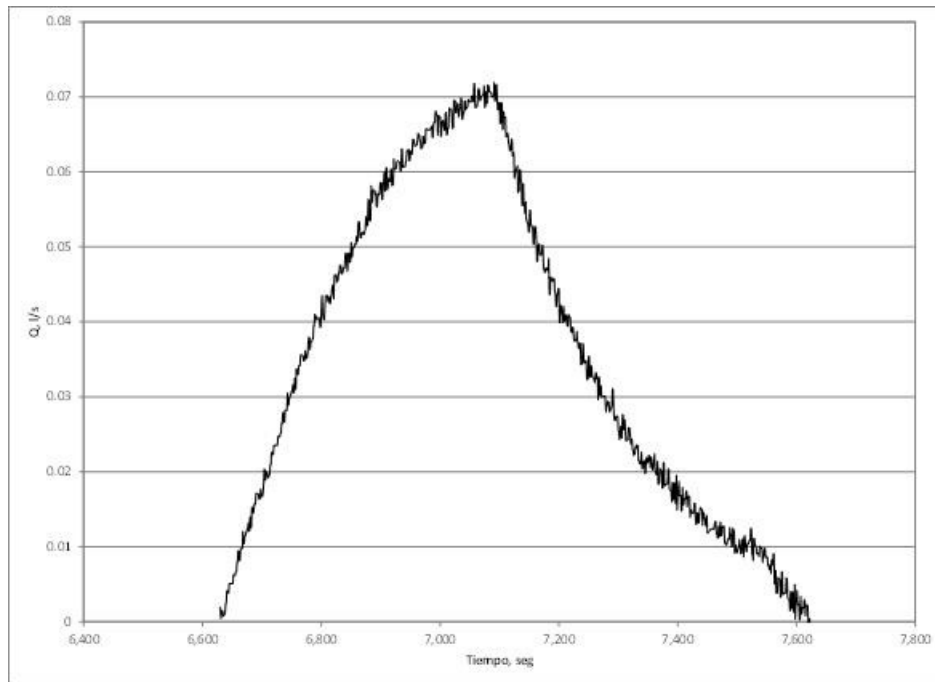


Ilustración 210. Variación de la medición 27 con el caudalímetro electromagnético antes y con depósito lleno accionando la regadera.

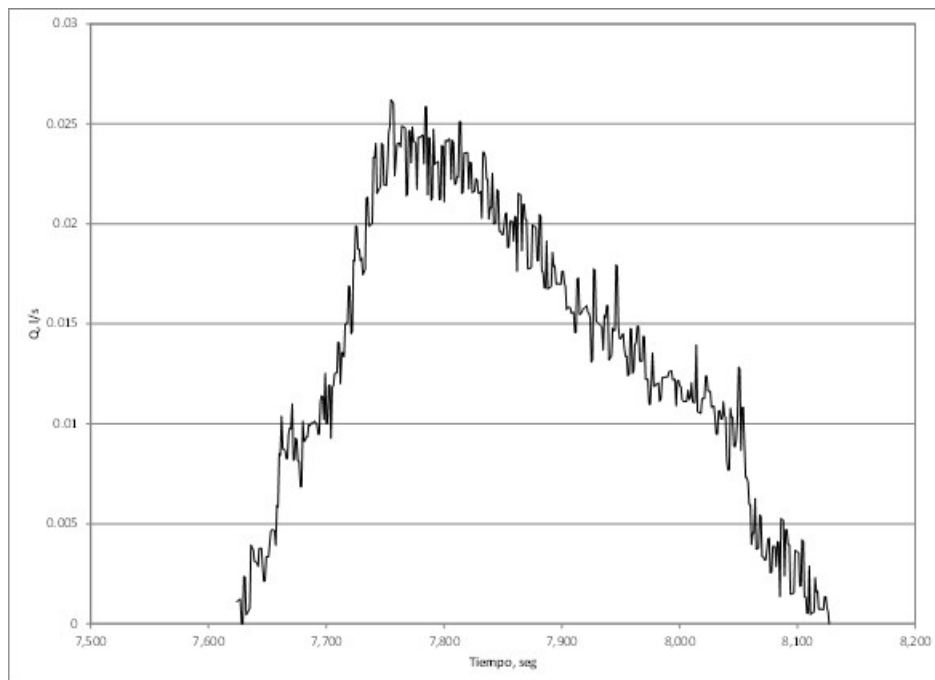


Ilustración 211. Variación de la medición 28 con el caudalímetro electromagnético antes y con depósito lleno accionando el escusado.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

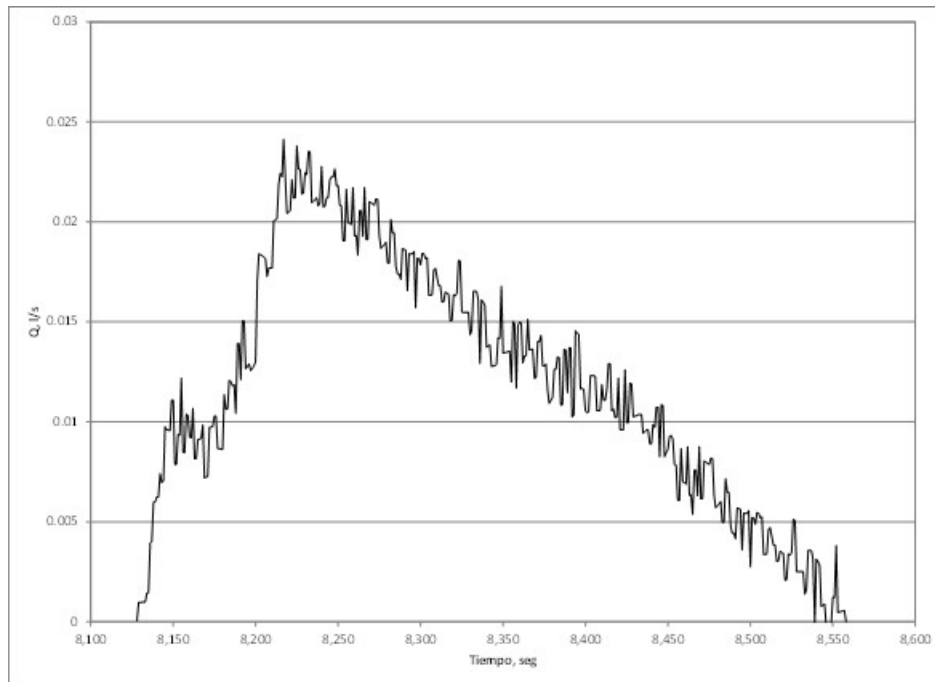


Ilustración 212. Variación de la medición 29 con el caudalímetro electromagnético antes y con depósito lleno accionando la llave.

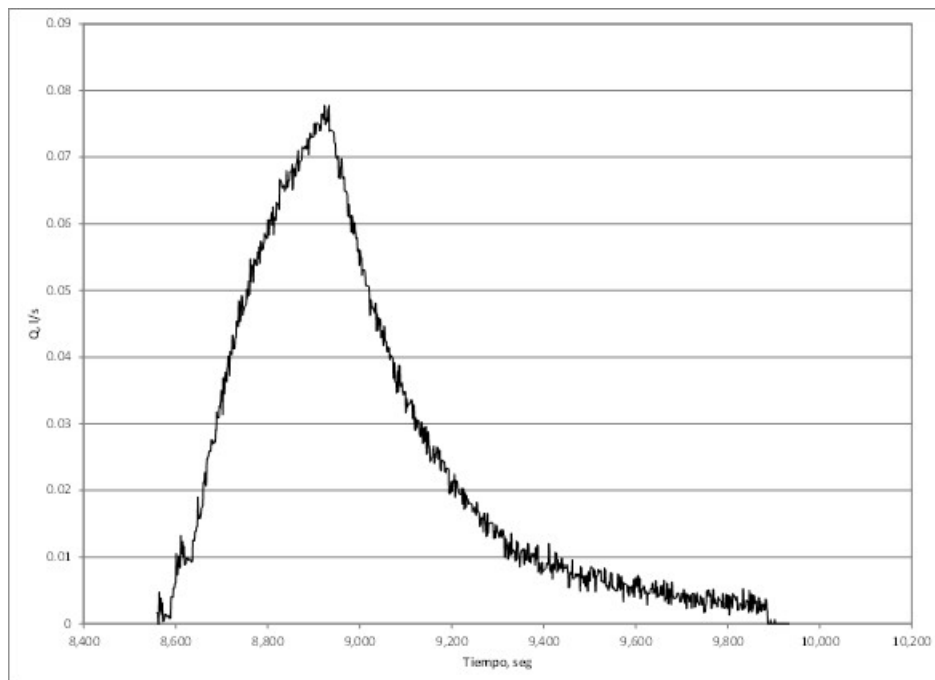


Ilustración 213. Variación de la medición 30 con el caudalímetro electromagnético antes y con depósito lleno accionando la regadera.

En la Ilustración 214 se muestran las 15 mediciones de la parte 2.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

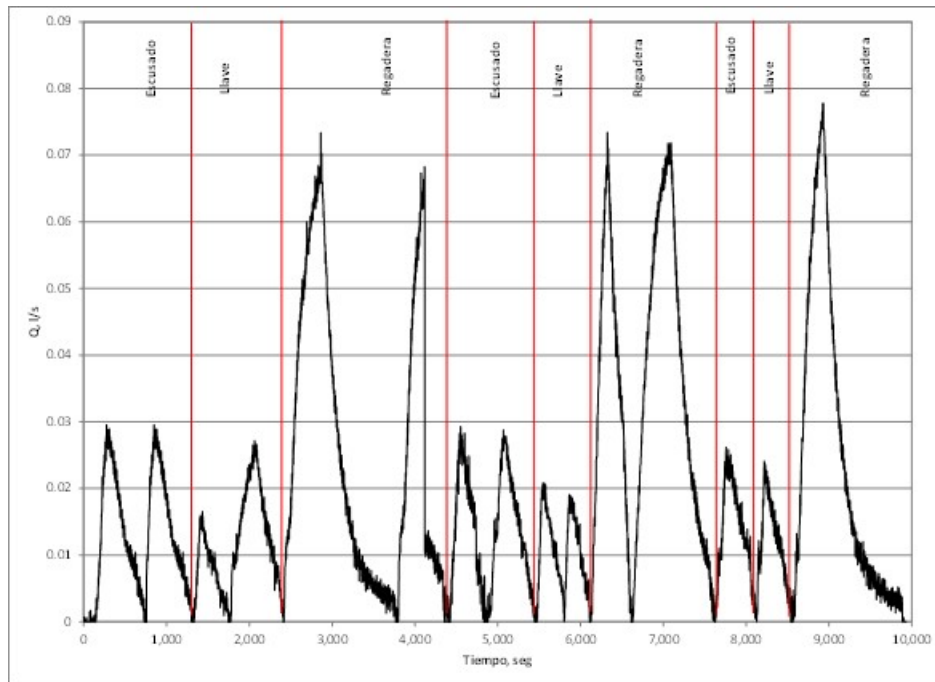


Ilustración 214. Variación de las últimas 15 mediciones con el caudalímetro electromagnético antes y con depósito lleno.

El tiempo total transcurrido en esta segunda etapa, desde la medición 16 hasta la 30, fue de dos horas con 46 minutos, registrando un volumen de 183.46 litros.

En cambio con el micromedidor domiciliario el volumen de agua registrado fue de 196.3 litros, generando así una diferencia con el caudalímetro electromagnético de 12.84 litros (7%). En las Fotos 20 y 21 se ilustra respectivamente las lecturas inicial y final del micromedidor.

Se realizaron mediciones por cuatro días consecutivos midiendo la variación del caudal de suministro con demanda de agua de un domicilio simulada en laboratorio y comparándolo con las lecturas de un micromedidor domiciliario normal.

El intervalo de tiempo para esta prueba fue de cada minuto, por consiguiente en las Ilustraciones 215 a la 230 se muestran los registros obtenidos con el caudalímetro electromagnético para los cuatro días. Para observar mejor la variación de caudal se muestran las gráficas cada seis horas de registros.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

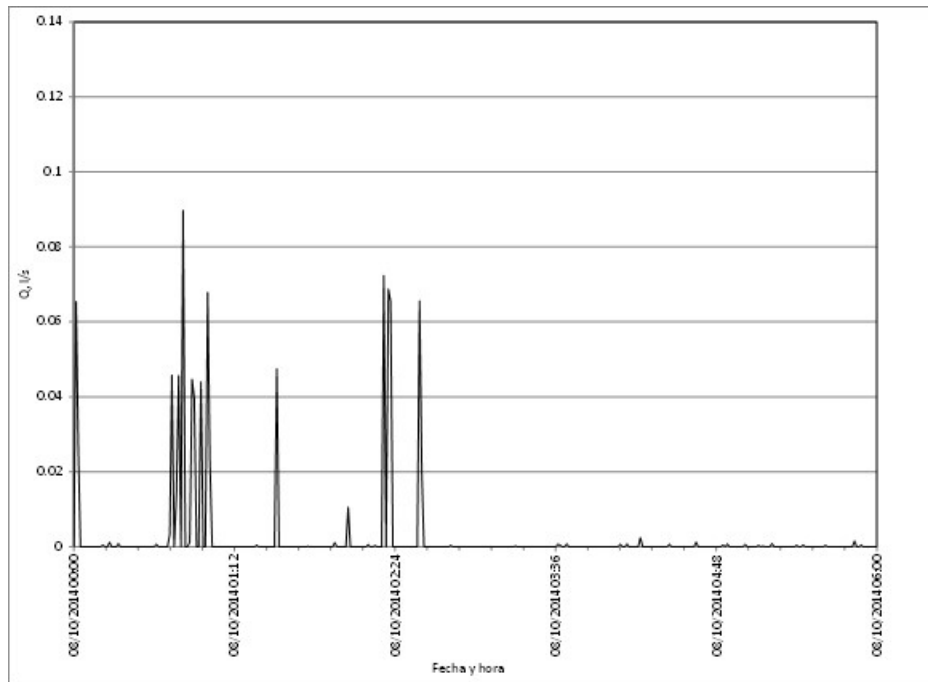


Ilustración 215. Registros realizados por el caudal electromagnético desde las 0 horas hasta las 6 horas del primer día.

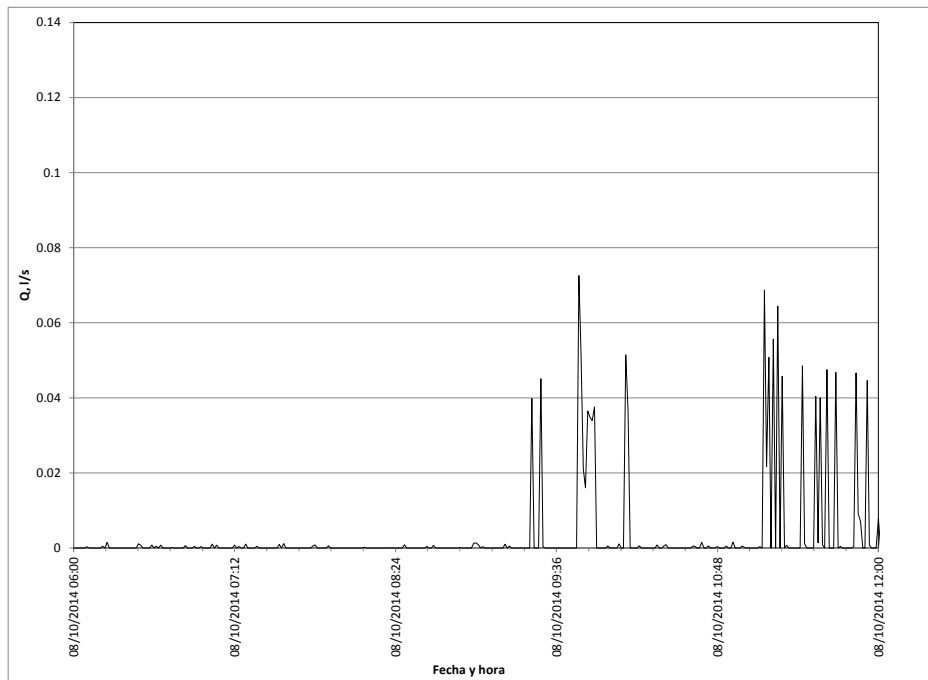


Ilustración 216. Registros realizados por el caudal electromagnético desde las 6 horas hasta las 12 horas del primer día.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

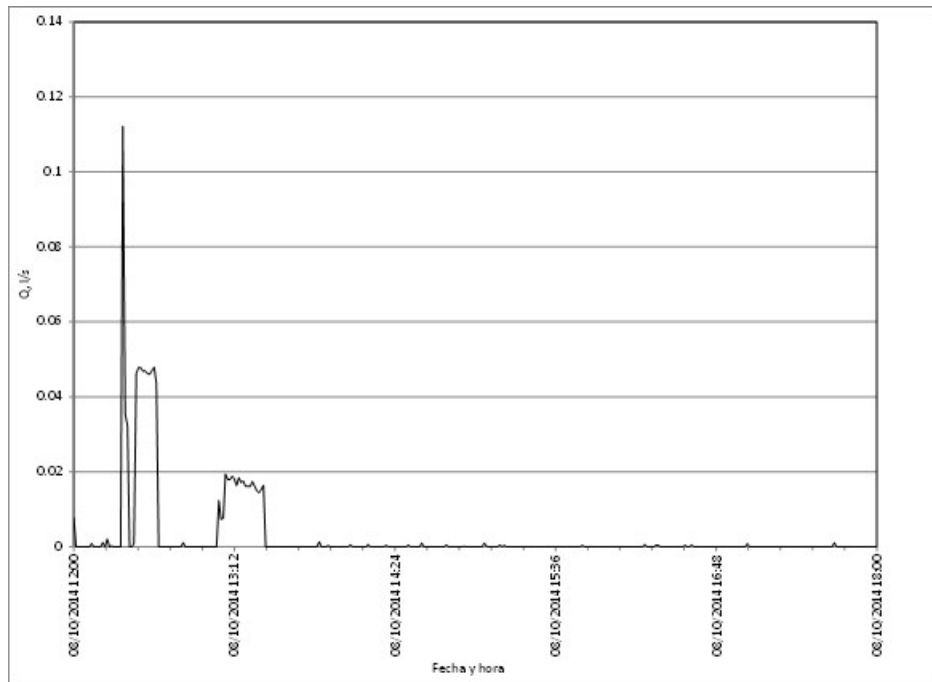


Ilustración 217. Registros realizados por el caudal electromagnético desde las 12 horas hasta las 18 horas del primer día.

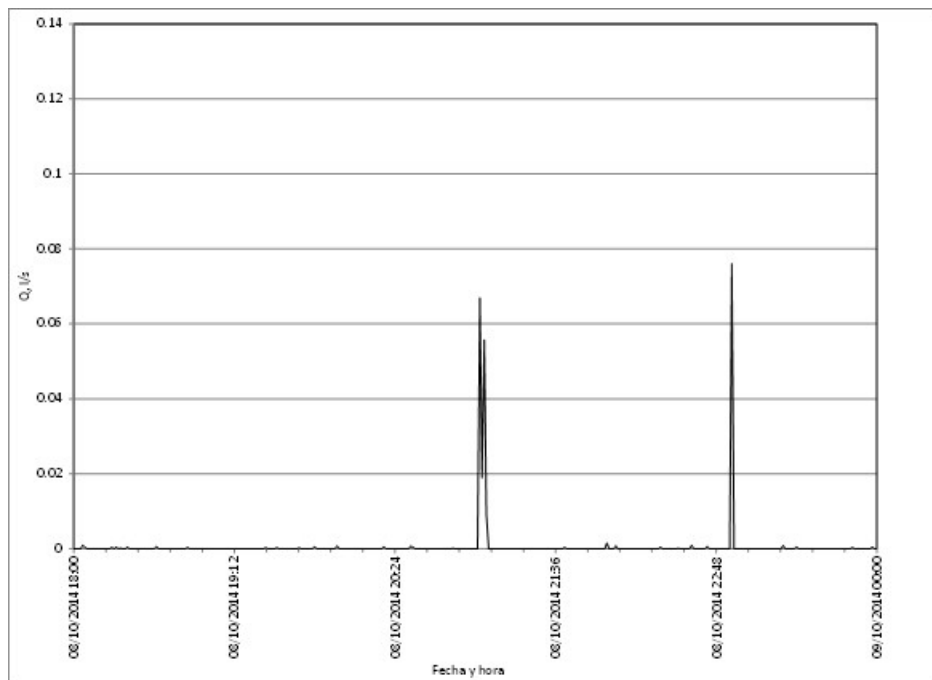


Ilustración 218. Registros realizados por el caudal electromagnético desde las 18 horas hasta las 24 horas del primer día.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

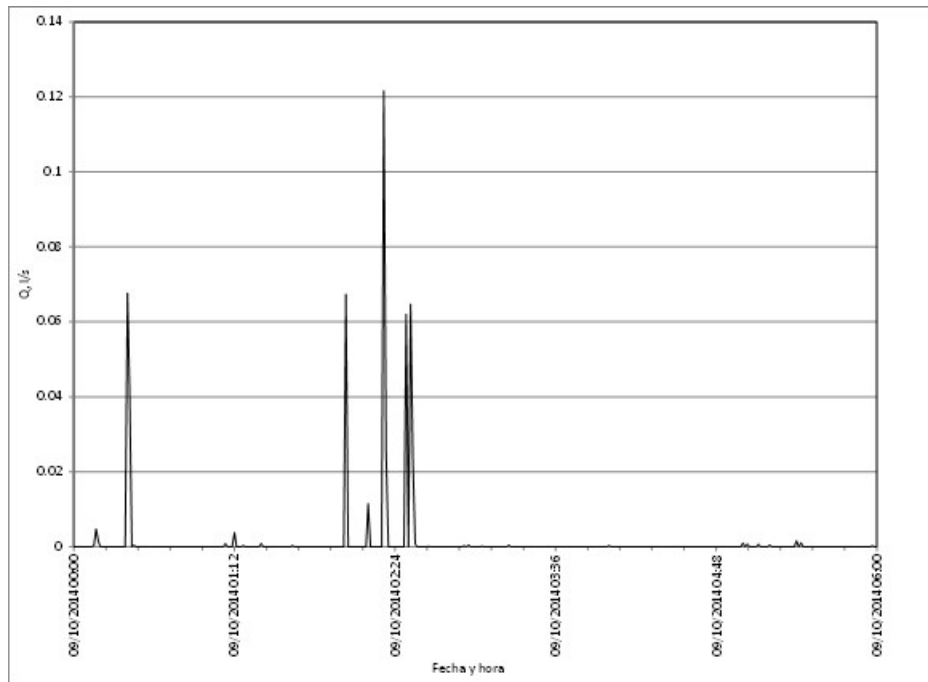


Ilustración 219. Registros realizados por el caudal electromagnético desde las 0 horas hasta las 6 horas del segundo día.

