

Modelación Asistida de Sistemas de Distribución de Agua (MASDA) Caso de Estudio: Acueducto Marsella

Fecha de recepción: 21/07/08
Fecha de aceptación: 05/09/08

Maikel Méndez Morales¹
Pamela Calderón Murillo²

Palabras clave

Agua, Análisis, Distribución, EPANet, Modelación.

Key words

Analysis, Distribution, EPANet, Modeling, Water.

Resumen

Este artículo pretende establecer los criterios técnicos y de factibilidad necesarios para el proceso de optimización del sistema de distribución de agua potable de la comunidad rural La Marsella, localizada en Venecia de San Carlos, Costa Rica. Para dicho propósito, se ejecutó un análisis hidráulico y de calidad para la extensión total del sistema. Con base en este análisis, se espera que sean tomadas acciones correctivas que aseguren la continuidad y correcta operación del sistema a largo plazo. En la actualidad, el sistema presenta diversas deficiencias operativas. Además, la construcción del túnel principal de conducción del Proyecto

Hidroeléctrico Toro III ha impuesto un riesgo potencial sobre la continuidad de la principal fuente de abastecimiento del sistema. Este proyecto fue llevado a cabo con el apoyo del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), el cual ha asumido la responsabilidad de garantizar la permanencia futura del sistema. Las labores se realizaron en varias etapas, desde la caracterización de campo y la toma de datos, hasta el proceso de análisis hidráulico vía EPANet, junto con un análisis financiero. La legislación nacional se respetó a la luz de todas las instituciones involucradas.

Abstract

This paper presents an approach to establish the technical and feasible criteria necessary for the optimization process of Marsella's Water-Distribution-System, a rural community located in Venecia de San Carlos, Costa Rica. For this purpose, a hydraulic and water-quality like analysis was undertaken for the whole system's extension. Based

1. Profesor Investigador Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO) Instituto Tecnológico de Costa Rica. Apdo 159-7050. Tel: (506) 2550-2425 / Fax: 2551-6663. Correo electrónico: mamendez@itcr.ac.cr.
2. Consultora. Actualmente con Volio y Trejos. Correo electrónico: pam1705@gmail.com.



on such analysis, corrective actions are expected to be taken in order to ensure the future continuity and correct operation of the system. At the present moment, the system exhibits various performance deficiencies. Furthermore, the construction of the main water conduction tunnel for the Toro III Hydroelectric Project has imposed a potential threat to the water-distribution-system's continuity. There is a latent possibility that this tunnel might negatively impact the system's main water source. This project was carried out with the support of the Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), which has assumed the responsibility to guarantee the future permanence of the system. The assignment was undertaken in several stages, from the field characterization and data gathering to the analytical hydraulic process via EPANet and financial statement. A total compliance with the national legislation in accordance with all relevant institutions involved was ensured.

Introducción

En la actualidad, el constante crecimiento que experimentan los centros urbanos, ha provocado gran presión sobre los sistemas de distribución de agua (SDA) para consumo humano. Un sistema de distribución de agua es una red de elementos que integra reservorios, depósitos, líneas de tubería, bombas y diversos tipos de controles, todos conectados entre sí con el propósito de llevar agua hasta los consumidores (Mays, 2001). Los sistemas de distribución de agua son un componente clave en el desarrollo de la infraestructura urbana que requiere de considerable inversión, capital y recursos. Una serie de aspectos inherentes tales como la hidráulica, la calidad del agua y los patrones temporales de demanda, debe ser tomada en cuenta con el fin de garantizar su continuidad y operación (Fujiwara, 1998). Por medio de herramientas de modelación asistida de sistemas de distribución de agua (MASDA), es posible generar un

mayor conocimiento sobre la naturaleza y posibilidades de cada sistema en pro de su optimización. Este caso de estudio se centra en el proceso de optimización del sistema de distribución de agua potable de la comunidad rural Marsella, ubicada en Venecia de San Carlos. En la actualidad, el sistema presenta diversas deficiencias en su desempeño hidráulico y calidad. Se tiene registradas hasta la fecha 345 acometidas que varían entre facturación residencial y comercial. La construcción del túnel principal de conducción del Proyecto Hidroeléctrico Toro III, ejecutado por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), impone un factor de riesgo sobre la futura continuidad de la fuente de abastecimiento de agua potable del sistema.

Por esta razón, el ICE, en conjunto con la Asociación de Administración del Acueducto (ASADA) y el Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), se dio a la tarea de evaluar las capacidades actuales del sistema, con el fin de identificar deficiencias y proponer las medidas necesarias para su optimización a largo plazo.

Objetivos

El objetivo primordial de este proyecto fue realizar un diagnóstico hidráulico, de infraestructura y de calidad del sistema de distribución de agua potable de la comunidad de Marsella, con el fin de identificar las deficiencias y plantear estrategias de solución.

Objetivos Específicos

- Identificar y caracterizar planimétrica y altimétricamente los elementos físicos que componen el sistema de distribución de agua potable actual.
- Realizar un análisis de los patrones de consumo y demanda estacionales del sistema de distribución de agua, fundamentado en los registros de consumo, aforos y micromedición.