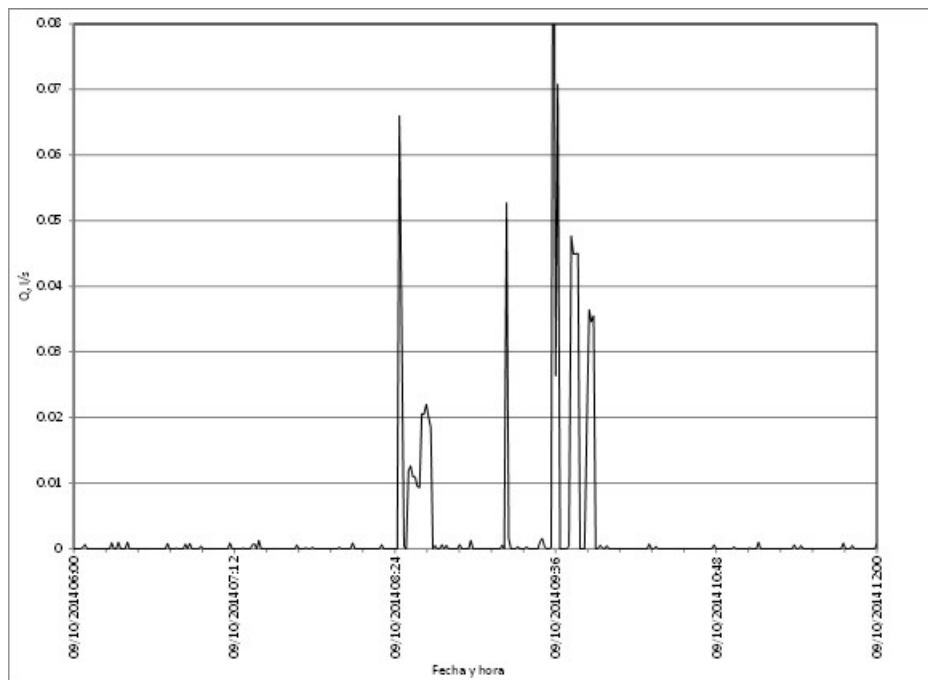


Ilustración 220. Registros realizados por el caudal electromagnético desde las 6 horas hasta las 12 horas del segundo día.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

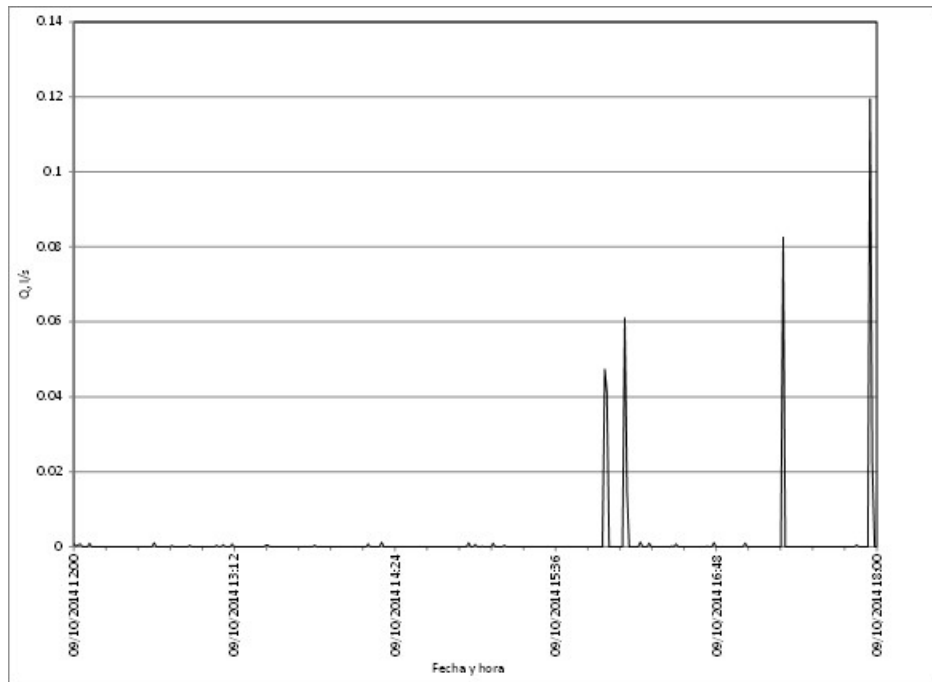


Ilustración 221. Registros realizados por el caudal electromagnético desde las 12 horas hasta las 18 horas del segundo día.

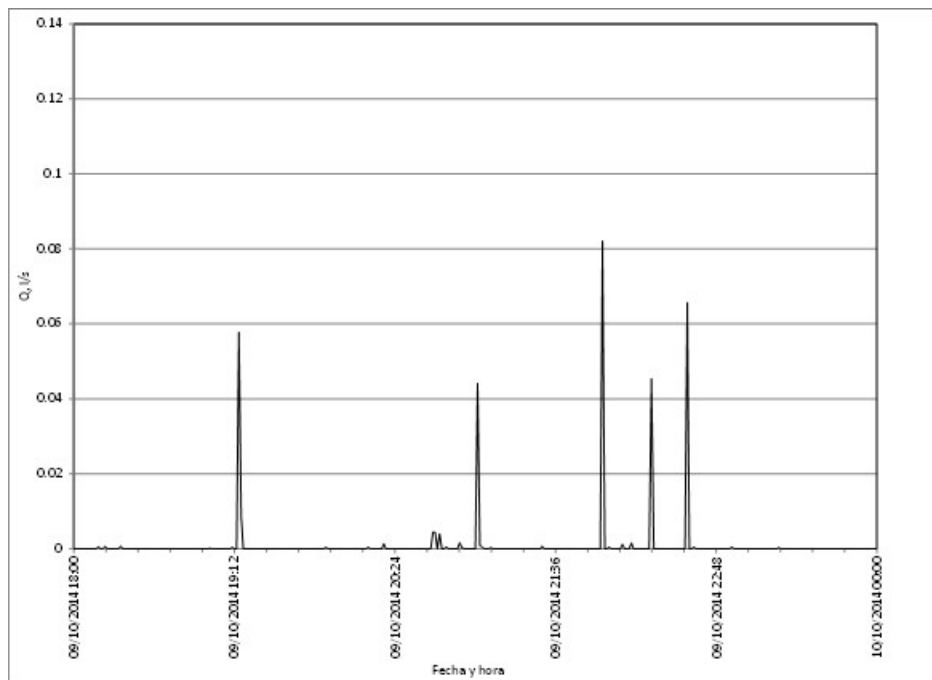


Ilustración 222. Registros realizados por el caudal electromagnético desde las 18 horas hasta las 24 horas del segundo día.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

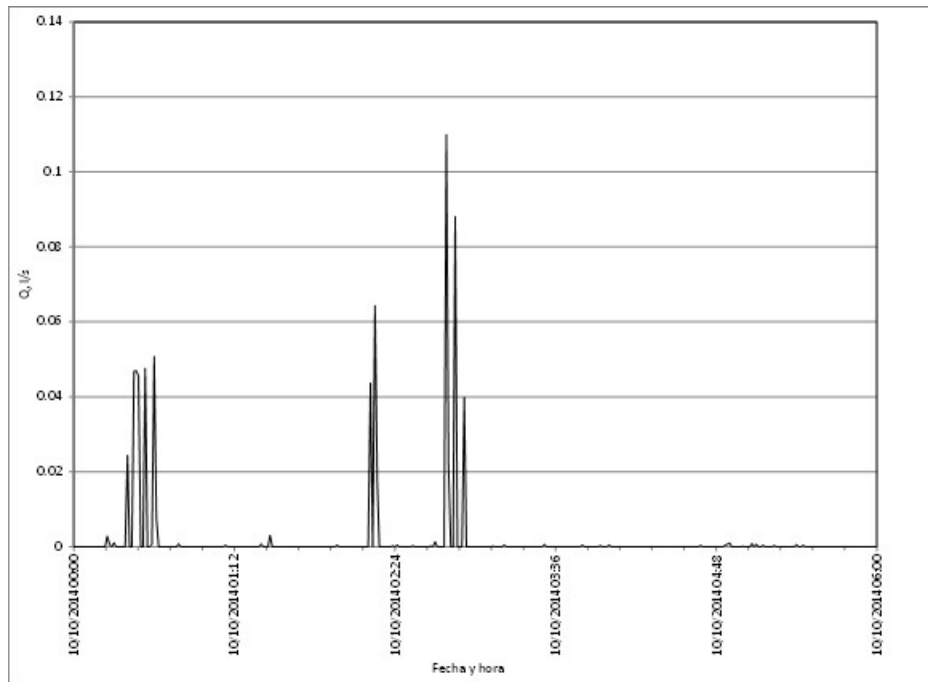


Ilustración 223. Registros realizados por el caudal electromagnético desde las 0 horas hasta las 6 horas del tercer día.

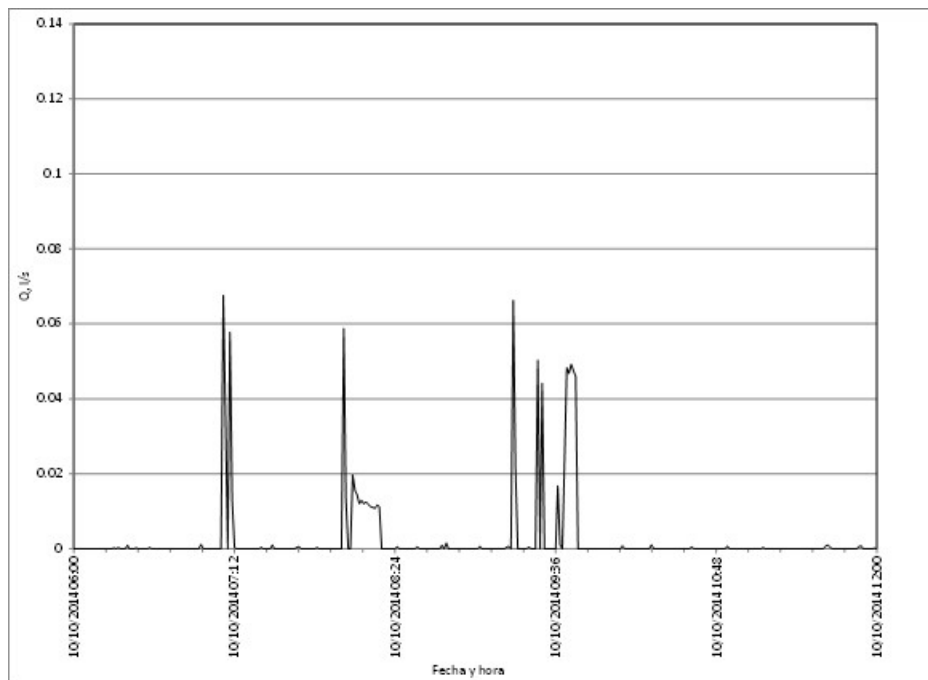


Ilustración 224. Registros realizados por el caudal electromagnético desde las 6 horas hasta las 12 horas del tercer día.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

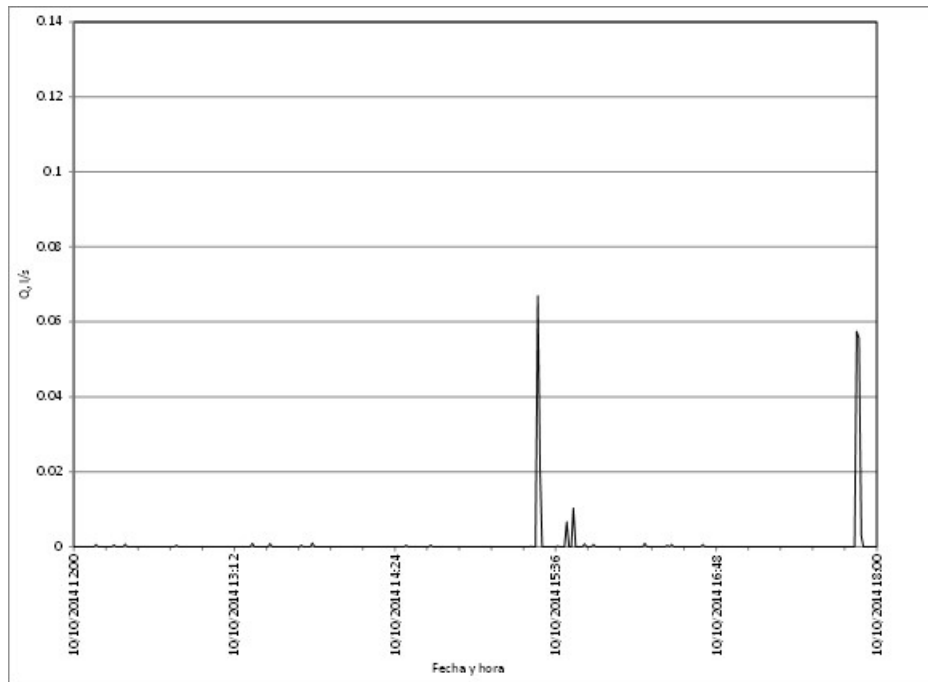


Ilustración 225. Registros realizados por el caudal electromagnético desde las 12 horas hasta las 18 horas del tercer día.

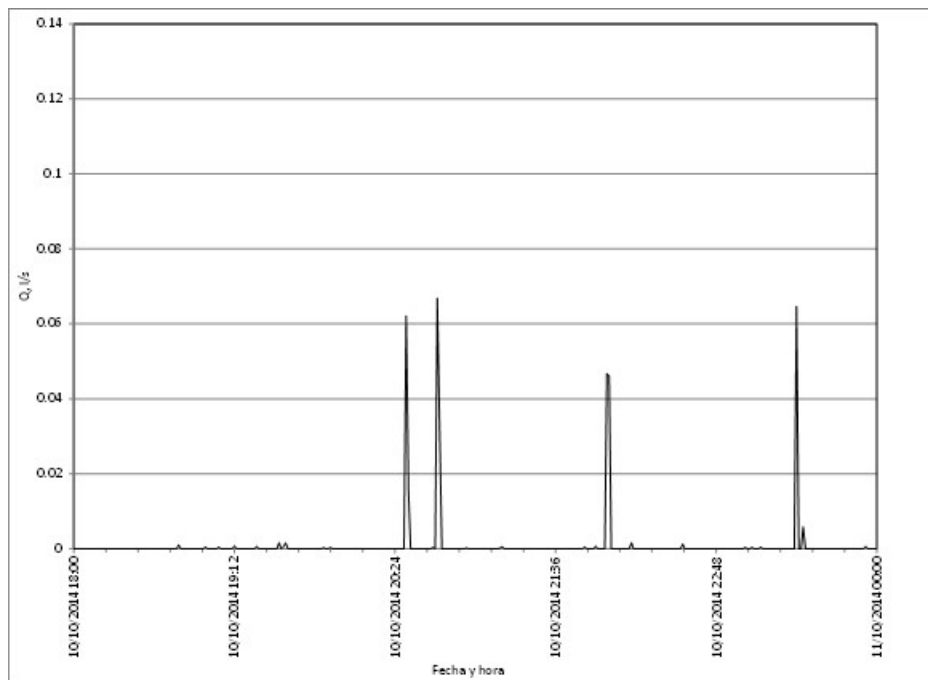


Ilustración 226. Registros realizados por el caudal electromagnético desde las 18 horas hasta las 24 horas del tercer día.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

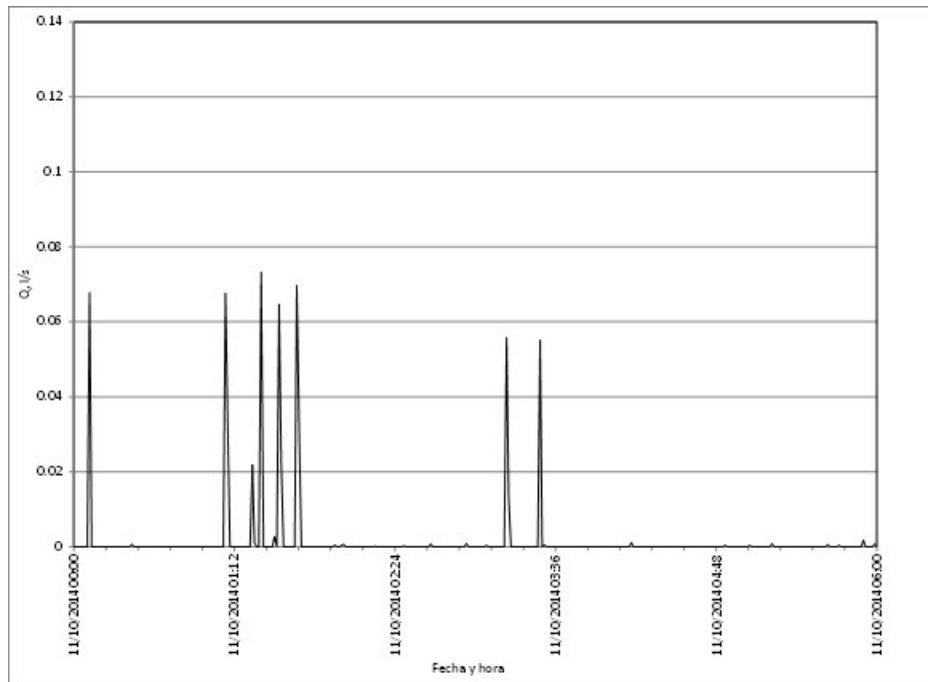


Ilustración 227. Registros realizados por el caudal electromagnético desde las 0 horas hasta las 6 horas del cuarto día.

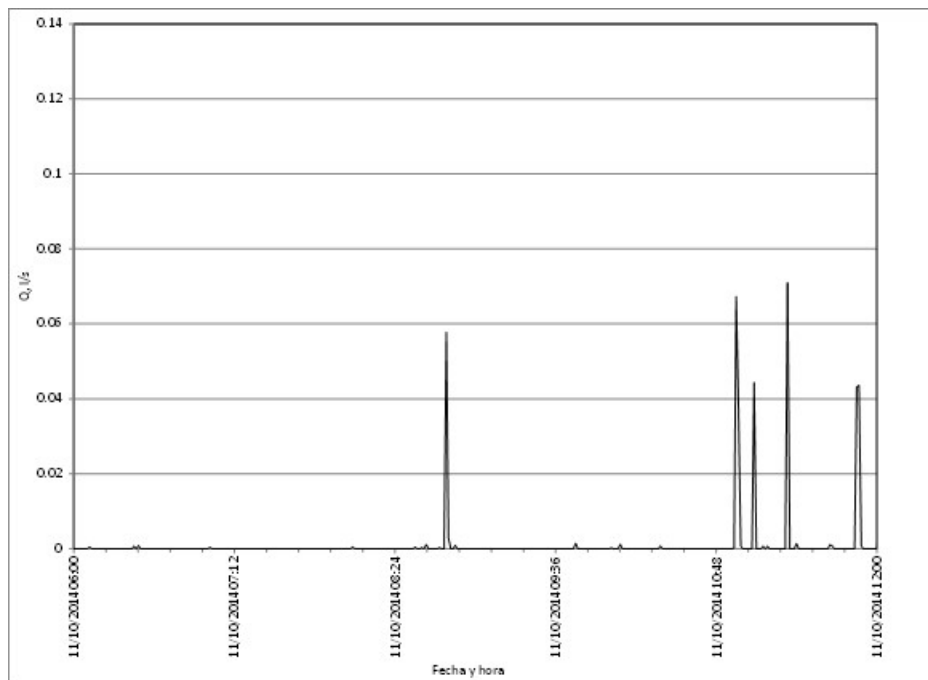


Ilustración 228. Registros realizados por el caudal electromagnético desde las 6 horas hasta las 12 horas del cuarto día.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

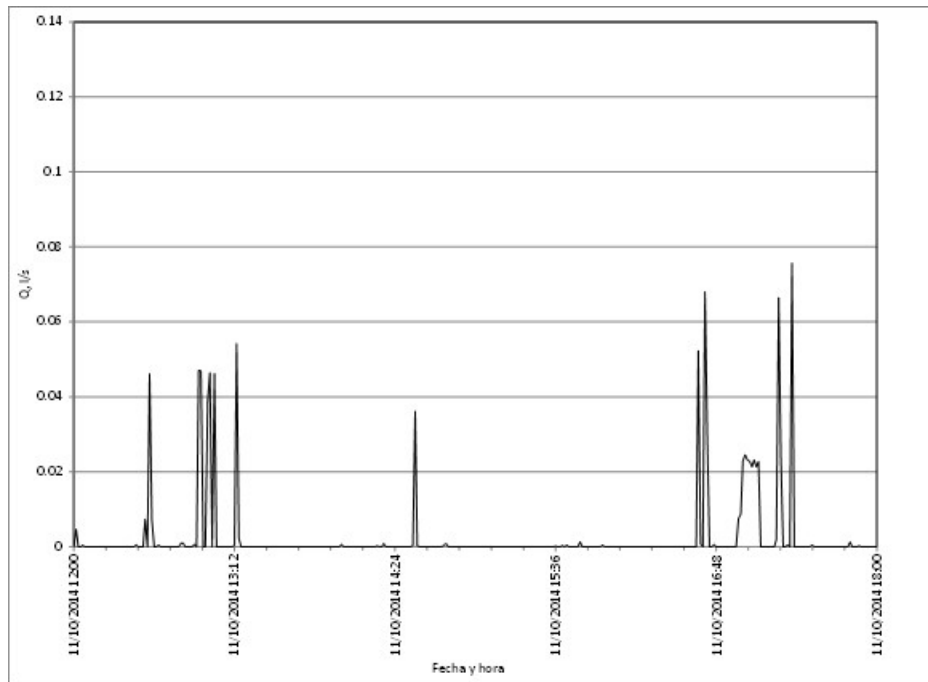


Ilustración 229. Registros realizados por el caudal electromagnético desde las 12 horas hasta las 18 horas del cuarto día.

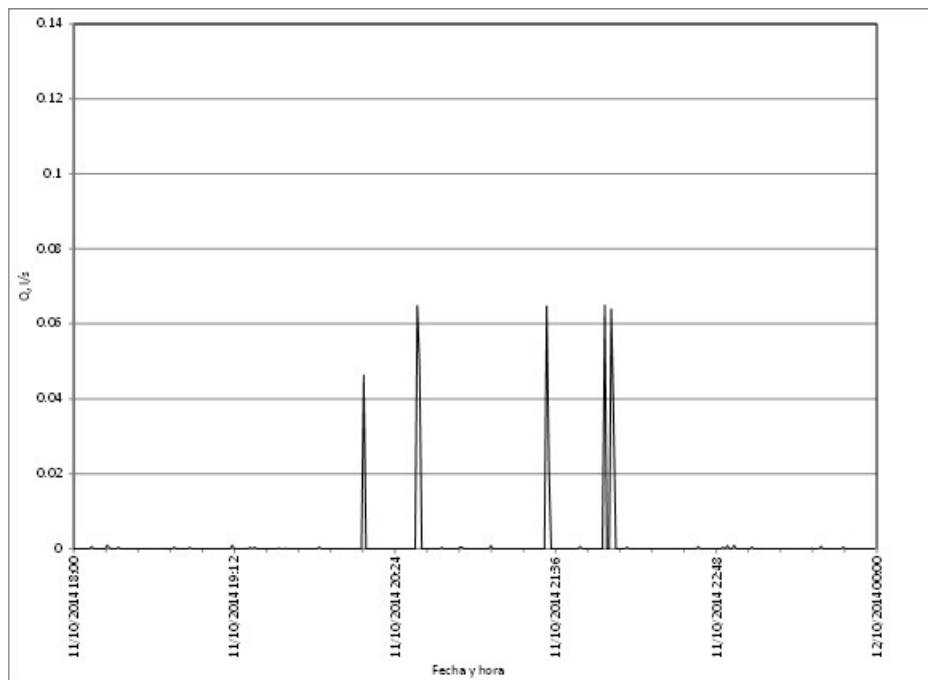


Ilustración 230. Registros realizados por el caudal electromagnético desde las 18 horas hasta las 24 horas del cuarto día.

En la Ilustración 231 se muestran los cuatro días de registros.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

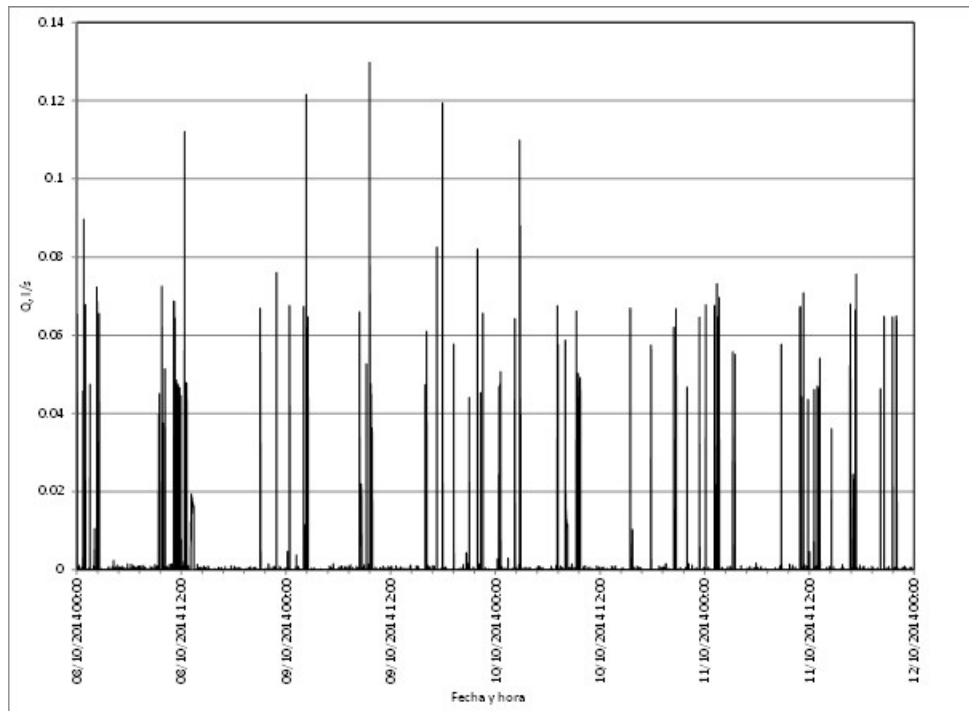


Ilustración 231. Registros realizados por el caudal electromagnético durante cuatro días consecutivos.

El volumen total medido durante los cuatro días fue de 593.2 litros, en cambio con el micromedidor domiciliario se registraron 616.9 litros, produciendo una diferencia de 23.7 litros (4%).

9.8 Álbum fotográfico de las mediciones de demanda



Foto 1. Sistema para las mediciones de la variación de caudal

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



Foto 2. Sistema de depósitos

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



Foto 3. Accesorios para la medición de la variación de caudal

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



Foto 4. Depósito en acrílico para la medición del volumen

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



Foto 5. Medidor electromagnético

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



Foto 6. Instalación del Caudalímetro electromagnético antes del depósito.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



Foto 7. Instalación del Caudalímetro electromagnético antes del depósito, continuación.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



Foto 8. Instalación del Caudalímetro electromagnético antes del depósito, continuación.



Foto 9. Instalación de caudalímetro electromagnético después del depósito

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



Foto 10. Instalación de caudalímetro electromagnético después del depósito, continuación.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



Foto 11. Instalación de caudalímetro electromagnético después del depósito, continuación.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



Foto 12. Instalación de caudalímetro electromagnético después del depósito, continuación

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

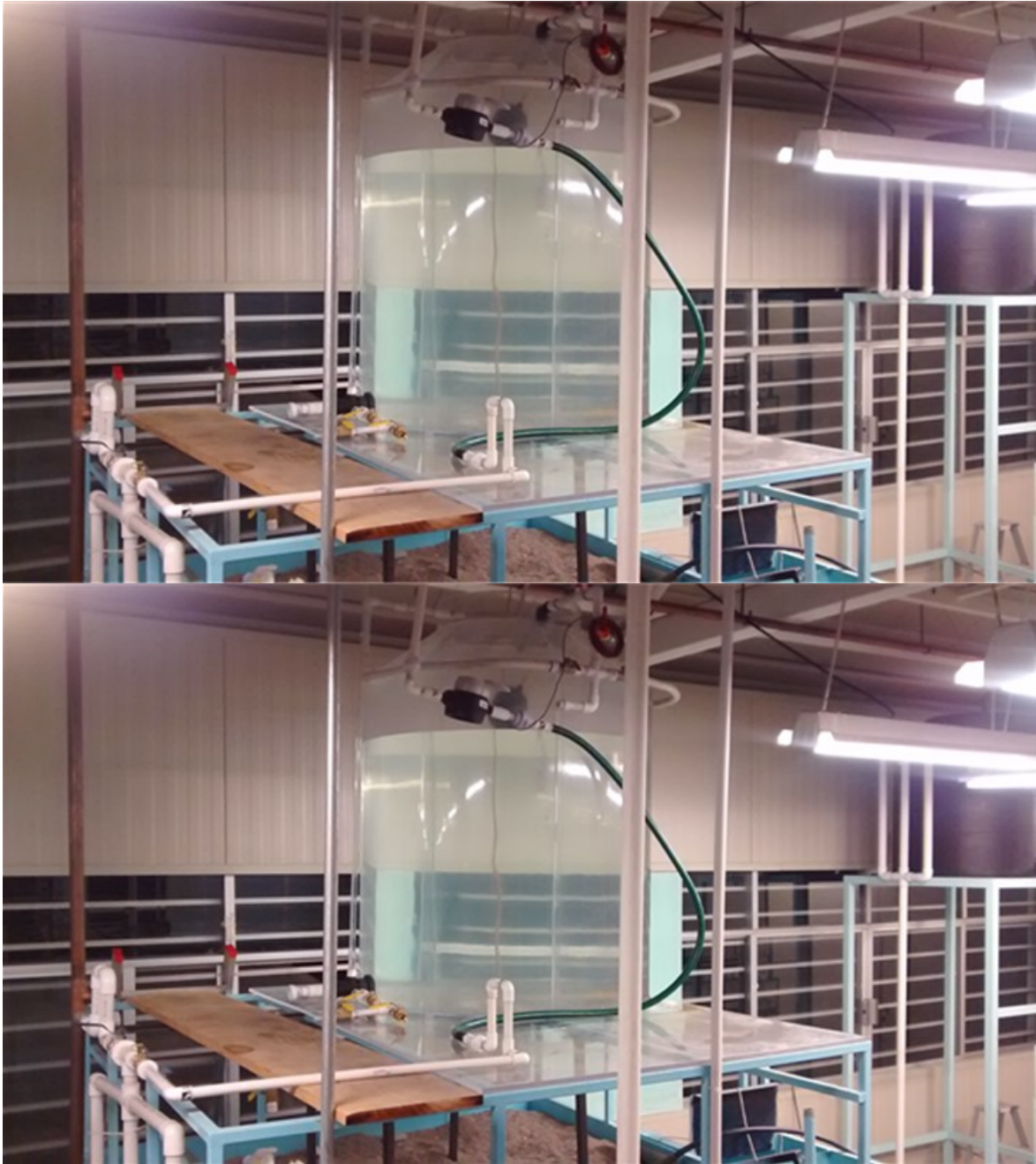


Foto 13. Instalación del caudalímetro y del micromedidor obviando el depósito.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



Foto 14. Instalación del caudalímetro y del micromedidor obviando el depósito, continuación.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



Foto 15. Instalación del caudalímetro y del micromedidor obviando el depósito, continuación.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



Foto 16. Acción del escudado para la determinación de la variación de caudal.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

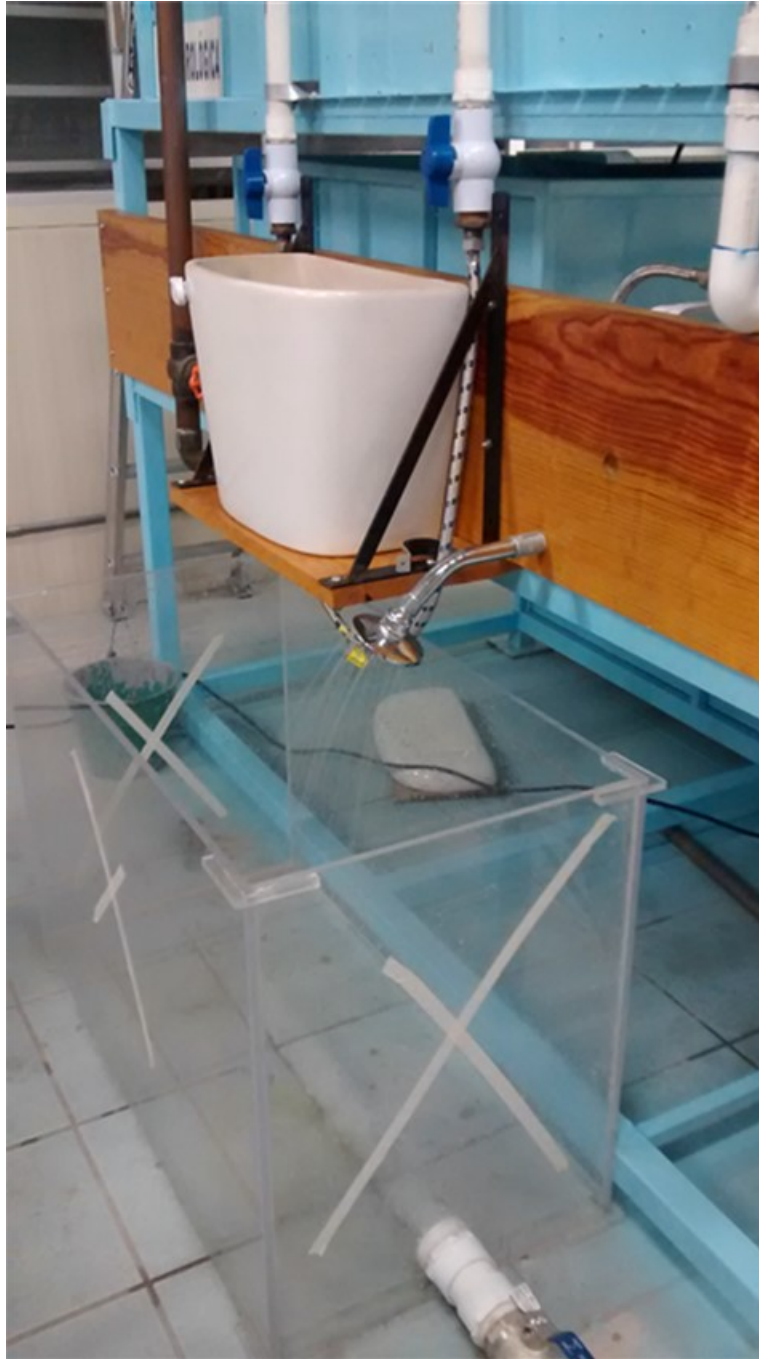


Foto 17. Acción de la regadera para la determinación de la variación de caudal.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

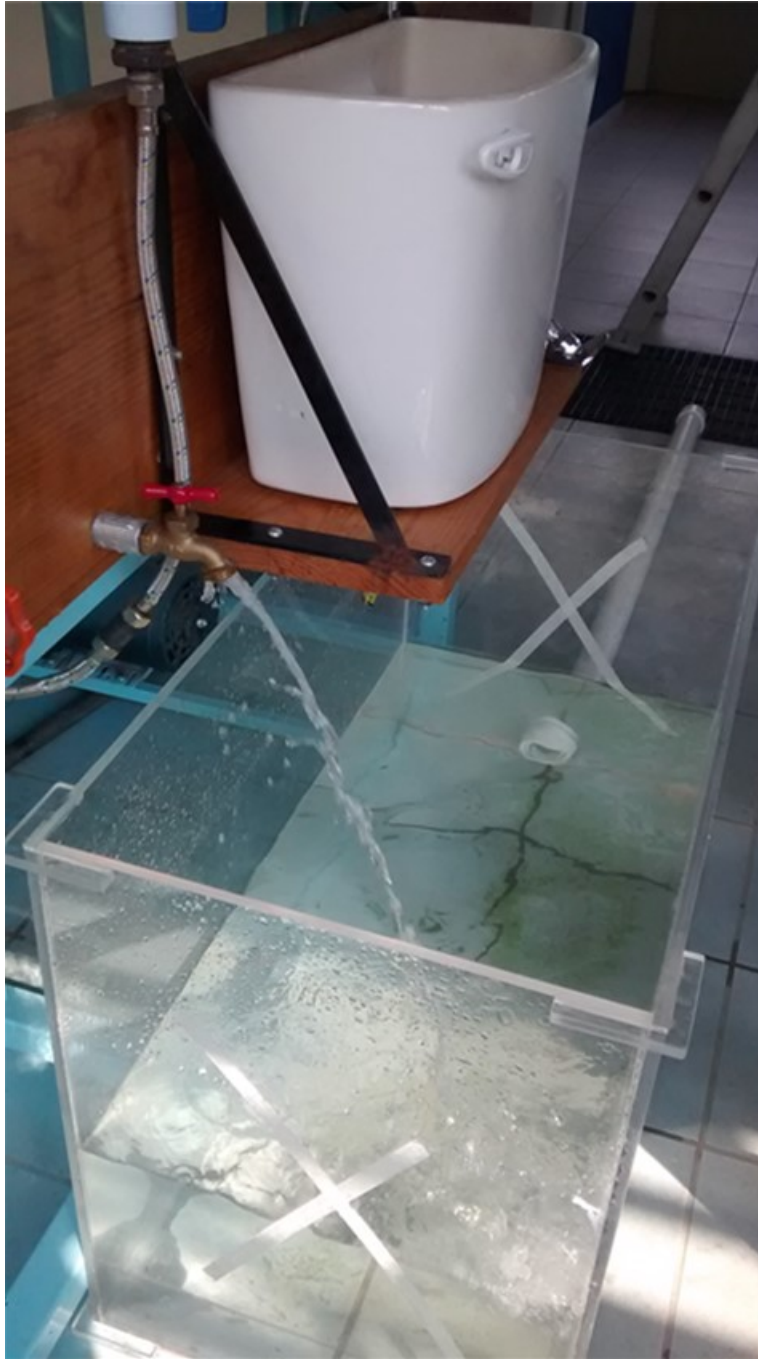


Foto 18. Acción de la llave para la determinación de la variación de caudal.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



Foto 19. Instalación del micromedidor domiciliario antes del depósito.



Foto 20. Lectura inicial del micromedidor domiciliario para la prueba 7 con tinaco lleno.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

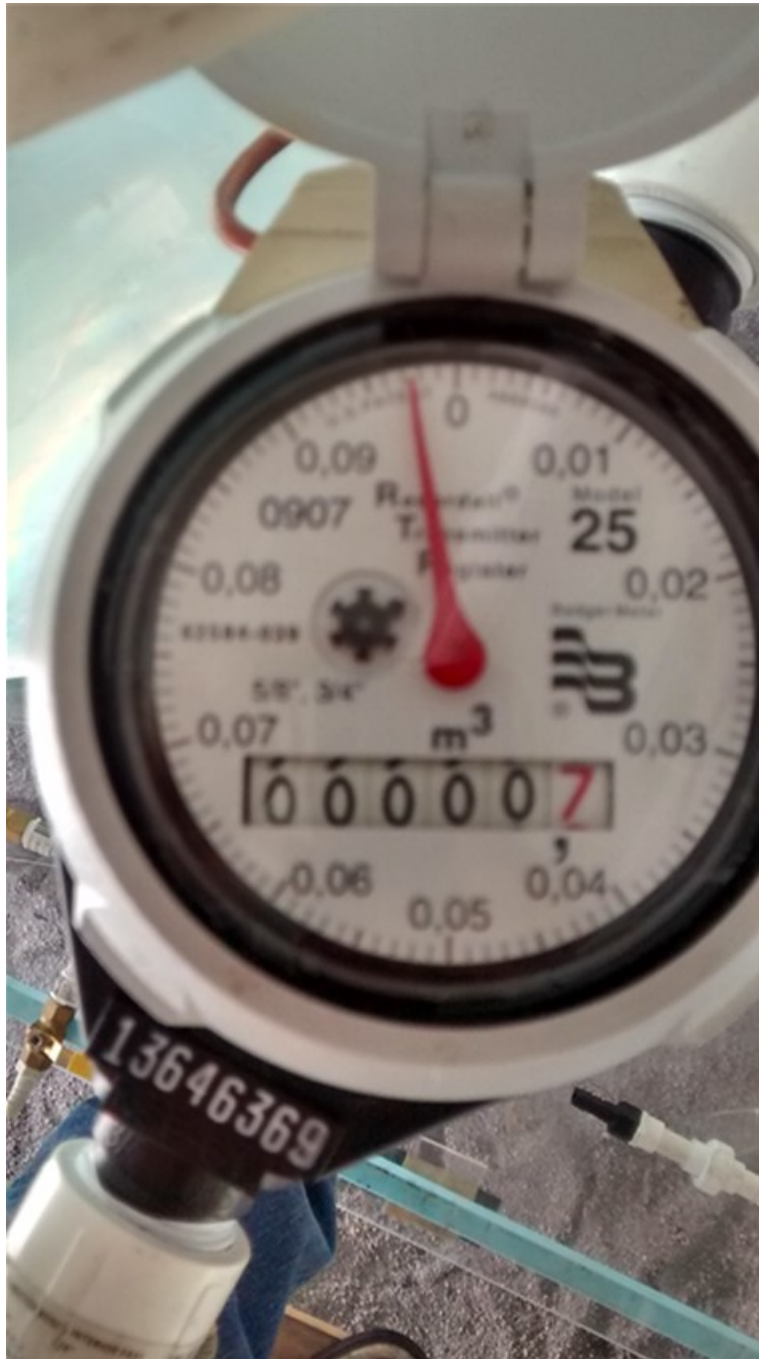


Foto 21. Lectura final del micromedidor domiciliario para la prueba 7 con tinaco lleno.

10 SECTORIZACIÓN DE REDES DE AGUA BASADA EN LA TEORÍA DE GRAFOS E ÍNDICES DE RENDIMIENTO ENERGÉTICOS

10.1 Introducción

El desarrollo de nuevas tecnologías de monitoreo y control y el reciente crecimiento exponencial de la potencia de cálculo utilizada por programas de simulación permite cambiar el enfoque de análisis tradicional, diseño y gestión de las redes de abastecimiento de agua, de las acciones pasivas a medidas activas e inteligentes.

La disponibilidad de dispositivos de monitoreo y manejo controlados por sistemas remotos a bajo costo, permite mirar al futuro con gran optimismo y acelerar el proceso de modernización indispensable para alinear los sistemas de distribución de agua con otras redes de servicio como electricidad, gas, Internet, etc. En esta perspectiva la posibilidad de manejar a distancia las válvulas de seccionamiento favorece al desarrollo de la sectorización, para la medición en los distritos y para mejor control, que puede ser una metodología para el manejo moderno de los sistemas de abastecimiento de agua, específicamente para lograr un balance del agua (Water Authorities Association y Water Research Centre, 1985), aplicar técnicas de control de presiones (Alonso et al., 2000; Nicolini y Zovatto 2009; Di Nardo y Di Natale 2011) y para la protección a los usuarios de ataques maliciosos (Poulin et al. 2008; Grayman et al. 2009; Di Nardo et al. 2012a). La sectorización de redes de distribución de agua se puede obtener mediante la definición de distritos permanentes, llamados distritos hidrométricos (DHs, en inglés District Meter Areas (DMAa)), a través de la colocación de válvulas (o cierre de tuberías existentes) y medidores de gasto para crear subsistemas con fines de una simplificación del balance del agua e identificación de las pérdidas. Las válvulas pueden ser cerradas de forma permanente o controladas por un sistema remoto.

El monitoreo del ingreso de agua a los DHs permite la identificación de la aparición de nuevas fugas al aumentar el gasto mínimo nocturno. Esta información ayuda a la empresa del agua determinar el momento adecuado para intervenir y reparar las fugas una vez que el nivel óptimo de fugas es excedido. Esta metodología fue desarrollada inicialmente y aplicada en el Reino Unido y después adoptada en otros países (Farley 2001; AWWA 2003; Morrison 2007). Un reciente estudio (Fanner et al. 2007) ha demostrado que sectorización de las redes de distribución tiene que considerar tres principales problemas: el DH tiene que cumplir los requisitos de diseño y de combate de incendios, el agua debe de medirse de una manera práctica y económica, y se debe garantizar la calidad del agua. Específicamente Sturm y Thornton (2005) y Fanner et al. (2007) identificaron el siguiente diseño general y los criterios de planificación para cumplir los requisitos mencionados para un DH: a) las válvulas rompedoras de presión cerradas y las de no retorno (válvulas check) se pueden utilizar como válvulas de contorno con el fin de proporcionar un gasto contra incendio cuando se requiere, b) Las válvulas de contorno deben de colocarse en tuberías de menor diámetro para minimizar los efectos de los extremos cerrados, c) tratar de incluir a los grandes usuarios cerca de las fronteras o extremos cerrados para evitar problemas de

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

estancamiento del agua y con esto problemas de su calidad, d) si el DH no puede proporcionar por una sola alimentación los gastos requeridos contra incendio o la presión mínima para los sistemas de rociadores contra incendio, entonces es necesario proporcionar dos alimentaciones al DH donde una de ellas está equipada con medidor y la otra con un válvula rompedora de presión que abre sólo en un evento de incendio o si la demanda es demasiado alta para una sola alimentación, e) es posible abastecer el DH a través de múltiples líneas medidas una vez al día y cuando se requieran datos para un análisis suministrar al DH temporalmente por una sola línea con medidor.

Las reconocidas como mejores prácticas actuales de gestión, respaldadas por la IWA (Lambert 2002), WHO (Farley 2001) y AWWA (2003), para el control de pérdidas reales de agua (pérdidas físicas) se pueden resumir en las cuatro acciones siguientes: a) implementar un control de presiones, b) lograr un control de las fugas, c) mejorar la rapidez y calidad de las reparaciones de las fugas, y d) aumentar la sustitución y rehabilitación de tuberías.

El control de presiones en una fuente de agua individual es complicada en redes interconectadas, ya que se ve afectado por las otras fuentes, por lo tanto, es preferible tener una sola alimentación. El control activo de fugas implica la medición del gasto mínimo nocturno (GMN) y el cálculo de indicadores. Las mediciones de GMN son esencialmente aplicables solamente a zonas aisladas que corresponden a pequeños DH con metodologías de acercamiento o pasos por etapas (Water Industry Research Ltd, 1999; Farley 2001; Di Nardo et al, 2012b). En las redes interconectadas, los indicadores de rendimiento sólo se pueden calcular de forma global (para toda la red), y no de forma individual (para cada fuente). Además, las reparaciones de fugas, y el reemplazo y la rehabilitación de tuberías pueden ser efectuadas de manera más rápida y más sencilla en zonas aisladas, ya que sólo una fuente de alimentación necesita ser cerrada durante el mantenimiento sin alteraciones de las otras partes de la red. Por otra parte, la mayoría de las ciudades, especialmente las ciudades medianas y grandes, son alimentadas por múltiples fuentes de agua. Esta operación no es el resultado de un proceso único de planificación y diseño, sino el resultado de años de urgentes respuestas a las nuevas demandas y aumento continuo y expansión de las redes de distribución de agua. Por lo tanto, las fuentes en muchas ciudades están hidráulicamente conectadas entre sí por la red de distribución de la ciudad, sin una clara delimitación de las zonas abastecidas por cada fuente. Aunque esta situación puede ser una ventaja para la redundancia hidráulica de un sistema de agua, crea un desafío para la gestión de la calidad del agua. La calidad del agua de cada fuente puede ser diferente, lo que hace que la predicción y el control de la calidad del agua en el interior de una red de distribución con las fuentes interconectadas sea más difícil. En estos casos, que son comunes en los países en desarrollo, los beneficios de muchos circuitos cerrados de tuberías son menos importantes en comparación con los beneficios obtenidos con el uso del paradigma de "divide y vencerás" en la red de suministro de agua (Tzatchkov et al. 2006a, 2006b). Además, la sectorización puede reducir el riesgo de contaminación intencionada o accidental de una red de suministro de agua (Poulin et al 2008.; Grayman et al.2009), y un

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

aislamiento total de un DH es más eficaz para la protección de la red (Di Nardo et al. 2012A).

Una buena solución es dividir la red de distribución de agua en zonas aisladas (*sectores*) de tal modo que cada zona es alimentada por su fuente de agua (o fuentes de agua); este proceso se conoce como *la sectorización*. Esto se logra mediante el cierre de válvulas de seccionamiento en las tuberías de la red que enlazan los DHs. Aunque el término "sectorización" también se utiliza como sinónimo de "división en DHs", en este trabajo este tipo de particionado del sistema de agua se define como *sectorización por fuente* (SF) para resaltar la condición de que cada distrito es completamente separado (o aislado) de los demás distritos, y por lo tanto puede ser llamado un *Distrito hidrométrico independiente o aislado* (i-DH). La sectorización de la red de agua representa un desafío más difícil que otras formas de división de la red debido a que hay un mayor número de válvulas de seccionamiento en los límites y los distritos no están conectados. Debido a que los sistemas de agua son diseñados tradicionalmente con muchas conexiones y circuitos (Mays, 2000), el cierre de válvulas de seccionamiento tiene el potencial de degradar el rendimiento hidráulico de las redes de agua, si no está correctamente diseñado. La reducción en el número de tuberías a través de las cuales el agua puede llegar puede reducir la presión, especialmente durante la demanda pico, que puede conducir a una disminución de los niveles de servicio para los usuarios y la redundancia del sistema de agua (Di Nardo y Di Natale, 2011).

En este capítulo se muestra la posibilidad de obtener una red sectorizada teniendo un buen rendimiento hidráulico. Vale la pena observar que la mayoría de los sistemas de distribución de agua han sido diseñados sin criterios de optimización, sólo con la idea general de definir circuitos con la inserción de tuberías en cada calle. Por lo tanto, a pesar que la redundancia es un buen objetivo, es posible que algunos circuitos puedan ser interrumpidos en favor de los beneficios de la sectorización. Por otra parte, dispositivos de costo relativamente bajo pueden ser encontrados actualmente en el mercado para una sectorización automática (válvulas de seccionamiento controladas a distancia) para enfrentar situaciones imprevistas (roturas, mantenimiento, protección contra incendios, etc.) en que se pueden restaurar los circuitos, como también lo proponen Sturm y Thornton (2005) y Fanner et al. (2007).

Los DHs e i-DHs tradicionalmente se han diseñado en base a las sugerencias empíricas (tales como el número máximo de las propiedades o la longitud total de las tuberías en un DH) (Water Authorities Association and Water Research Centre, 1985; WRC/WSA/WCA Engineering and Operations Committee, 1994; Water Industry Research Ltd, 1999; AWWA) combinadas con procedimientos de prueba y error, donde las tuberías a ser cerradas son elegidas y se ejecuta un modelo de simulación de la red de distribución repetidamente hasta que se encuentre una solución viable en términos de presión y gasto. Este procedimiento carece de cualquier base racional; si una solución factible es encontrada, su calidad en comparación con otras soluciones factibles es desconocida. Debido a que hay un enorme número de posibles sectorizaciones de la red, incluso en redes pequeñas (Di Nardo y Di

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

Natale, 2011), la identificación de la mejor sectorización por prueba y error resulta muy difícil.

La definición óptima de distritos en una red de distribución de agua es uno de los problemas de diseño de una red de distribución de agua que es ampliamente tratado en la literatura. Tiene dos principales clasificaciones: topología la conectividad (Goulter and Morgan, 1985; Ostfeld, 2005; Giustolisi et al., 2008a; Deuerlein, 2008) y confiabilidad y seguridad (Wagner et al., 1988a, b; Ostfeld and Salomons, 2004).

Algunas técnicas se han publicado para el diseño de DHs, como técnicas basadas en el multi-agente (Wooldridge, 2002), las técnicas de agrupamiento espectral (Ng et al., 2011), los principios de teoría de grafos (Biggs et al., 1986) y particionamiento de grafos (Chevalier y Safro, 2009). Con referencia a la primera técnica, Izquierdo et al. (2011) ha propuesto recientemente un procedimiento original basado en un enfoque multi-agente para definir DHs de una red de suministro de agua, en el que cada agente es un nodo de consumo con número de variables asociadas (elevación y la demanda son más importantes), que obtiene diferentes escenarios de sectorización. Una técnica de agrupamiento espectral fue propuesta por Herrera et al. (2010) para dividir una red de suministro de agua utilizando matrices de disimilitud (transformadas a matrices kernel ponderadas) obtenidas con la información gráfica y vectorial (tuberías, nodos de demanda y las restricciones de agua).

Al hacer referencia a la aplicación de principios de la teoría de grafos, Ostfeld y Shamir (1996) introdujeron el concepto de un *subsistema de reserva* de agua de la red para definir un subconjunto de tuberías que mantienen un nivel de servicio determinado cuando se produzca una falla. Tzatchkov et al. (2006a) sugirieron posteriormente un algoritmo derivado de la teoría de grafos para identificar los sectores independientes de suministro (o distritos) de redes basado en el enfoque de una pila de tipo *el último en entrar es el primero en salir* (con sus siglas en inglés (LIFO)). Más recientemente, Giustolisi y Savic (2010) describieron un algoritmo para identificar la asociación entre las válvulas y los segmentos aislados (o sectores), basado en el uso de matrices topológicas de una red cuya topología fue modificada para tener en cuenta la existencia del sistema de válvulas y con el uso de un algoritmo genético para minimizar el número de válvulas de aislamiento y la demanda total máxima no entregada. Una metodología de diseño heurística para crear particiones en un sistema de abastecimiento de agua en DHs fue presentada por Di Nardo y Di Natale (2011). Esta metodología, que se basa en la teoría de grafos y el uso de índices energéticos, permite el análisis de las trayectorias de mínima energía que se calculan a partir de cada depósito a cada nodo de una red de agua, y la definición óptimas de los distritos. Por último, técnicas de particionamiento de grafos tomadas de la Informática fueron propuestas por Sempewo et al. (2008) y Tzatchkov et al. (2012) como herramientas para la óptima demarcación de redes de agua en zonas basadas en un balance longitudes, demanda o gasto dentro de las zonas. Más específicamente, Di Nardo et al. (2011) presentaron una metodología para la definición automática de DHs al integrar programas de cómputo con particionamiento de grafos y simulación hidráulica, y para la optimización de la definición de los DHs mediante un enfoque energético. Todas estas obras, excepto la de Tzatchkov et al. (2006a), son

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

dirigidas al diseño de DHs, es decir, sectorización, pero no abordan explícitamente i-DHs. Este capítulo presenta un enfoque novedoso para el diseño automático de i-DHs que se basa en principios de la teoría de grafos, junto con una técnica de optimización heurística para la selección de tuberías a cerrar minimizando una función objetivo formulada con criterios energéticos. El método propuesto se aplicó a estudios de caso de redes de distribución de agua reales.

10.2 Metodología

La metodología propuesta para la sectorización de la red de agua se muestra en el diagrama de flujo en la Ilustración 232. Está compuesta por los siguientes pasos, descritos utilizando el ejemplo ilustrativo de una pequeña red hidráulica que se presenta en la Ilustración 233.

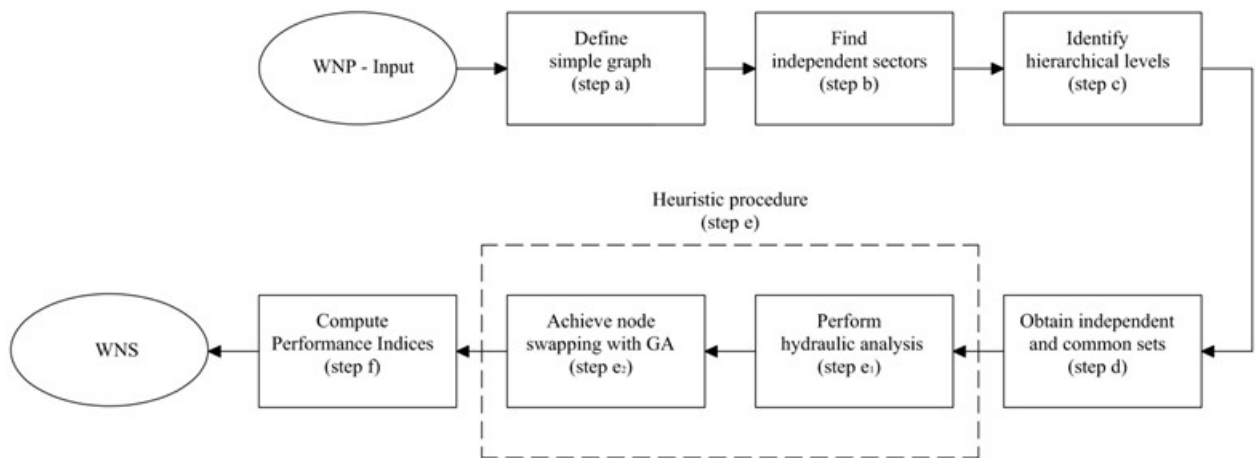


Ilustración 232. Diagrama de flujo de la metodología propuesta.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

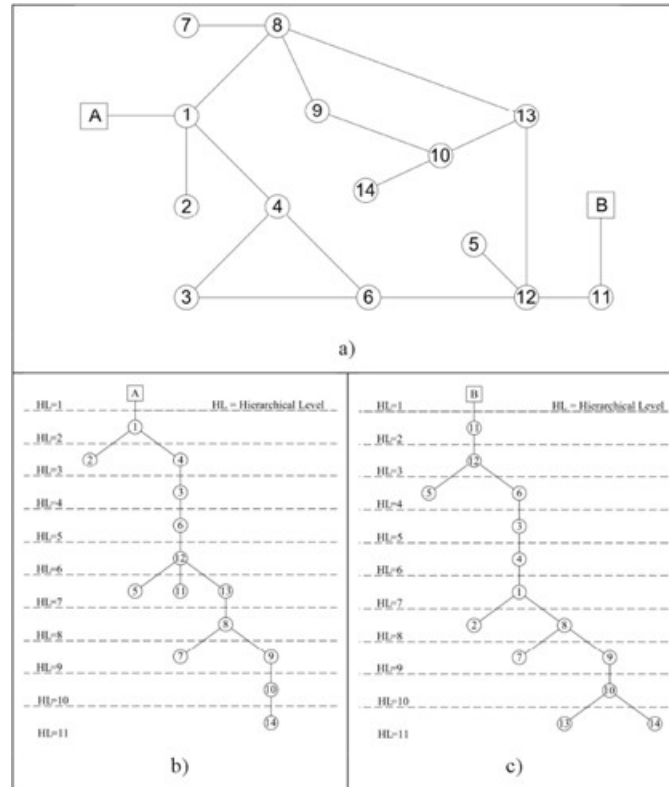


Ilustración 233. Red hidráulica propuesta.

- Definir un grafo simple (original) de una red de agua. El primer paso consiste en la definición de un grafo simple de la red de agua $G=(V,A)$, por medio de la matriz de adyacencia, donde V es el conjunto finito de vértices (o nodos) y A es el conjunto de aristas (o tuberías).
- Buscar los sectores independientes, usando un algoritmo de búsqueda primero en profundidad (BPP) (en inglés Depth First Search o DFS). Esta fase se basa en algoritmos de la teoría de grafos que generalmente son más eficientes que los algoritmos basados en álgebra lineal sobre las matrices topológicas en términos de velocidad de cálculo y memoria (Giustolisi et al. 2008a, Giustolisi y Savic 2010). El algoritmo de la teoría de grafos que se utilizó, conocido como búsqueda en profundidad, fue propuesto por Tarjan (1972) y permite la exploración de la conectividad de un grafo. El algoritmo BPP comienza en algún nodo y explora cada ruta tan alejada tanto como sea posible del nodo inicial (en “profundidad”) hasta que no hay más nodos adyacentes no visitados antes de iniciar un nuevo camino. Este algoritmo es diferente del algoritmo de búsqueda primero en amplitud (con sus siglas en inglés BFS, de breadth first search) (Pohl, 1969), que inicia en un nodo raíz y explora primero todos los nodos adyacentes (en “amplitud”) hasta que no haya más nodos adyacentes no visitados. Perelman y Ostfeld (2011), que aplicaron el algoritmo BPP a una red de suministro de agua, proponen un procedimiento para agrupación topológica de los nodos que se puede utilizar para diferentes propósitos,

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

tales como mejoras en la seguridad del agua a través de colocación de sensores en grupos o para el aislamiento eficiente de una intrusión de contaminantes. Más específicamente, Tzatchkov et al. (2006a) utilizó el algoritmo BPP para identificar los sectores independientes de una red de distribución de agua.

El algoritmo permitió la identificación de todos los posibles sectores independientes (etapa b) empezando de cada nodo fuente en la red (correspondientes a los nodos raíz). La aplicación del algoritmo BPP hace posible identificar una estructura nuevo grafo de la red, que se compone de árboles y ramas, llamado grafo del bosque de búsqueda en profundidad (Cormen et al., 1990). Con respecto a la pequeña red de la Ilustración 286-(a), la rutina BPP, empezando de los nodos A y B (las dos fuentes de la red de agua o raíces del grafo), localizó fácilmente dos árboles con ramas, como se muestra en la Ilustración 286, incisos (b) y (c).

- c) Identificar el nivel jerárquico NJ (en inglés HL con sus siglas de hierarchical level) del grafo que corresponde a cada fuente (nodos comunes pueden existir). Un enfoque jerárquico (Di Battista et al., 1999) elegido para dibujar el grafo de árbol, en el que todos los nodos de la red son representados por diferentes niveles con una clara jerarquía de conexión. En este enfoque la jerarquía se pueden identificar fácilmente, y hay una correspondencia entre la percepción visual y el análisis de conexión de red, posteriormente, los nodos “ancestros” y “descendientes” pueden ser definidos (Di Battista et al., 1999), los cuales asignan un nivel jerárquico (NJ) específico.

Un conjunto de nodos $\{t\}_s$ es un subgrafo de red que puede estar asociado con una categoría específica, llamado un grafo de árbol, en que cada dos vértices cualquiera en el grafo están conectados por un solo camino. Con respecto al ejemplo en la Ilustración 233-(a) con $s=2$, los dos grafos de árbol, $\{t\}_1$ y $\{t\}_2$, tienen 11 niveles jerárquicos (paso c), como se ilustra en la Ilustración 233-(b) y Ilustración 233-(c).

- d) Obtener los conjuntos de nodos independientes y comunes para cada NJ del grafo. En la Ilustración 233-(b), a partir del primer nivel del árbol $\{t\}_1$ (correspondiente al nodo fuente A), para cada nivel jerárquico, el algoritmo examina si existen nodos comunes para el otro árbol, $\{t\}_2$ (correspondiente al nodo fuente B). La Ilustración 234 muestra que hasta el cuarto NJ no hay ningún nodo de conjunto $\{t\}_1^4 \subset \{t\}_1$ perteneciente al conjunto $\{t\}_2^4 \subset \{t\}_2$, por lo tanto, él $\{t\}_1^4$ se fija como un subconjunto de i-DH1, y él $\{t\}_2^4$ se fija como un subconjunto de i-DH2. A partir del quinto NJ, hay nodos que pertenecen a los conjuntos $\{t\}_1^5 = \{t\}_1 - \{t\}_1^4$ y

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

$\{\tilde{t}\}_2 = \{t\}_2 - \{t\}_2^4$; por lo tanto, es necesario elegir cuál i-DH es mejor para la asignación de estos nodos. Hasta esta etapa de la metodología, la simulación hidráulica de la red es innecesaria, y el grafo se trata como un grafo no dirigido.

- e) Diseñar las válvulas de seccionamiento que limitan los i-DH utilizando un procedimiento heurístico basado en la minimización de la potencia disipada y un algoritmo genético. Este paso, basado en simulación hidráulica y en un procedimiento de optimización, puede ser dividido en dos sub-etapas como sigue:

e1) realizar el análisis hidráulico. Un procedimiento heurístico se aplicó para diseñar los i-DHs requeridos, usando el resultado del análisis hidráulico. El procedimiento heurístico define un nuevo subconjunto:

$$\{C\} = \{\tilde{t}\}_1 \cap \{\tilde{t}\}_2 \quad (18)$$

que se divide en dos subgrupos, $\{C_1\}$ y $\{C_2\}$, con $\{C_1\} \cap \{C_2\} = 0$, para obtener un subsistema suministrado por una única fuente a través de la colocación de válvulas de seccionamiento en los enlaces (tubos) entre los nodos que pertenecen a subconjuntos $\{C_1\}$ y $\{C_2\}$; en el ejemplo en la Ilustración 232, los nodos pertenecientes a i-DH₁ fueron $\{t\}_1^4 \cup \{C_1\}$, y los nodos pertenecientes a i-DH₂ fueron $\{t\}_2^4 \cup \{C_2\}$.

e2) intercambio de nodos entre los conjuntos comunes de nodos de una manera que minimice la potencia disipada. Para definir los dos subconjuntos $\{C_1\}$ y $\{C_2\}$ (paso e2), una técnica especial de intercambio de nodos (Kernighan and Lin, 1970; Fiduccia and Mattheyses, 1982) ha sido desarrollada por los autores a través de la implementación de un algoritmo genético apropiado (AG) (Goldberg, 1989). Este AG determina el mejor arreglo para los i-DHs mediante la colocación de válvulas en las tuberías a través de intercambio de nodos, es decir, el traslado de algunos nodos pertenecientes a los subconjuntos $\{C_1\}$ y $\{C_2\}$ de un subconjunto a otro, bajo el criterio de una función objetivo específica. La ecuación que define la función objetivo fue elegida siguiendo los resultados apropiados obtenidos a través de un enfoque energético, introducido por Di Nardo and Di Natale (2011), para la selección del cierre de tuberías que minimiza la potencia disipada de la red de agua. La sectorización de la red de agua cambia el arreglo del sistema mediante el aumento de pérdidas de carga y la disipación de potencia interna, disminuyendo la “disponibilidad” de diámetros (es decir, la cantidad de tuberías a través de las cuales el agua puede viajar) y la redundancia energética; este efecto es causado por las válvulas cerradas que reducen el número de tuberías de la red y eliminan algunos circuitos de la red. Por lo tanto, la sectorización obtenida con válvulas de seccionamiento y, en consecuencia, el cierre de algunas tuberías, incrementaran la potencia disipada y reducen la resiliencia del sistema; por esta razón la resiliencia de

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

la red puede ser una forma útil para comparar diferentes arreglo de diseños de sistemas por su potencia disipada.

Antes del intercambio de nodos, es necesario realizar un análisis hidráulico que asigne el gasto y la pérdida de carga a cada tubería que se utilizan para calcular la potencia disipada (Di Nardo y Di Natale, 2011). Un análisis basado en la presión (ADP) (Giustolisi et al., 2008; Giustolisi et al., 2011) fue utilizado. Para una red con una determinada distribución de la demanda en los nodos Q_i , con $i=1..n$; cargas en las fuentes H_s , $s=1..r$, longitud de la tuberías L_j y elevaciones de nodos z_i , el análisis proporciona el gasto en cada tubería q_j , con $j=1..m$, la carga H_i y la pérdida de carga ΔH_j para cada tubería (ADP es un enfoque adecuado para el análisis del diseño de la sectorización de la red de agua, porque el rendimiento hidráulico puede verse afectado, lo que resulta en una presión por debajo de la presión de diseño).

El balance de energía de una red de agua (Di Nardo and Di Natale, 2011) se puede definir como

$$P_A = P_D + P_N \quad (19)$$

donde $P_A = \gamma \sum_{s=1}^r q_s H_s$ es la potencia disponible (o la potencia total), q_s y H_s son la descarga y la carga correspondiente a cada deposito, respectivamente, y γ es el peso específico del agua. $P_D = \gamma \sum_{j=1}^m q_j \Delta H_j$ es la potencia disipada (o potencia interna), donde q_j y ΔH_j son el gasto y la pérdida de carga para cada tubería de la red, y $P_N = \gamma \sum_{i=1}^n Q_i H_i$ es la potencia de los nodos (o potencia externa), donde Q_i y H_i son la demanda de agua y la carga en cada nodo de la red, respectivamente.

De esta manera, la función objetivo OF elegida fue la suma de la potencia disipada en todas las tuberías $m_s = (m - N_{bv})$ de la red sectorizada (donde N_{bv} es el número de tuberías en las que se insertan las válvulas limitrofe) de la siguiente manera:

$$OF = \min \left(\gamma \sum_{j=1}^{m_s} q_j \Delta H_j \right) \quad (20)$$

La minimización se llevó a cabo con un algoritmo genético (AG) mediante el empleo de la caja de herramientas de MATLAB[®]. Las variables de decisión en esta minimización consistían en asignar cada nodo en el conjunto $\{C\}$ a $\{C_1\}$ o $\{C_2\}$, y las restricciones eran que i-DH1 e i-DH2 tenían que ser “subgrafos conectados”.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

Entonces, para cada fuente s cada individuo en el AG se compone de una secuencia de los cromosomas cuya longitud era igual al número de nodos que pertenecían al conjunto $\{C\}$.

Cada cromosoma i (variable de decisión) asume el valor 0 (cero) si el nodo i pertenecía a $\{C_1\}$ y por lo tanto se asigna a i-DH₁, o valor de 1 (uno) si perteneciera a $\{C_2\}$ y se asigna a i-DH₂. A continuación, el procedimiento de optimización tiene que comprobar si i-DH₁ y i-DH₂ son subgrafos conectados, es decir, si había un camino desde cualquier punto a cualquier otro punto dentro de ellos (restricción de la optimización), algo que en este trabajo fue examinado por un algoritmo BPP. Se realizaron cien generaciones con una población compuesta por 20 individuos y un porcentaje de cruce $P_{cross} = 0.8$. A continuación los restantes i-DHs (o distritos) pueden ser identificados repitiendo el procedimiento descrito en el diagrama de flujo en la Ilustración 233 (de la etapa (d) a la etapa (e)) para cada uno de las otras fuentes de $r-1$.

En general, es posible dividir la red en i-DHs solo por un enfoque heurístico, pero hay un número enorme de posibles combinaciones. El algoritmo BPP permitió la identificación del conjunto $\{C\}$, que simplificó significativamente la búsqueda de soluciones sub-óptimas. El AG (u otro procedimiento de optimización heurístico) se aplicó solo a los nodos que pertenecen al conjunto $\{C\}$, lo que reduce en gran medida el dominio de las posibles soluciones, eliminando automáticamente una gran cantidad de soluciones inadecuadas, tales como i-DHs que incluyen nodos desconectados de fuentes, que pueden haber sido incluidos cuando se utiliza un algoritmo puramente heurístico.

- f) Calcular los índices de rendimiento del nuevo (sectorizado) sistema de agua y compararlos con los IRs del sistema original. Por último, en el paso f) se calcularon índices de rendimiento para evaluar la alteración esperada del comportamiento hidráulico de la red debido a la sectorización, específicamente se utilizaron los siguientes tres índices para evaluar los diferentes diseños de sectorización:

f1) *Índice de resiliencia*. Prasad y Park (2004) propusieron el concepto de resiliencia de red, que combina los efectos de excedentes de energía y confiabilidad de los circuitos. Específicamente, el excedente de energía en el nodo i -ésimo está dado por $P_{s,i} = \gamma Q_i (H_i - H_i^*)$, donde $H_i^* = z_i + h_i^*$; y un circuito es considerado confiable si las tuberías incidentes con un nodo no varían ampliamente en diámetros. Por lo tanto, la uniformidad en el i -ésimo nodo está dada por:

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_{p,i}} d_j}{n_{p,i} \max\{d_1, \dots, d_{n_{p,i}}\}} \quad (21)$$

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

donde $n_{p,i}$ es el número de tuberías incidentes con el nodo i , y d_j es el diámetro de la tubería incidente. De esta manera se define el siguiente índice:

- Índice de resiliencia de red (Prasad y Park, 2004):

$$I_m = \frac{\gamma \sum_{i=1}^n C_i P_{s,i}}{P_{D_{\max}}} \quad (22)$$

Los valores más altos de I_m indican mejores sectorizaciones debido a los valores más altos de exceso de energía disponible, una distribución más uniforme de tubería incidentes, y por lo tanto mayor capacidad de recuperación de la red. Para comparar diferentes diseños de la red, un nuevo índice se propone en este trabajo que es el siguiente:

-Índice de la desviación de la resiliencia de red:

$$I_{md} = \left(1 - \frac{I_n^*}{I_n}\right) \cdot 100 \quad I_{md} = \left(1 - \frac{I_m^*}{I_m}\right) \cdot 100 \quad (23)$$

donde I_m^* es el índice de resiliencia de la red de la disposición de la sectorización. Este índice muestra inmediatamente el porcentaje de desviación de la resiliencia entre la sectorización y la red de agua original (RAO), donde los valores más altos de I_{md} indican una peor sectorización.

f2) Índice de presión. Los índices energéticos se refieren a toda la red de agua, pero la sectorización también afecta también los i-DHs individuales, por lo tanto, se emplearon otros índices como: presión promedio en los nodos de red h_{mean} , presión mínima y máxima en los nodos de la red h_{min} y h_{max} , y la desviación estándar h_{sd} , que son usados tradicionalmente para medir la desviación de la presión en los nodos y ayudan a resumir la información más importante sobre el nivel de servicio de un sistema de agua.

f3) Índice de déficit del gasto. Este tipo de índice se calcula con el enfoque ADP, al igual que el índice de la demanda total no suministrada (Giustolisi et al., 2008c); en el enfoque del análisis basado en la demanda (Todini y Pilati 1988) es siempre igual a 1.00, dado que:

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

$$I_{fd} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \begin{cases} Q_{a,i} > Q_i \Rightarrow \alpha_i = 1 \\ 0 \leq Q_{a,i} \leq Q_i \Rightarrow \alpha_i = \frac{Q_{a,i}}{Q_i} \end{cases} \quad (24)$$

donde $Q_{a,i}$ representa la demanda real entregada al nodo en el enfoque ADP.

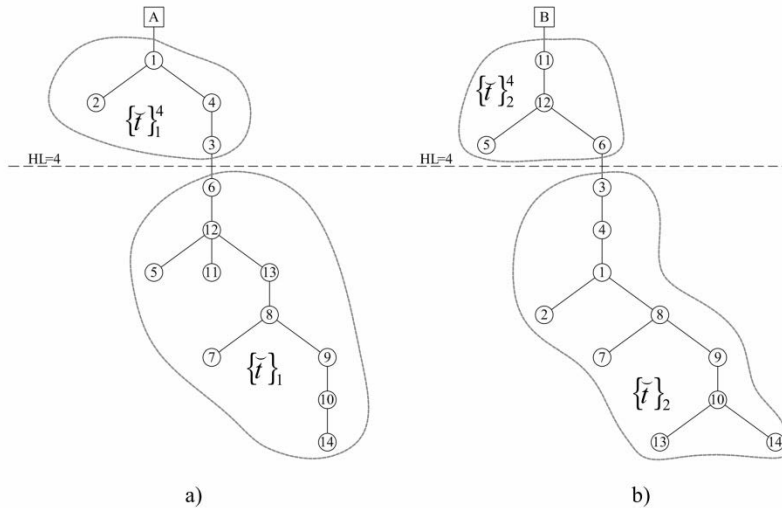


Ilustración 234. Nivel jerárquico del grafo.

10.3 Caso de estudio

La metodología se ha aplicado a dos casos de redes reales de distribución de agua: a) Parete, una pequeña red en Italia (Di Nardo y Di Natale, 2012), y b) San Luis Río Colorado, una red grande en México (Tzatchkov et al . 2006b).

Parete, con una población de 10,800, está situada en una zona densamente poblada del sur de la provincia de Caserta (Italia). El consumo de agua se caracteriza por ser exclusivamente residencial con casas de 3 a 4 pisos construidas en los años 1970 y 1980. La red es suministrada por dos fuentes.

El estudio de caso de San Luis Río Colorado es un claro ejemplo de por qué un municipio debería, en condiciones similares, sectorizar su red en i-DHs. Las fuentes de suministro en este caso son 18 pozos, que estaban completamente interconectados por la red de distribución (al comienzo del proyecto de sectorización), y no se contaba con tanques de almacenamiento de agua. Algunas de las bombas de los pozos estaban equipados con motores de velocidad variable que permiten que las bombas sigan la variación de la demanda de agua y eviten que sigan trabajando cuando la demanda sea muy baja. La extensión de las áreas abastecidas por cada pozo era desconocida, y se sospechaba que algunas bombas de los pozos fueran detenidas con frecuencia, no a causa de la baja

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

demanda, sino debido a las altas cargas hidráulicas en otros pozos. Por lo tanto, las mediciones de gasto mínimo nocturno y la gestión de la presión no tenían utilidad, y el cálculo de los indicadores de rendimiento sólo fue posible para toda la red, por lo que los indicadores no eran capaces de revelar las áreas problemáticas (con pérdida de agua grandes) de la red. La división de la red de distribución de agua en i-DHs era la única forma de realizar todas las acciones necesarias siguientes: optimización de la operación de las bombas, análisis del balance de agua para cada fuente, control de la presión y un mejor control de la calidad del agua. Las características principales de los modelos hidráulicos para las dos redes se muestran en el Cuadro 6. Las redes de agua fueron modelados por WDNNetXL (Giustolisi et al., 2008b) en ADP. Las simulaciones hidráulicas fueron realizadas específicamente para la demanda pico de agua en el verano porque los efectos de la sectorización de la red sobre el rendimiento hidráulico se consideran más importantes en esta condición de operación.

La red de Parete tenía un bajo índice de resiliencia de la red original de $I_{rn}=0.33$ calculado con una presión de diseño de $h^*=25$ m para cada nodo, que indica una “baja disponibilidad” (Greco et al., 2012) del sistema de agua al ser particionado o, en otros términos, para cambiar su diseño original con el cierre de válvulas sin una disminución significativa del rendimiento hidráulico. Esta idea puede ser expresada por la robustez es decir, la capacidad de un sistema para mantener los niveles de rendimiento indicados, en presencia de variaciones desfavorables de las condiciones de funcionamiento (por ejemplo, el cierre o la rotura de una tubería). Debido a que la resiliencia se puede utilizar como un sustituto para la medida de robustez (Greco et al., 2012), fue posible tener en cuenta que la red de Parete tiene una baja robustez y una baja disponibilidad para seccionar.

Por lo tanto, para este estudio de caso, fue un reto desarrollar una sectorización de la red que no afectara significativamente el rendimiento hidráulico con el solo uso de los enfoques tradicionales basados en sugerencias empíricas y técnicas de simulación.

Como era de esperar, el diseño de la sectorización de Parete, que se logró con la metodología propuesta, fue aislando dos i-DHs; cada uno de ellos suministrado por una fuente de captación. Los resultados correspondientes de la simulación se muestran en el Cuadro 7 y Cuadro 8, donde se ilustra el balance de energía y los índices de rendimiento para la red original, para la sectorización y para cada i-DH. Los resultados generales, mostrados en el Cuadro 7, confirman la eficacia de la metodología propuesta, con los valores adecuados para los índices de desviación de la resiliencia ($I_{rd}=7.59\%$) que indican una baja alteración del funcionamiento hidráulico de la RAO. La sectorización se logró mediante la inserción de $N_{bv}=6$ válvulas limítrofes, que permitió el aislamiento completo de cada i-DH. Este resultado es ampliamente compatible con el funcionamiento hidráulico de la red y el nivel de servicio para los usuarios, como lo confirman los índices de presión indicados en el Cuadro 8. Los valores medios, máximos y mínimos fueron muy cercanos a los valores originales correspondientes a toda la red y a cada distrito.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

El índice de déficit de flujo mostró un gasto suministrado casi igual a la demanda de diseño ($I_{fd}=0.999$ en ambas la RAO y la sectorización). Este resultado se esperaba, con base en las implicaciones del enfoque del ADP para los resultados de la presión del agua que fue ligeramente inferior a la presión de diseño (25 m) solamente en pocos nodos de la red, como se deduce de los valores de h_{min} en el Cuadro 16. Por otro lado los resultados de la simulación muestran una ligera mejora de la presión media y mínima debido al diferente arreglo de la red y a una reducción del I_{fd} .

Por último, en la Ilustración 235 se muestran los dos i-DHs de la sectorización de Parete (representados con líneas de frontera), que se obtuvieron con la metodología propuesta, donde se cierran válvulas en todas las tuberías que cruzan las líneas de frontera de los DHs.

Red de San Luis Rio Colorado. A diferencia de la red de Parete, la red original tuvo un bajo índice de resiliencia $I_m=0.47$, calculado con una presión de diseño de $h^*=15$ m basándose en las normas de diseño locales, debido a que la red tiene una fuerte variabilidad de diámetros. Los resultados de la simulación se presentan en el Cuadro 9, Cuadro 10 y Cuadro 11. La metodología propuesta aisló 10 i-DHs, cada uno de los cuales fue suministrado por uno o dos pozos de agua, como se ilustra en la Ilustración 235. El Cuadro 9 muestra una muy baja alteración de I_{md} , igual al 9.39 %, a pesar de la introducción de $N_{bv}=168$ válvulas limitótrofes.

En el Cuadro 10, los índices de presión calculados revelan que los resultados son compatibles con el nivel del servicio para los usuarios en todos los i-DHs, dado que la presión en los nodos de todos los i-DHs se acerca a sus valores originales. Los valores de presión media y máxima, que se muestran en el Cuadro 18, son adecuados para cada i-DH, lo que confirman que la metodología propuesta realiza un cambio en el diseño original del sistema de agua sin afectar significativamente su rendimiento.

Los valores de la potencia disponible suministrada por cada pozo de agua antes y después de la sectorización de la red se enumeran en el Cuadro 11, junto con los valores correspondientes para los i-DHs. Todos los distritos aislados fueron suministrados por un par de pozos, a excepción de i-DH8 y i-DH9. Las desviaciones porcentuales fueron entre +8.75% y -5.01%, lo que indica un rendimiento de calidad para todos los pozos.

Este rendimiento hidráulico fue confirmado por los valores del índice de déficit de flujo obtenido que indicaban que los gastos entregados en cada i-DH eran iguales a la demanda de diseño, $I_{fd}=1.0$, dado que los valores de presión estaban por encima de la presión de diseño (15 m) en todos los nodos de la red, tanto en la RAO como en la sectorización, como se puede observar en el Cuadro 10.

Finalmente, la sectorización obtenida por la metodología propuesta se compara con la sectorización obtenida previamente para la red de San Luis Río Colorado por el procedimiento tradicional de prueba y error (Tzatchkov et al. 2006b). Una mejor la sectorización fue obtenida en este estudio, con una mejora significativa en los índices de resiliencia ($I_m=0.43$ vs el anterior $I_m=0.32$), que fue sin duda relacionado con un menor

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

número de cierres de tuberías ($N_{bv}=168$ vs $N_{bv}=170$) y la minimización de la potencia disipada lograda mediante la metodología propuesta. La SF1 obtenida por Tzatchkov et al. (2006b) no satisface la restricción de presión mínima de $h_{min}=11.42$, y por lo tanto, en el enfoque de ADP, la demanda de agua en los nodos tampoco se cumple, con $I_{fd}= 0.997$, mientras que la SF2 satisface todos los índices con $h_{min}= 16.33$ y $I_{fd}= 1.00$.

Cuadro 6. Características hidráulicas de las dos redes.

Características de la red	Red hidráulica	
	Parete	San Luis Rio Colorado
Numero de nodos, n	182	1890
Numero de tuberías, m	282	2681
Numero de fuentes, r	2	18
Numero de bombas, p		18
Carga hidráulica de las fuentes o altura geodésica del nivel del agua en los pozos [m]	110.0	-2.00; -8.87; -6.45; -2.85; -9.38; -0.75; -4.10; -7.23; 0.05; 0.62; -3.19; -3.80; 3.55; 2.43; -7.32; -3.71; 1.85; 3.73
Longitud total de tuberías, L_{TOT} [km]	32.7	599.06
Elevacion minima del terreno, z_{MIN} [m]	53.1	0.00
Elevación mínima del terreno, z_{MAX} [m]	78.6	40.11
Material de la tuberías	hierro fundido	asbesto cemento and PVC
Diámetro de tuberías [mm]	60; 80; 100; 110; 125; 150; 200	60; 62.5; 75; 100; 150; 200; 250; 300; 350; 400; 450; 500
Demanda pico, Q [m ³ /s]	0.110	1.735
Carga de diseño, h^* [m]	25	15

Cuadro 7. Índice de potencia y energía de Parete

	Potencia (kWatt)			Índice de resiliencia		N_{bv}
	P_A	P_N	P_D	I_{rn}	I_{rnd}	
				-	%	-
RAO	120.73	104.14	16.59	0.33	-	-
iDH1	54.66	47.91	6.75	0.31	7.59	6
iDH2	66.19	55.64	10.55			

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

Cuadro 8. Índice de presión de Parete

	h_{media}	h_{min}	h_{max}	h_{sd}
RAO	31.40	21.61	50.53	5.67
RAS	31.66	23.67	49.92	4.31
iDH1	29.93	23.67	38.89	2.90
iDH2	35.08	27.88	49.92	4.61

Cuadro 9. Índice de potencia y Energía de S.L. Rio Colorado

	Potencia (kWatt)			Índice de resiliencia		N_{bv}
	P_A	P_N	P_D	I_{rn}	I_{rnd}	
					%	
RAO	1118.62	1076.77	41.85	0.47	-	-
1	99.74	98.28	1.47	0.43	9.39	168
2	128.90	125.98	2.91			
3	58.13	54.74	3.39			
4	97.10	87.25	9.85			
5	117.94	114.41	3.53			
6	150.53	142.04	8.49			
7	131.08	127.37	3.71			
8	62.09	60.32	1.76			
9	103.56	99.93	3.63			
10	170.68	158.63	12.06			

Cuadro 10. Índices estadísticos de S.L. Rio Colorado

	h_{media}	h_{min}	h_{max}	h_{sd}
RAO	28.87	20.97	62.23	4.28
RAS	29.21	16.33	69.28	6.93
1	32.96	23.97	46.23	5.68
2	33.29	29.15	69.28	2.80
3	20.89	16.33	32.73	3.30
4	23.76	18.89	37.75	5.00
5	34.55	29.35	48.01	3.62
6	34.88	28.81	43.36	3.96
7	18.74	16.51	51.54	2.54
8	20.17	19.03	21.48	0.54
9	25.72	23.98	29.00	1.14
10	34.34	31.56	40.16	1.91

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

Cuadro 11. Potencia disponible para cada pozo antes y después de RAS

Pozos de agua	iDH	P_A [KWatt]		Pozos de agua	iDH	P_A [KWatt]	
		RAO	RAS			RAO	SF
1	2	61.33	61.83	10	1	53.54	52.84
2	9	104.6	103.5	11	7	89.22	86.39
		9	6				
3	6	77.24	76.87	12	7	44.25	44.69
4	10	88.51	90.33	13	5	30.07	30.14
5	8	59.67	62.09	14	4	40.34	42.30
6	4	56.30	54.80	15	10	76.67	80.35
7	1	51.40	46.90	16	3	40.35	41.93
8	6	77.09	73.66	17	2	63.87	67.07
9	5	88.13	87.80	18	3	15.97	16.20

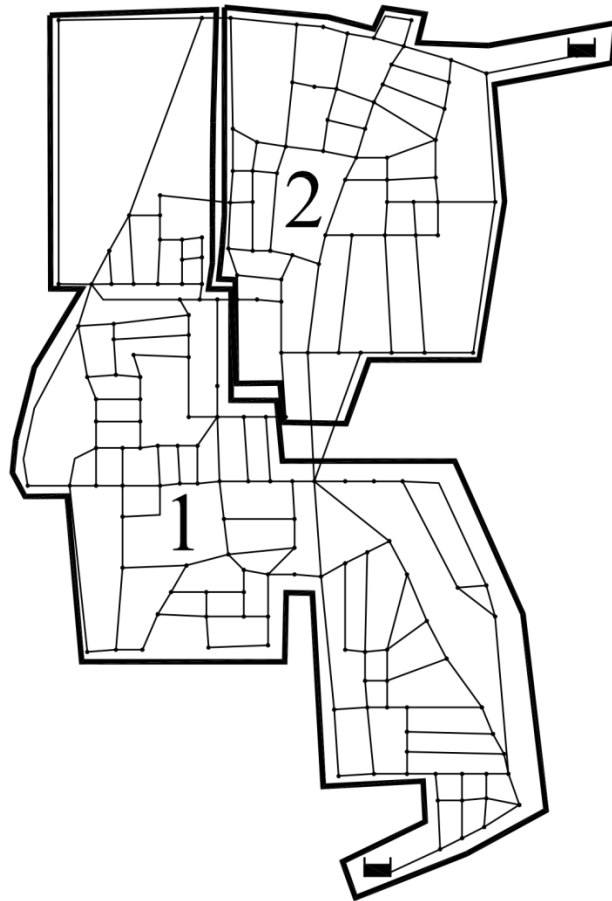


Ilustración 235. DHs obtenidos con la metodología propuesta para la red de Parete

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

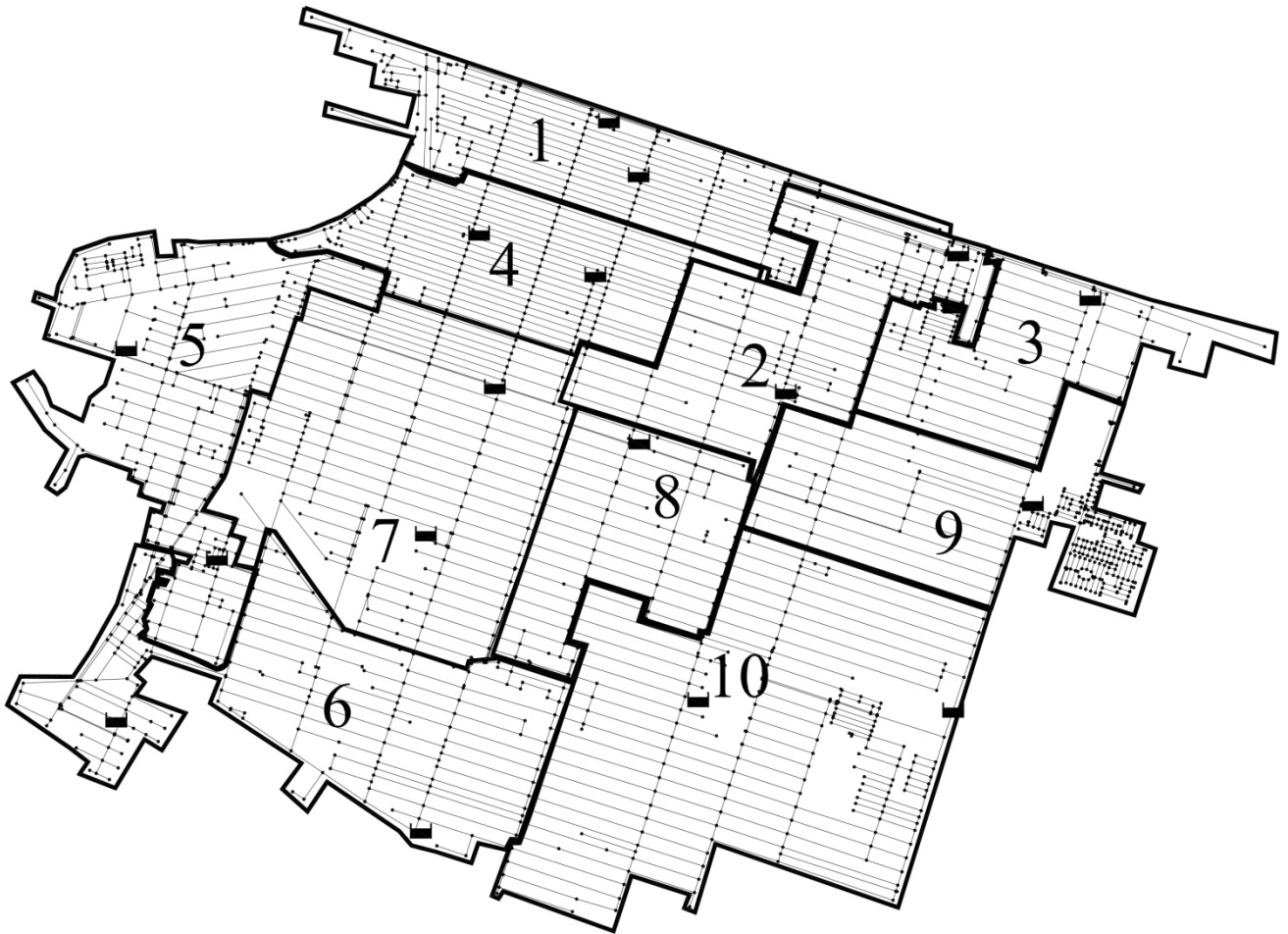


Ilustración 236. DHs obtenidos con la metodología propuesta para la red de San Luis Río Colorado

La sectorización de la red de agua, considerado en este capítulo como un sinónimo de la división de una red en distritos hidrométricos aislados (i-DHs), representa una técnica importante para la mejora de la gestión de redes con múltiples fuentes de la red de agua, sin embargo, su diseño es muy complejo en sistemas de distribución grandes. Se han propuesto algunas metodologías relevantes para el diseño de distritos hidrométricos que son compatibles con un rendimiento hidráulico, pero en ellos se centran principalmente en los DHs. En este capítulo, se propone una nueva metodología para el diseño de i-DHs y se aplica a dos casos de redes de distribución reales de agua en ciudades: Parete (Italia) y San Luis Río Colorado (México), donde está en proceso un proyecto de sectorización. Para estos casos de estudio fueron diseñados distritos aislados óptimos suministrados exclusivamente por una o dos fuentes de abastecimiento agua y desconectados de otros sectores a través de válvulas de seccionamiento o mediante el seccionamiento de tuberías existentes. La metodología propuesta se basa en principios de la teoría de grafos utilizando una técnica de búsqueda en profundidad para buscar las ramas independientes de la red, y consideraciones energéticas para minimizar la potencia disipada con el empleo de un

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

algoritmo genético desarrollado especialmente para el intercambio de nodos. Usando índices de rendimiento, se hizo una comparación de los resultados de la simulación con el diseño de la sectorización obtenido mediante prueba y error que confirmó la eficacia de la metodología que era compatible con el nivel de servicio para los usuarios con una alteración insignificante de rendimiento hidráulico con respecto a la resiliencia de la red y la demanda de agua suministrada. Los resultados de la simulación mostraron que es posible encontrar diseños de sectorización compatibles con la resiliencia de la red y su robustez; que también tienen casi el mismo nivel de protección contra incendios como la red original, demostrado por la ligera alteración de la presión mínima en cada sector. El uso de válvulas de seccionamiento contraladas por un sistema remoto puede garantizar una rápida recuperación de la redundancia original, abriendo las tuberías cerradas para hacer frente a situaciones específicas (roturas, mantenimiento, etc.). Cabe también destacar que la metodología propuesta para definir i-DHs en una red de agua se puede utilizar evidentemente también para dividir la red (o para identificar DHs) dejando abiertas algunas tuberías entre distritos. La sectorización en i-DHs representa claramente el reto más difícil y un límite superior para los diseñadores de la división de las redes de agua. Si una sectorización es buena, la correspondiente división de la red en DHs ciertamente será mejor.

Finalmente, la metodología puede ser aplicada a sistemas de agua grandes y ofrece a los organismos operadores una herramienta para el diseño de servicios de agua basada en índices de rendimiento, que supera los enfoques empíricos de prueba y error tradicionalmente usados para la sectorización de las redes.



Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

11 EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE DESINFECCIÓN DEL AGUA EN DEPOSITOS INTRADOMICILIARIOS

11.1 Introducción

El sistema de purificación ION AG+ es una tecnología basada en los efectos de la plata coloidal, recientemente comercializada en México (<http://www.ionag.com.mx/>). Según el fabricante, ofrece una solución económica, práctica y de bajo mantenimiento principalmente a proyectos sociales en comunidades rurales, escuelas, unidades habitacionales y en general en donde se desee purificar bacteriológicamente el agua. El funcionamiento es simple, solo se coloca la columna de purificación flotando en el tanque de almacenamiento de agua (cisterna, tinaco etc.) en donde los iones de plata contenidos en el cuerpo de las esferas cerámicas aprovechan el movimiento cinético del agua desinfectando por medio de una reacción electrostática (Ilustración 236).

La utilización del ion plata es debido a que se sabe que es capaz de romper el ciclo de contaminación microbiológica, previniendo la reproducción y la generación de Bio film. La efectividad germicida de la plata coloidal se ha comprobado incluso en microorganismos resistentes a antibióticos.

- Los Iones de plata rompen la pared celular, interrumpen la respiración del microorganismo, afectando el DNA y evitando su reproducción.
- El cuerpo de las esferas de cerámica integra iones de plata en su estructura y los libera sistemáticamente al paso de los microorganismos.
- Por medio de una reacción de óxido-reducción se crea un campo electromagnético que genera un ambiente hostil para virus, parásitos y bacterias.
- Las columnas de desinfección están diseñadas para que las esferas de ion plata tengan mayor contacto con el agua, aumentando su eficiencia y reduciendo el tiempo de desinfección.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



Ilustración 236. Dispositivo purificador de agua en un depósito.



Ilustración 237. Aspecto de la columna de desinfección Ion AG+.

11.2 Antecedentes

En Mayo del 2013 se realizaron análisis de las esferas por parte de Laboratorios de México de C.V. ONSITE. El reporte muestra que una esfera pesa 18.979 gramos con un diámetro de 23.2 mm. En el Cuadro 12 se muestra la composición química de cada esfera.

Cuadro 12. Composición química de una esfera

Elemento	Concentración, mg/Kg.
Plata (Ag)	958,000
Fierro (Fe)	28,000
Calcio (Ca)	33,000
Cromo (Cr)	6,150
Cobre (Cu)	1,390
Cloro (Cl)	244,000

Igualmente en este reporte muestra que una esfera pierde alrededor del 95% de su peso en dos años y siete meses (942 días), por lo que la efectividad de la esfera, según el reporte, es hasta este tiempo de uso continuo. En el Cuadro 13 se muestra el peso perdido a través del tiempo de una esfera.

Cuadro 13. Pérdida de peso en el tiempo

Pérdida de peso, gramos	Tiempo, días
0.018	1
6.68	365
13.35	730
18.11	942

En Julio del 2013 se evaluó la efectividad en relación con la NOM-244-SSA1-2008 del sistema de desinfección denominado Ion-Ag+ por parte del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). La metodología realizada por el IMTA para evaluar la efectividad del dispositivo, conforme con esta norma, fue la siguiente:

- Preparar cultivo de referencia empleando capa de Escherichia coli ATCC 11229.
- Preparar subcultivo Escherichia coli ATCC 11229 para inoculación de agua de prueba.
- Preparar 100 litros de agua de prueba con agua del sistema de distribución doméstica más la inoculación de Escherichia coli ATCC 11229.
- Colectar por triplicado muestras de agua de prueba antes de someterse al proceso de desinfección (APST) y 12 horas después de someterse al proceso de desinfección (APT) empleando el sistema de desinfección Ión-Ag+.
- Calcular los valores presentes de Coliformes totales y Mesófilos aeróbicos.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

- Analizar los porcentajes de desinfección de Coliformes totales y Mesófilos aeróbicos para determinar la efectividad del sistema de desinfección Ión-Ag+ y verificar que los porcentajes obtenidos cumplan con el porcentaje de reducción bacteriana que exige la norma.

Según los resultados obtenidos, el IMTA reportó lo siguiente:

- El parámetro de Coliformes totales que considera la norma presentó un promedio de 99.99% de reducción bacteriana empleando el sistema Ion-Ag+, lo cual representa una prueba de potabilidad aceptable.
- El parámetro de Mesófilos aeróbicos que considera la norma, presentó un promedio equivalente al 98.05% de reducción bacteriana empleando el sistema Ión-Ag+, lo cual representa una prueba de potabilidad aceptable.

Por consiguiente el IMTA concluyó en aquel entonces que se recomienda definir claramente, y con los respectivos respaldos, la vida útil sin necesidad de recambio del sistema Ión-Ag+, y realizar de forma periódica análisis de Coliformes totales y Mesófilos aeróbicos para asegurar en todo momento la calidad bacteriológica del agua obtenida con el sistema Ión-Ag+.

La NORMA Oficial Mexicana NOM-244-SSA1-2008, que maneja una amplia gama de equipos (tales como filtros domiciliarios pequeños), y pruebas que se realizan con volumen de agua de 100 L y tiempos de desinfección cortos, resulta no obstante poco específica para la evaluación del dispositivo Ion AG+ que es destinado para tinacos o cisternas cuyo volumen es mucho mayor (de 250 a 5,000 L, de acuerdo con la ficha técnica del fabricante) y supuesta vida útil de dos años. Tampoco considera la naturaleza predominantemente intermitente del suministro de agua en los lugares donde se utilizan tinacos o cisternas, es decir, que éstos se llenan y vacían periódicamente. Por esta razón, de común acuerdo con Conagua, en el proyecto se ha realizado la primera fase de una investigación sobre los efectos de Ion AG+ en las condiciones reales de operación de los tinacos y cisternas en los sistemas de agua potable en México.

Dado que el efecto de la desinfección se realiza por medio del ion plata, en primer lugar se investiga la cantidad de plata liberada en el tiempo determinado para la desinfección del agua. En segundo lugar, se busca establecer una relación de la concentración de plata con la conductividad o con el Potencial de Óxido Reducción (ORP), que son parámetros mucho más fáciles de monitorear en un tinaco de tamaño real, como el tinaco de acrílico construido en laboratorio.

Los resultados de este estudio pueden, en principio, indicar una propuesta de modificación o ampliación de la norma NOM-244-SSA1-2008, para tomar en cuenta dispositivos Ion AG+ y similares, pero tal propuesta está fuera del alcance de este proyecto de investigación.

11.3 Objetivo

Evaluar la cantidad de Plata liberada en el tiempo determinado para la desinfección del agua y establecer su relación con el Potencial de Óxido Reducción (ORP).

11.4 Resultados Esperados

Establecer la correlación existente en el tiempo Ag vs ORP.

11.5 Metodología

- a) Revisar el mecanismo de actuación del ion plata sobre los microorganismos.
- b) Establecer conforme a ficha técnica la forma en que funciona el sistema de purificación ION AG+.
- c) Definir la concentración de ion plata que desprende la esfera en un día.
- d) Realizar la medición de los parámetros de Conductividad eléctrica, Potencial de óxido reducción y pH, en un tanque conteniendo 110 litros de agua.
- e) Colectar muestras de agua para la medición de Ag, en un periodo de tiempo de 24 horas.
- f) Establecer la correlación que existe en el tiempo para los diferentes parámetros medidos.

11.6 Resultados

11.6.1 *Mecanismo de actuación del ion plata sobre los microorganismos.*

Los trabajos acerca de la desinfección por medio de plata han basado sus hipótesis, acerca de los posibles mecanismos de acción bactericida, en cambios morfológicos y estructurales que se observan en la bacteria después de ser tratada con compuestos de plata. Por microscopía electrónica de transmisión, se ha observado que la plata en las bacterias causa daños a la membrana celular y algunos elementos del citoplasma. La característica de los iones Ag⁺ de producir un efecto bactericida se debe a su gran reactividad frente a sustancias como proteínas, enzimas, compuestos de azufre, ADN, ARN, etc., debido a las interacciones que se producen frente a grupos funcionales de tipo tiol, carboxilato, fosfato, hidróxilo, imidazol, indol o amina, las que se encuentran contenidas en la membrana. Como se sabe la membrana es la responsable de la respiración y del control de intercambio de materiales con el medio ambiente, esto conlleva a que la membrana pierda permeabilidad,

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

situación que ocasiona que la bacteria no sea capaz de efectuar procesos de respiración y eventualmente muere (Ilustración. 238).

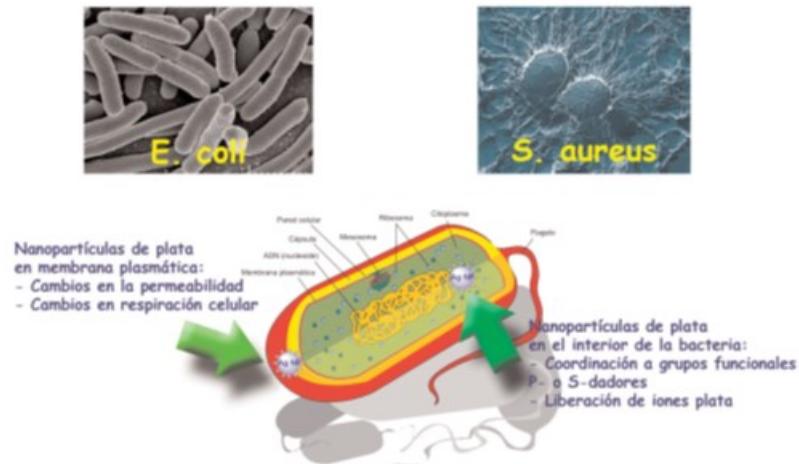


Ilustración 238. Micrografía de microscopía electrónica de barrido de los microorganismos E. coli y S. aureus. Esquema de actuación de las nanopartículas de plata sobre una bacteria.

Algunos otros trabajos de investigación que se han enfocado en el estudio de la respiración de bacterias al ser expuestas a compuestos de plata confirman que la plata al interactuar con la membrana interrumpe la cadena respiratoria, y colapsa la fuerza motriz de electrones a través de ésta, lo cual acaba con la producción de ATP y sus fuentes de energía.

Con base en lo anterior, se han desarrollado productos que utilizan plata como agente microbicida. Los avances en la ingeniería en relación a técnicas y síntesis desarrolladas han permitido introducir compuestos de plata a textiles, plásticos, catéteres, implantes sintéticos y muchos otros productos, con el objeto de darles características bactericidas.

11.6.2 *Funcionamiento el sistema de purificación ION AG*

El sistema de purificación ION AG+ se conforma por una caja (columna) que contiene un material que permite al sistema flotar cuando se encuentra en los contenedores del agua, a la cual se le ensamblan unas estructuras diseñadas para contener esferas con ion plata (Ag+) y permitir que tengan un mayor contacto con el agua (Ver Ilustración 239).

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



Ilustración 239. Dispositivo de desinfección Ión-Ag+.

La acción bactericida se lleva a cabo por medio de una reacción de óxido reducción, la que crea un campo electromagnético que genera que los iones plata al interactuar con la membrana de la bacteria interrumpa la cadena respiratoria.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

Las columnas se introducen en el tanque del agua y, según el fabricante, dependiendo del volumen a tratar será el tiempo inicial requerido para asegurar que el agua está libre de bacterias (Cuadro 14).

Cuadro 14. Tiempos de desinfección en función de la capacidad del tanque.

CAPACIDAD DEL TANQUE (L)	TIEMPO INICIAL DE DESINFECCIÓN (Horas)	TIEMPO DE DESINFECCIÓN EN USO (Minutos)
250	6	30
450	6	30
1,100	8	30
2,500	12	60
5,000	12	60

11.6.3 Definir la concentración de ion plata que desprende la esfera en un día.

Conforme a análisis realizado por ONSITE, Laboratories de México S. A. de C. V. por análisis de metales por Fluorescencia de rayos X se determinó la concentración de los elementos que conforman la esfera que se utiliza en el Sistema de purificación ION Ag+. En el Cuadro 23 se indican las concentraciones, así también, el tiempo de vida de la esfera hasta que su peso es $\leq 5\%$ del peso inicial (Cuadro 15).

Cuadro 15. Elementos que conforman la esfera con peso de 18.979g

ELEMENTO	CONCENTRACIÓN (mg/Kg)	PORCENTAJE (%)	MASA DEL ELEMENTO POR ESFERA (g)
Plata	958 000	75.401	14.310
Fierro	28 000	2.204	0.418
Calcio	33 000	2.597	0.493
Cromo	6 150	0.484	0.092
Cobre	1 390	0.109	0.021
Cloro	244 000	19.204	3.645

Con base en los valores del Cuadro 23, se calcula la concentración de Ag que se tiene en un día considerando un tanque de 110 L y cuatro esferas:

$$[\text{Ag}] \text{ día} = ((\text{Peso en esfera}) ([\text{Ag}])) (\% \text{ de pérdida})$$

$$[\text{Ag}] \text{ día} = [(14.31)(958)(0.00018)(4)]/110$$

$$[\text{Ag}] \text{ día} = 0.090 \text{ mg/L} = 9 \mu\text{L}$$

11.6.4 *Medición de parámetros de Conductividad eléctrica, Potencial de óxido reducción y pH*

Con el objeto de evaluar la liberación de Ag por efecto del contacto de las esferas con el agua, se procedió a realizar lo siguiente:

- a) Se lavó un recipiente de aproximadamente 120 litros.
- b) El recipiente se llenó con agua de abastecimiento proveniente de la llave hasta un volumen de 110 litros.
- c) Se midieron los parámetros pH, Conductividad electrolítica y Potencial de óxido reducción al agua (ORP por sus siglas en inglés) con un equipo multiparamétrico YSI (ver Ilustración 240) y se colectó muestra para determinar Ag por espectrofotometría de Absorción Atómica (ver Ilustraciones 241, 242 y 243)
- d) En el recipiente con agua se colocó un sistema de purificación Ion AG+ con cuatro esferas (ver Ilustración 244)
- e) Se realizaron mediciones de los parámetros anotados cada hora hasta completar ocho horas, posteriormente a las 12 y 24 horas (ver Ilustraciones 245 y 246).

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



Ilustración 240. Equipo multiparamétrico YSI para la medición de parámetros de pH, conductividad y ORP.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



Ilustración 241. Toma de muestra para análisis de Ag por espectrofotometría de Absorción Atómica.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



Ilustración 242. Toma de muestra para análisis de Ag por espectrofotometría de Absorción Atómica (continuación)

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



Ilustración 243. Toma de muestra para análisis de Ag por espectrofotometría de Absorción Atómica (continuación)

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



Ilustración 244. Dispositivo de Ión-Ag+, dentro del tanque de prueba.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



Ilustración 245. Medición de pH, Conductividad y ORP dentro del depósito.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica



Ilustración 246. Obtención de las medidas de pH, Conductividad y ORP en el equipo multiparamétrico.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

Se realizaron dos pruebas, los resultados obtenidos en cada una de ellas se muestran a continuación, en los Cuadros 15 y 16.

Cuadro 15. Resultados de las mediciones en la Prueba 1.

No	Hora	T (°C)			pH			Conductividad (mS/cm)			ORP		
		Sup.	Media	Fondo	Sup.	Media	Fondo	Sup.	Media	Fondo	Sup.	Media	Fondo
1	0	21.9			7.43			239			189		
2	1	22.1	22.1	22.0	7.14	7.11	7.14	241	239	240	196	201	201
3	2	22.2	22.1	22.0	7.26	7.25	7.11	241	241	240	162	166	175
4	3	22.3	22.2	22.1	7.29	7.15	7.07	242	241	241	155	167	173
5	4	22.4	22.3	22.3	7.07	7.12	7.13	243	243	242	150	149	149
6	5	22.5	22.4	22.3	7.39	7.26	7.20	243	244	242	134	140	144
7	6	22.4	22.4	22.3	7.37	7.35	7.32	243	243	243	129	130	131
8	7	22.3	22.3	22.2	7.44	7.45	7.41	242	242	242	128	126	128
9	9	22.1	22.1	22.0	7.51	7.42	7.45	242	242	242	118	120	120
10	12	22.1	22.1	22.1	7.35	7.31	7.36	242	241	242	117	117	115
11	24	22.2	22.2	22.2	7.51	7.46	7.41	245	245	245	96	97	99

Cuadro 16. Resultados de las mediciones en la Prueba 2.

No	Hora	T (°C)			pH			Conductividad (mS/cm)			ORP		
		Sup.	Media	Fondo	Sup.	Media	Fondo	Sup.	Media	Fondo	Sup.	Media	Fondo
1	0	22.0	22.0	22.0	7.09	7.14	7.16	240	235	235	203.2	199.0	196.1
2	1	22.1	22.0	22.0	7.21	7.12	7.02	236	235	235	143.1	146.1	151.4
3	2	22.2	22.1	22.0	7.24	7.21	7.20	236	236	235	133.4	133.8	133.8
4	3	22.2	22.2	22.1	7.33	7.19	7.15	237	236	236	122.5	126.2	127.9
5	4	22.3	22.3	22.2	7.24	7.15	7.06	237	237	237	126.5	128.2	132.5
6	5	22.2	22.2	22.2	7.08	7.08	7.04	236	237	237	112.9	126.9	128.2
7	6	21.2	21.2	21.1	7.27	7.23	7.24	236	236	236	124.0	126.8	130.0
8	7	22.1	22.1	22.1	7.30	7.24	7.27	236	236	236	114.6	116.9	116.3
9	8	22.0	22.0	22.0	7.28	7.27	7.27	236	236	235	106.8	108.5	108.2
10	9	21.8	21.9	21.9	7.26	7.23	7.26	235	235	235	106.6	107.7	108.6
11	12	-	-	-	7.30	7.28	7.26	235	235	235	107.7	110.2	111.2
12	24	-	-	-	7.36	7.34	7.34	236	237	236	103.5	104.6	105.1

11.6.5 *Colecta de muestras de agua para la medición de Ag, en un periodo de tiempo de 24 horas*

Conforme a lo indicado en el numeral 11.5 inciso “e”, al tiempo que se realizaban las mediciones de campo también se colectaba muestra para realizar la medición de Ag. Los resultados para Ag, son los que se indican en el Cuadro 17. Se realizó un primer análisis por Espectrofotometría de Absorción Atómica por Flama, considerando la concentración teórica calculada en el Numeral 11.6.3. Los resultados obtenidos fueron menores al límite de cuantificación del método, por lo que se determinó que se repitiera el análisis pero ahora realizándolo por Horno de Grafito, ya que así es como se puede alcanzar un límite de cuantificación $\leq 5\mu\text{g/L}$ ó $\leq 0.005\text{mg/L}$.

Cuadro 17. Concentración de AG.

No	Hora	Plata ($\mu\text{g/L}$)
1	0	< 5
2	1	< 5
3	2	< 5
4	3	< 5
5	4	< 5
6	5	< 5
7	6	< 5
8	7	< 5
9	9	< 5
10	12	< 5
11	24	< 5

11.6.6 *Correlación que existe en el tiempo para el parámetro de ORP*

Con los datos obtenidos se obtuvo la gráfica de tendencia para ORP, ajustándose a una ecuación logarítmica. En las ilustraciones 247 y 248 se presentan las gráficas de los datos.

Una vez analizados los diferentes parámetros medidos para poder correlacionar con el cambio de concentración de Ag en el agua se observa que el parámetro POTENCIAL DE ÓXIDO REDUCCIÓN es el que mejor nos puede indicar la variación de la concentración de la plata en el tiempo.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

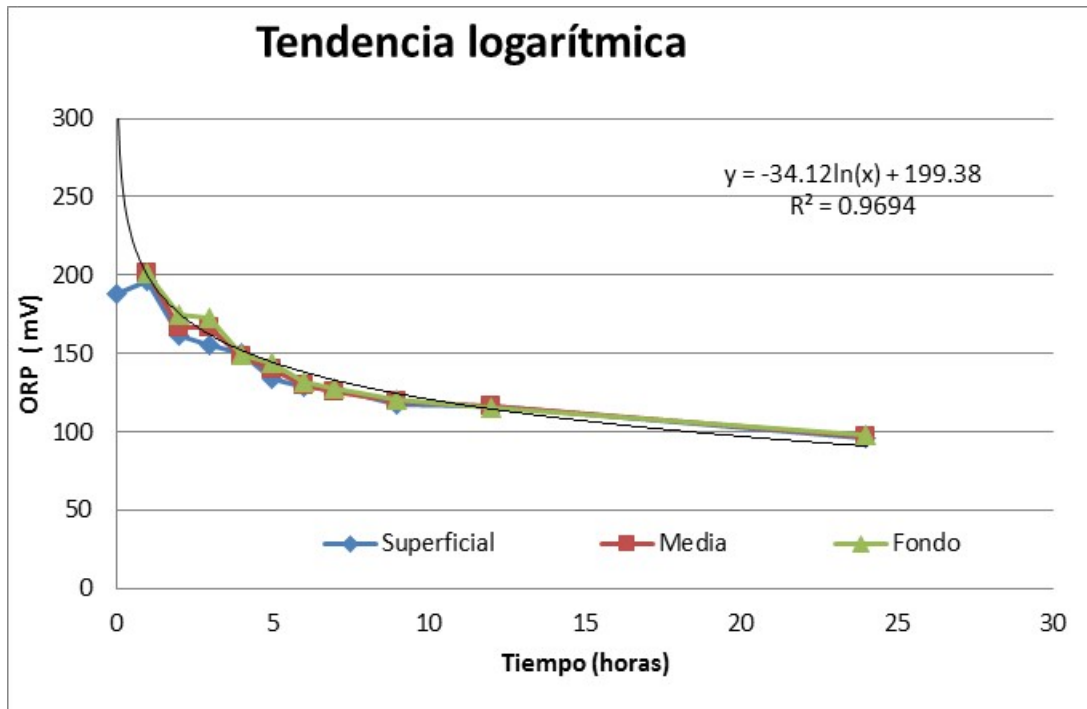


Ilustración 247. Comportamiento de ORP en el tiempo, prueba 1.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

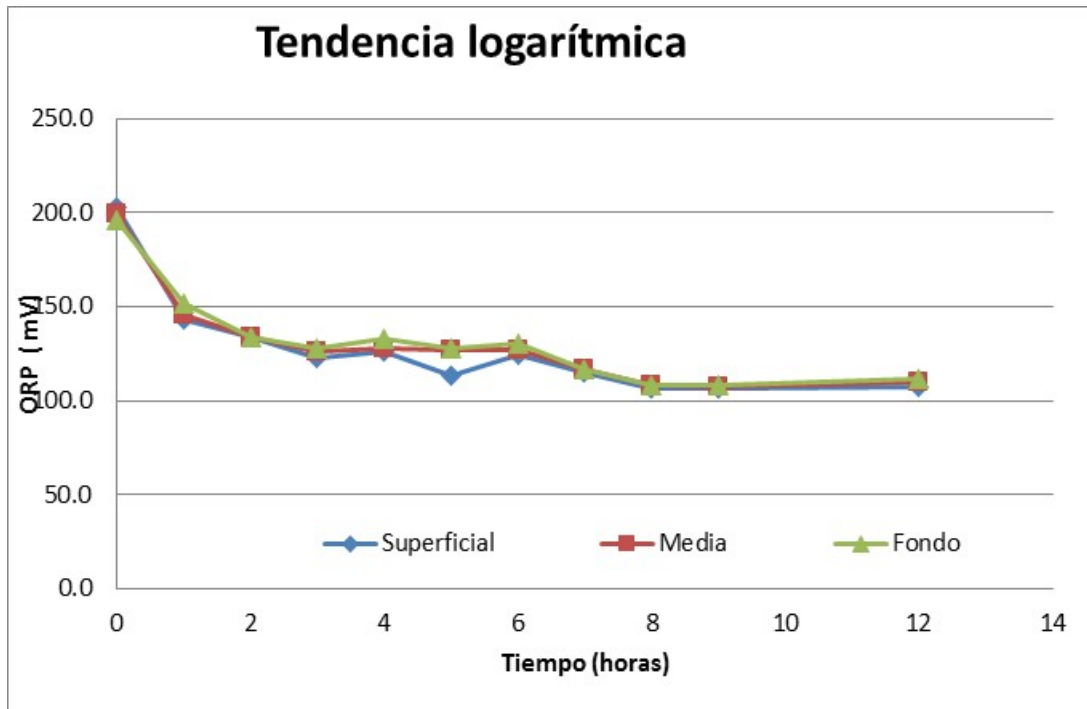


Ilustración 248. Comportamiento de ORP en el tiempo, prueba 2.

El parámetro de POTENCIAL DE ÓXIDO REDUCCIÓN, permitirá determinar en el tiempo la concentración de Ag en el agua que contenga un elemento de purificación Ion Ag^+ , siempre y cuando se realice la medición por un método que permita cuantificar la plata en el orden de concentraciones de $\mu g/L$.

12 CONCLUSIONES

Muchos organismos operadores de agua potable y alcantarillado en México, quizás la mayoría, manejan sistemas de información geográfica (SIGs). El software de SIG más difundido entre ellos es ArcGis, y el uso que le dan es básicamente visualizar mapas de la infraestructura de agua potable o alcantarillado. El catastro de sus redes e instalaciones de agua potable no obstante lo tienen en AutoCAD, y no tienen modelo de sus sistemas de agua potable integrado con su SIG o planos de AutoCAD. Los análisis hidráulicos, tales como la determinación de las capacidades del sistema, desarrollo de escenarios, y la planificación de las eficiencias, se han efectuado independientemente de un SIG. Los modelos hidráulicos, en las ciudades donde se han hecho, se actualizaban cada varios años, dependiendo de la necesidad temporal (por ejemplo en un plan maestro o en diagnóstico integral (DIP) que realiza el organismo operador). Un SIG sin embargo es mucho más que solo una aplicación de mapas dado que ofrece un extenso conjunto de herramientas para el análisis espacial y manejo de datos que, cuando se integran con un modelo hidráulico pueden proporcionar enormes ventajas. Dando a los planificadores y técnicos la posibilidad de acceder a información más segura, actualizada y reciente, la integración de un SIG con un modelo hidráulico permite obtener el máximo rendimiento de la inversión en el SIG. La integración proporciona información reciente, reducción del tiempo a mostrar los resultados, y acceso a elementos de modelación y a las herramientas y funcionalidad del SIG.

El SIG debe ser un componente importante de cualquier modelación hidráulica. El uso actual y correcto del SIG permite a planificadores y operadores obtener información más confiable en la evaluación de deficiencias existentes, servicio a los desarrollos potenciales, calidad del agua y operación. La integración del SIG y el modelo hidráulico es el proceso mediante el cual elementos nuevos, actualizados o eliminados son sincronizados entre la base de datos del SIG y el modelo hidráulico. Con un enfoque de integración, las actualizaciones de los modelos hidráulicos pueden ocurrir con más frecuencia, porque lo laborioso de la transferencia de datos, limpieza y construcción de modelos puede ser eliminado o al menos en gran medida reducido. Un enfoque integrado elimina la necesidad de actualizar manualmente los conjuntos de datos separados del modelo hidráulico y la base de datos del SIG. Esto, sucesivamente, libera a los que realizan modelos hidráulicos de la investigación de datos y la captura de datos asociados con cada uno de los cambios de la red física. Utilizando un modelo hidráulico sobre la base actualizada de un SIG, producirá información más segura. Por último, los resultados del modelo pueden ser más fácilmente devueltos al SIG para su análisis más preciso y detallado.

La experiencia de trabajar con dos organismos operadores de agua potable y alcantarillado (la Comisión Municipal de Agua y Saneamiento (CMAS) de Xalapa, Ver. y la Comisión de Servicios Públicos de Tijuana (CESPT), B.C.) en este proyecto ha mostrado que sus catastros no están en una forma adecuada para la implementación de un modelo matemático preciso, y en ocasiones no están actualizados, por lo que necesitan adecuación para ser usados con modelo matemático. Como un ejemplo, los catastros generalmente contienen la

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

ubicación de las válvulas de seccionamiento en la red, pero no indican cuáles de ellas están cerradas o semicerradas (reguladas). Otras imprecisiones de los planos de catastro son tuberías que aparentemente se cruzan o unen, pero en realidad no; tuberías encimadas en el dibujo, tubería cortadas, etc. La mayoría de estos detalles pueden ser corregidos solamente con la ayuda del personal del organismo operador, y en muchas ocasiones con inspección directa en campo que implica excavaciones. Dadas las dimensiones de las redes de las dos ciudades, tales trabajos están fuera del alcance del presente proyecto de investigación.

Se estudiaron y consiguieron para su uso en México tres sistemas computacionales extranjeros que integran modelos de redes de agua potable y alcantarillado con sistemas de información geográfica (Pipelinenet, Giswater y Plexearth), desarrollados en los Estados Unidos de Norteamérica, España y Grecia respectivamente; y un sistema de diseño de redes de agua potable y alcantarillado sanitario y pluvial, y de conducciones (UFC) desarrollado en Brasil. Dos de estos sistemas se entregan sin costo (Pipelinenet y Giswater), el tercero (Plexearth) se maneja con pago de una pequeña suscripción anual, y el cuarto es de costo relativamente bajo. Se tradujo al español el manual de UFC (que está en portugués), se llevó a cabo un curso sobre el mismo sistema en el IMTA, y se iniciaron los trámites de un convenio de colaboración con la Universidad Federal de Ceará, Brasil para su comercialización en México por parte del IMTA. Todos estos sistemas pueden ser transferidos a organismos operadores de agua potable y alcantarillado de México. Para mostrar su posible aplicación, para modelación y diseño en estos dos sistemas de agua, se implementaron modelos de ellos, se introdujeron en los sistemas y se efectuaron pruebas de correrlos.

Se programó un sistema propio que integra el modelo del mundialmente conocido programa de modelación hidráulica y de calidad del agua de redes de distribución con la información geográfica de INEGI de todas las ciudades mexicanas, y con Google Maps, Google Earth, Bing y otros servidores de información geográfica mediante Internet.

Con fines de poder considerar la demanda real de agua potable, que es estocástica, se desarrolló un procedimiento de simulación del consumo de agua potable en un domicilio, o en un grupo de domicilios, basado en el método de los pulsos rectangulares de Poisson (Método PRP) con generación de series sintéticas de consumo que se compararon con series medidas en Tijuana, B.C., con buena coincidencia. Con base en los datos de las mediciones y el procedimiento de simulación del consumo se desarrolló una metodología para obtener los siguientes parámetros que caracterizan la demanda estocástica de agua potable, como función de la población servida:

- Coeficiente de la demanda máxima horaria
- Coeficiente de la demanda mínima horaria
- Coeficiente de la demanda máxima instantánea
- Coeficiente de la demanda mínima instantánea

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

Se obtuvieron ecuaciones para expresar estos parámetros como función de la población servida.

Se construyó un tinaco en acrílico en tamaño real para las pruebas experimentales de mezcla y movimiento del agua, en el laboratorio de Hidráulica, perteneciente a la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelos, y se llevaron a cabo experimentos hidráulicos y de mezcla del agua, con que se determinó el comportamiento hidráulico y los procesos de mezclado dentro de tanques de regulación y en los depósitos intradomiciliarios, mediante modelación física y de Mecánica de Fluidos Computacional, así como parámetros del tiempo de residencia del agua y su impacto sobre el comportamiento del desinfectante. Con las pruebas de trazadores se pudo comprobar que a diferentes volúmenes y caudales, el flujo en los tinacos muestra zonas muertas entre el 40 y 60 %, con 0% de cortocircuitos.

El modelo se equipó con varios accesorios de uso del agua y se realizaron mediciones del gasto con resolución fina con el objeto de definir el patrón de la demanda para los usos de agua típicos en un domicilio y verificar la hipótesis de forma rectangular de los pulsos de demanda, así como para la determinación de sus parámetros estadísticos. Dichas mediciones servirán también como un inicio para analizar los posibles errores de medición de los micromedidores habitualmente utilizados en México, en presencia de almacenamiento intradomiciliario (tinacos). El caudalímetro se instaló en tres posiciones: después del depósito, antes del depósito, y directamente a los accesorios obviando el depósito; y se realizaron 30 mediciones (10 por cada accesorio) para la determinación de la variación de caudal en el uso del agua con diferentes accesorios individuales. Se realizaron también mediciones por cuatro días de la variación del caudal de suministro con demanda de agua de un domicilio simulada en laboratorio, y comparando con las lecturas de un micromedidor domiciliario normal.

El modelo se usó para investigar en laboratorio, a solicitud de Conagua, el sistema de purificación del agua en depósitos intradomiciliarios (cisternas y tinacos) ION AG+, comercializado recientemente en México, que se basa en desinfección con plata coloidal contenida en el cuerpo de columnas de purificación con esferas cerámicas que aprovechan el movimiento cinético del agua por medio de reacción electrostática, en parámetros que exceden los requerimientos de la norma oficial correspondiente NOM-244-SSA1-2008 “Equipos y sustancias germicidas para tratamiento domestico de agua”.

Se desarrollaron algoritmos de diseño óptimo de la sectorización de redes de agua potable apoyada en la teoría de los grafos y se propuso una sectorización de la red de agua potable de Xalapa, Ver.



Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

13 REFERENCIAS

- Ababeu Cristinel, Navaratnasothie Selvakkumaran, Bazargan Kia, Karypis George (2002). Multi-objective Circuit Partitioning for Cutsizes and Path-based Delay Minimization. IEEE, ISSN 07803-7607-2/02/\$17.00.
- Alcocer V., Tzatchkov V. (2007), Modelación hidráulica y de calidad del agua en redes de agua potable, Subdirección General Técnica, Gerencia de Ingeniería Básica y Normas Técnicas Manual de Agua potable, Alcantarillado y Saneamiento, MAPAS, CONAGUA.
- Alcocer, Y. V., Tzatchkov, V., Buchberger, S., Arreguín, C. F., Feliciano, “Stochastic Residential Water Demand Characterization”, Proceedings of the World Water & Environmental Resources Congress, ASCE-EWRI, Salt Lake City, UT, June 27-July 1, ISBN 0-7844-0737-1, 2004.
- S. Alvisi, Franchini Marco (2013). A Heuristic Procedure for the Automatic Creation of District Metered Areas in Water Distribution Systems. Urban Water Journal.
- Alonso, JM, Alvarruiz, F, Guerrero, D, Hernández, V, Ruiz, PA, Vidal, AM, Martínez, F, Vercher, J and Ulanicki, B (2000). “Parallel Computing in Water Network Analysis And Leakage Minimization”, Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, Vol 126, No 4, pp 251-60.
- Araujo L.S, Ramos H, y Coelho T. (2006). Pressure Control for Leakage Minimization in Water Distribution Systems Management. Water Resources Managements ©Springer 20: 133-149.
- AWWA (American Water Works Association Water Loss Control Committee) (2003). “Applying worldwide BMPs in Water Loss Control”. J. Am. Water Works Association, Vol 95, No 8, pp. 65-79.
- Basile, N., Fuamba, M. y Barbeau, B. (2008) Optimization of water design and location in water distribution systems. Proceedings of the 10th Annual Water Distribution System Analysis Conference WDSA2008, Van Zyl, J. E., Ilemobade, A. A., Jacobs, H. E. (eds), August 17-20, 2008, Kruger National Park, South Africa, pp. 361-373.
- Biggs, N., Lloyd, E. and Wilson, R., (1986). Graph theory 1736–1936. NewYork: Oxford University Press.
- E.J.M.Blokker; E.J. Pieterse-Quirijns; J.H.G.Vreeburg; J.C. van Dijk, Simulating Nonresidential Water Demand with a Stochastic End- Use Model, November/ December 2011, Journal of Water Resources Planning and Management, American Society of Civil Engineers, DOI 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000146.
- Bowen, P. T., Harp, J. F., Baxter, J. W., y Shull, R. D. (1993). Residential Water Use Patterns. AWWA Research Foundation, Denver, CO.
- Buchberger, S. G. y Wells, G. J. (1996). “Intensity, duration and frequency of residential water demands.” Journal of Water Resources Planning and Management, 122, No. 1, 11–19.
- Buchberger, S. G. y Wu, L. (1995). “Model for instantaneous residential water demands.” Journal of Hydraulic Engineering, 121, No. 3, 232–246.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

- Buchberger, S. G. y Lee, Y. (1999). Water Industry Systems: Modelling and Optimization Applications, capítulo Evidence Supporting the Poisson Pulse Hypothesis for Residential Water Demands, 215–227. Research Studies Press Ltd.
- Buchberger S.G., Carter J.T., Lee Y. y Schade. T.G. Random Demands, Travel Times, and Water Quality in Deadends. AWWA Research Foundation. 2003
- Candelieri Antonio y Messina Enza (2012). Sectorization and Analytical Leaks Localization in the H2OLEAK Project: Clustering-Based Services for Supporting Water Distribution Networks Management. Environmental Engineering and Management Journal.
- Clark, R. M., Abdesaken, F., Boulos, P. F. & Mau, R. E. (1996) Mixing in distribution system storage tanks: Its effect on water quality. Journal of Environmental Engineering, 122(9), 814-821.
- Clasen, T. F. & Bastable, A. (2003). Faecal contamination of drinking water during collection and household storage: The need to extend protection to the point of use. Journal of Water and Health, 1(3), 109-115.
- Comision Nacional del Agua (2012) Manual de Incremento de Eficiencia Física, Hidráulica y Energética en Sistemas de Agua Potable. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Chevalier, C., Safro, I., (2009). “Comparison of coarsening schemes for multilevel graph partitioning”, LNCS 5851, Springer, 191-205.
- Cormen, T.H., Leiserson, C.E. and Rivest, R.L. (1990). Introduction to algorithms. MIT Press, USA.
- DeOreo, W. B., Heaney, J. P., y Mayer, P. W. (1996). “Flow trace analysis to assess water use.” Journal AWWA, 79–90.
- Deuerlein, J.W. (2008). “Decomposition Model of a General Water Supply Network Graph”. Journal of Hydraulic Engineering, Vol 134, No 6, pp. 822-832.
- Di Battista, G., Eades, P., Tamassia, R. and Tollis, I.G. (1999). Graph Drawing (Algorithms for the visualization of graphs). New Jersey (USA): Prentice Hall.
- Diggle, P.J., 2003. Statistical Analysis of Spatial Point Patterns. 2nd ed., London: Edward Arnold.
- Dijkstra E. W. (1959) “a note on two Problems in conexión with graphs”, Numerische Mathematik, Vol. 1.
- Di Nardo, A, Di Natale, M, Guida, M and Musmarra, D. (2012a). Water Network Protection from Intentional Contamination by Sectorization, Water Resources Management, pp. 1-14, DOI: 10.1007/s11269-012-0133-y.
- Di Nardo, A., Di Natale, A., Di Mauro. A. (2012b). Water Supply Network District Metering. Theory and Case Study, CISM Courses and Lectures, Vol 543, Springer, Vienna-Heidelberg.
- Di Nardo, A., Di Natale, M., Santonastaso, G.F., Venticinque, S., (2011). “Graph partitioning for automatic sectorization of a water distribution system”, Proceedings of 11th International Conference on Computing and Control for Water Industry (CCWI). Urban Water anagement: Challenges and Opportunities, Centre for Water Systems, University of Exeter, Exeter (UK), 3, 841-846.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

- Di Nardo Armando y Di Natale Michele. (2010). A design Support Methodology for District Metering of Water Supply Networks. *Water Distribution System Analysis*.
- Di Nardo Armando y Di Natale Michele. (2013). A heuristic Design Support Methodology Based on Graph Theory for District Metering of Water Supply Networks. *Engineering Optimization*.
- Di Nardo Armando, Di Natale Michele, Santonastaso Giovanni F, Tzatchkov Velitchko G y Alcocer-Yamanaka Victor H. (2013). Water Network Sectorization Based on Graph Theory and Energy Performance Indices.
- Di Nardo Armando, Di Natale Michele, Santonastaso Giovanni F, Tzatchkov Velitchko G y Alcocer-Yamanaka Victor H. (2013). Performance Indices for Water Network Partitioning, 5th IWA International Conference on Benchmarking and Performance Assessment of Water Services.
- Di Nardo Armando, Greco Roberto, Santonastaso Giovanni Francesco, Di Natale Michele (2009). Resilience and Entropy Indices for Water Supply Network Sectorization in District Meter Areas. 9th International Conference on Hydroinformatics HIC 2009, Tianjin, China.
- Fanner, V.P.R., Sturm, J., Thornton, R. (2007). Leakage Management Technologies. AWWARF and AWWA Denver, Colo.
- Farley, M. (2001) Leakage management and control. A best practice training manual, World Health Organization, Geneva, Switzerland.
- Fiduccia, C.M., Mattheyses, R.M. (1982). "A linear time heuristic for improving network partitions", in Proc. 19th IEEE Design Automation Conference, 175-181.
- Ficha técnica del Sistema de purificación ION AG+
- García, Vicente Juan; García Bartual, Rafael; Cabrera, Enrique; Arregui Francisco; García Serra Jorge, Stochastic Model To Evaluate Residential Water Demands, September/October 2004, *Journal Of Water Resources Planning And Management*, American Society of Civil Engineers, DOI 10.1061/(ASCE)0733- 9496(2004)130:5(386)
- Gargano, R. y Pianese, D. (2000). "Reliability as tool for hydraulic network planning." *Journal Of Hydraulic Engineering*, 126, No. 5, 354–364.
- Giustolisi Orazio, Kapelan Zoran y Savic Dragan (2008). Extended Period Simulation Analysis Considering Valve shutdowns. *Journal of Water Resources Planning and Management* © ASCE.
- Giustolisi, O., Kapelan, Z. and Savic, D.A. (2008a). An algorithm for automatic detection of topological changes in water distribution networks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134 (4), 435–446.
- Giustolisi, O., Savic, D.A. Kapelan, Z., (2008b). "Pressure-Driven demand and leakage simulation for water distribution networks". *Journal of Hydraulic Engineering*, 134 (5), 626–635.
- Giustolisi, O., Savic, D.A. (2010). "Identification of segments and optimal isolation valve system design in water distribution networks." *Urban Water*, 7(1), 1-15.
- Giustolisi, O., Savic, D.A., Berardi, L., Laucelli, D. (2011). An Excel-based solution to bring water distribution network analysis closer to users. *Proceedings of Computer and Control in Water Industry (CCWI)*, September 5-7, Exeter, UK, D.A..Savic, Z. Kapelan, D. Butler (Eds) Vol. 3, pp. 805-810.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

- Gómez Ricardo, Márquez Alfeu Sa y Sousa Joaquín (2012). Decision Support System to divide a Large Network into Suitable District Metered Areas. *Water Science Technology*.
- Gomes Ricardo, Márquez Alfeu Sa y Sousa Joaquín (2012). Identification of the optimal entry points at District Metered Areas and Implementation of Pressure Management. *Urban Water Journal*.
- Goulter, I.C. and Morgan, D.R. (1985). An integrated approach to the layout and design of water distribution networks. *Civil Engineering Systems*, 2 (2), 104–113.
- Grayman, WM, Murray, R and Savic, DA (2009). “Effects of redesign of water systems for security and water quality actors”. In: Starrett, S. (Ed.), *Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress*. Kansas City, MO.
- Greco, R., Di Nardo, A., Santonastaso, G.F. (2012). “Resilience and entropy as indices of robustness of water distribution networks”. *Journal of Hydroinformatics*, IWA Publishing, doi:10.2166/hydro.2012.037.
- Gutiérrez Joanna A, Herrera Manuel, Pérez - García Rafael e Izquierdo Joaquín (2011). Aplicación de Técnicas de Teoría de Grafos en el Análisis de la Vulnerabilidad de Redes Abastecimiento de Agua. 10 Seminario Iberoamericano de Planificación, Proyecto y Operación de sistemas de Abastecimiento de Agua, Morelos, Michoacán, México, 10 al 14 de Enero.
- Herrera M, Canu S, Karatzoglou A, Perez-Garcia R y Izquiero J. (2010). An Approach to Water Supply Clusters by Semi-Supervised Learning. *International Congress on Environmental Modeling and Software Modeling for Environment’s Sake Fifth Biennial Meeting*, Ottawa, Canada.
- Herrera Manuel, Izquierdo Joaquín, Pérez García Rafael y Ayala Cabrera David (2011). Remuestreo del Grafo de la Red de abastecimiento como Soporte en el Proceso de Sectorización, 10 Seminario Iberoamericano de Planificación, Proyecto y Operación de sistemas de Abastecimiento de Agua, Morelos, Michoacán, México, 10 al 14 de Enero.
- Illian, J., Penttinen, A., Stoyan, H., Stoyan, D., 2008 *Statistical analysis and modelling of spatial point patterns* Wiley, Chichester.
- Izquierdo J, Herera M y Perez-Garcia R. (2009). Agent-Based Division of Water Distribution Systems into District Metered Areas. *4th International Conference on Software and Data Technologies*.
- Izquierdo, J., Herrera, M., Montalvo, I., Pérez-García, R. (2011). “Division of Water Distribution Systems into District Metered Areas Using a Multi-Agent Based Approach”, *Communications in Computer and Information Science*, 50 (4), 167-180.
- Kerneis A., Nakache F., Dequin A. & Feinberg M. (1995) The effects of water residence time on the biological quality in a distribution network. *Water Research*, 29, 1719–1727.
- Kernighan, B.W. and Lin, S. (1970). “An efficient heuristic procedure for partitioning graphs”, *Bell Sys. Tech. J.*, (49), 291–307.
- Kiya, F. y Murakawa, S. (1989). *Design Load for Water Supply in Buildings*. A. A. Balkema, Rotterdam.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

- Knobelsdorf, J. & Mujeriego, R. (1997) Crecimiento bacteriano en las redes de distribución de agua potable: Una Revisión Bibliográfica. *Ingeniería del Agua*, 4(2), 17-28
- Lambert A. (2002). International Report on Water Losses Management and Techniques: Report to IWA Berlin Congress, October 2001. *Water Science and Technology: Water Supply* 2(4).
- Lee, E., & Schwab, K. (2005) Deficiencies in drinking water distribution systems in developing countries. *IWA, Journal of Water and Health*, 3(3), 109-127.
- Mahdavi Mohammad Mahdi, Hosseini Khosro, Behzadian Kourosh, Ardehsir Abdollah y Jalilsani Fatemeh (2010). Leakage Control in Water Distribution Networks by Using Optimal Pressure Management: a Case Study.. *Water Distribution System Analysis*.
- Mahmood, F., Pimblett, J. G., Grace, N. O. & Grayman, W. M. (2005). Evaluation of water mixing characteristics in distribution system storage tanks. *Journal of American Water Works Association*, 97(3), 74-88.
- Martinez-Solano, F. J., Iglesias, P. L. & Gualtieri, C. (2010) Modelling flow and concentration field in rectangular water tanks. *International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs), 2010 International Congress on Environmental Modelling and Software, Modelling for Environment's Sake Fifth Biennial Meeting Ottawa, Canada*. 1-10.
- Mayer, P. W., DeOreo, W. B., Opitz, E. M., Kiefer, J. C., Davis, W. Y., Dziegielewski, B., y Nelson, J. O. (1999). *Residential End Uses of Water*. AWWA Research Foundation, USA.
- Mays, LW (2000). *Water Distribution Systems Handbook*. New York: McGraw-Hill.
- Monge Miguel, Nanopartículas de plata: métodos de síntesis en disolución y propiedades bactericidas, *An. Quím.* 2009, 105(1), 33-41, Marzo 2009.
- Moncada-Benavides, D. N. y Morales-Montes, H. (2003) Aplicación práctica de la dinámica de fluidos computacional (DFC) en la medición de flujo de fluidos. *Tecnología, Ciencia y Educación, Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos*, 18(2), pp. 57-66.
- Morones Ramírez Rubén, Mecanismo bactericida de la plata, *Revista digital universitaria "revista.unam.mx"*, Octubre 2009, Vol. 10, No.10
- Morrison J., (2004) *Managing Leakage by District Metered Areas: Practical Approach*. *Water* 21, 44-46
- Morrison J., Tooms S., Rogers D. (2007). *District Metered Areas Guidance Notes*, International Water Association Water Loss Task Force.
- Ng, A.Y., Jordan, M.I., Weiss, Y. (2001). "On spectral clustering: Analysis and an algorithm". In: *Advances in Neural Information Processing Systems 14*, MIT Press, 849-856.
- Neyman, J., Scott, E.L., 1958. *Statistical Approach to Problems of Cosmology*. *J. R. Stat. Soc. Serie B* 20, 1 – 43.
- Nicolin Matteo y Zovatto Luigino (2009). Optimal Location and Control of Pressure Reducing Valves I Water Network. *Journal of Water Resources Planning and Management* © ASCE 135:178-187.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

- Ostfeld, A and Shamir, U. (1996). “Design of reliable multiquality water-supply systems”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 122 (5), pp. 322-333.
- Ostfeld, A. (2005).”Water distribution systems connectivity analysis”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131 (1), 58–66.
- Ostfeld, A. and Salomon, E. (2004). “Optimal layout of early warning detection stations for water distribution systems security”, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Volume 130, Issue 5, 377-385.
- Perelman L., Ostfeld A. (2011a). Topological clustering for water distribution systems analysis. *Environmental Modelling & Software*, 26, 969-972.
- Poulin, A., Mailhot, A., Periche, N., Delorme, L., Villeneuve, J.P. (2010). Planning unidirectional flushing operations as a response to drinking water distribution system contamination. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Volume 136, Issue 6, 647-657.
- Prasad T. Devi y Park Nam-Sik, ASCE. M (2004). Multiobjective Genetic Algorithms for Design of Water Distribution Network. *Journal of Water Resources Planning and Management* © ASCE 130: 73-82.
- Sadiq, R., Kleiner, Y., & Rajani, B. (2010) Modelling the potential for water quality failures in distribution networks – Frameworks (I). *IWA Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA*, 59, (4), 255-276.
- Savic, D.A. and Walters, G.A. (1995). “An Evolution Program for Optimal Pressure Regulation in Water Distribution Networks”, *Engineering Optimization*, 24 (3), 197–219.
- Schafer, C. A. (2010) Impact of tank material on water quality in household water storage system in Cochabamba, Bolivia.(Tesis de Maestria). Department of Civil & Environmental Engineering, College of Engineering, University of South Florida. 1-130.
- Sturm R. and Thornton, J. (2005). “Proactive Leakage Management using District Metered Areas (DMA) and Pressure Management – Is it applicable in North America?” *Proceedings of Leakage 2005 Conference*, Halifax, Canada.
- Tarjan, R. (1972). Depth-first search and linear graph algorithms. *SIAM Journal of Computing* 1 (2), 146-160.
- Todini Etzio (2000). Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *UrbanWater*: 115-122.
- Todini, E. and Pilati S. (1988). “A gradient algorithm for the analysis of pipe networks.” In: B. Coulbeck and O. Choun-Hou, eds. *Computer Application in Water Supply. Vol. I – System Analysis and Simulation*. London: John Wiley & Sons, 1–20.
- Tokajian S. & Hashwa F. (2003) Water quality problems associated with intermittent water supply. *Water Science and Technology*. 47(3), 229-234.
- Tzatchkov Velitchko G, Alcocer Yamanaka Victor H, Bourguett Ortiz Victor (2006). Graph Theory Based Algorithms for Water Distribution Network Sectorization Projects. In *Proc. of the 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium WDSA*, Cincinnati, Ohio, USA.

Modelación y diseño de redes de agua potable con demanda estocástica

- Tzatchkov Velitchko G. y Alcocer-Yamanaka Víctor H. (2012). Graph Partitioning Algorithms for water Distribution Network Sectorization Projects. 10 the International Conference on Hydroinformatics HIC 2012, Hamburg, Germany.
- Tzatchkov, V., Alcocer, Y. V., Arreguín, C. F., Feliciano, D., "Medición y caracterización estocástica de la demanda instantánea de agua potable", Ingeniería Hidráulica en México, volumen XX, Número 1. Enero-marzo, 2005, p. 67-76
- Tzatchkov, V.G., Alcocer-Yamanaka V.H. and Rodriguez-Varela, J.M. (2006b) "Water Distribution Network Sectorization Projects in Mexican Cities along the Border with USA", Proceedings of the 3rd International Symposium on Transboundary Water Management, Ciudad Real, Spain, 2006, 1-13.
- Vidal, R., Martínez F. & Ayza, M. (1994) Aplicaciones de los modelos de calidad en la simulación de las redes de distribución de agua potable. Ingeniería del Agua. 1(3), 55-68.
- Vegas Niño Oscar T. (2012). Herramientas de Ayuda a la Sectorización de Redes de Abastecimiento de Agua Basadas en La teoría de Grafos Aplicando Distintos Criterios, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universitat Politècnica de Valencia.
- Wagner, J.M., Shamir, U. and Marks, D.H. (1988a). Water distribution reliability: analytical methods. Journal of Water Resources Planning and Management, 114 (3), 253–274.
- Wagner, J.M., Shamir, U. and Marks, D.H., (1988b). Water distribution reliability: simulation methods. Journal of Water Resources Planning and Management, 114 (3), 276–293.
- Water Authorities Association and Water Research Centre (1985). Leakage Control Policy and Practice. Technical Working Group on Waste of Water. London: WRC Group.
- Water Industry Research Ltd (1999). A Manual of DMA Practice. London: UK Water Industry Research.
- Wells, G. J. (1994). "Statistical characteristics of residential water demands," Master's thesis, University of Cincinnati.
- Wooldridge, M. (2002) An introduction to MultiAgent Systems. John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- WRC/WSA/WCA Engineering and Operations Committee (1994). Managing Leakage: UK Water Industry Managing Leakage, Report A-J. London: WRC/WSA/WCA.
- Xu, C. y Goulter, I. C. (1998). "Probabilistic model for water distribution reliability." Journal of Water Resources Planning and Management, 124, No. 4, 218–228.
- Zdenek, P. I. & Ashok, A. P. (2006) Modelling intermittent water supply systems with epanet. 8th Annual WD Symposium, EPA Cincinnati, Aug. 27-30,1-7.