- Evaluar el desempeño hidráulico actual del sistema de distribución de agua potable, con el propósito de identificar y cuantificar deficiencias en operación e infraestructura.
- Proponer y cuantificar soluciones a las deficiencias encontradas, en el ámbito hidráulico y de calidad del agua, con el fin de garantizar la continuidad y calidad del servicio a largo plazo.

Metodología

Para alcanzar el objetivo primordial del proyecto, se demarcó diversas etapas de trabajo con base en los objetivos específicos planteados.

Planimetría e infraestructura actual

Se realizó un levantamiento topográfico y altimétrico de todos los elementos físicos del sistema mediante estación total, incluyendo toma de captación, depósitos de almacenamiento, tanques quiebra-gradientes, acometidas domiciliarias y controles. Las características físicas de cada elemento, tales como dimensiones, materiales y rugosidades, fueron igualmente determinadas.

Consumos y demandas

Con base en los registros de micromedición de la ASADA en un rango de tiempo comprendido entre octubre del 2006 y julio del 2007, se procedió a ubicar espacialmente la demanda entre los nudos de consumo, los cuales fueron previamente establecidos. Además, se clasificó cada acometida de acuerdo con su uso residencial o mixto, este último principalmente alrededor de granjas avícolas.

Análisis hidráulico actual

Se estimó parámetros como el índice de agua no contabilizada, dada la ausencia de macromedición. Se utilizó una curva de modulación de demanda típica que fue ligeramente modificada para reflejar

los patrones típicos de la zona (Beckwith et al., 2006), lo cual se realizó con la colaboración de personal del ICE y la ASADA. Hidráulicamente, se utilizó el planteamiento de Darcy Weisbach para la estimación de las pérdidas de carga, asignándose una rugosidad absoluta de 0.015 mm para materiales plásticos (PVC y HDPE). La duración total del periodo de simulación fue de 24 y 72 horas, con intervalos de cálculo hidráulico cada 5 minutos.

$$hf = f \frac{L}{D} \cdot \left(\frac{V^2}{2g} \right) \dots\dots\dots(1)$$

Donde:

f = factor de fricción adimensional

L = longitud del tramo (m)

D = diámetro del tramo (m)

V = velocidad media del tramo (m/s)

g = aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)

El programa de dominio público EPANet se utilizó para la modelación y simulación del comportamiento hidráulico y de calidad del sistema de distribución. Desde el punto de vista hidráulico, EPANet posee dos requerimientos fundamentales (Rossman, 2002). El primero gira alrededor de la ecuación de continuidad, la cual estipula que el caudal volumétrico que entra a cada nudo debe ser igual al caudal volumétrico que sale del mismo nudo, excepto para los nudos donde el volumen de control (VC) cambia como función del tiempo (depósitos y reservorios). Esto asegura el balance de masas en toda la extensión del sistema de acuerdo con:

$$\sum_{i=1}^n \dot{Q}_i = 0 \dots\dots\dots(2)$$

Donde:

Q_i = caudal volumétrico de salida o entrada del nudo [L^3 / T]

desde el nudo i y para n nudos

... el constante crecimiento que experimentan los centros urbanos, ha provocado gran presión sobre los sistemas de distribución de agua para consumo humano.

El segundo requerimiento tiene que ver con el principio de conservación de la energía, el cual establece que la pérdida total de energía a lo largo de cualquier malla o circuito, debe ser igual a cero o igual a la energía adicionada por turbomaquinaria, de forma tal que:

$$\sum hf = E_a \dots\dots\dots (3)$$

Donde:

hf = pérdidas totales de energía específica [L]

E_a = energía adicionada al sistema [L]

El grado de complejidad inherente a la gran cantidad de elementos resulta análogo a un sistema de ecuaciones no lineales, cuya resolución en régimen no

permanente recae en un sistema de análisis computacional, en este caso, EPANet.

Propuesta de mejoras hidráulicas y de calidad

Se propuso cambios de dimensionamiento en tuberías de conducción y distribución para mantener los rangos de velocidad por debajo de los 2,5m/s, proyectando un factor de crecimiento de la población del 3,5% a 20 años. Las zonas de presión se establecieron con rangos de presión hidrostática de entre 10 m y 60 m máximo (AyA, 2007). Para el dimensionamiento de los depósitos de almacenamiento, se considero fracciones volumétricas de regulación y compensación, volumen contra incendio y volumen de emergencia. Para la calidad del agua, se fijó valores meta de al menos 0,50 mg/L de cloro libre en cada punto de la red de distribución y un máximo de 2,0 mg/L. Se asumió valores típicos de coeficientes de reacción en el medio de -0,05 1/d y -0,05 m/d para el coeficiente de reacción en paredes de tubería y depósitos (Castro & Neves, 2002). En ambos casos, se asumió reacciones de primer orden de acuerdo con:

$$C = C_0 e^{-Kbt} \dots\dots\dots (4)$$

Donde:

C = concentración puntual de cloro (mg/L)

C_0 = concentración inicial de cloro en $t = 0$

$\pm Kb$ = coeficiente de reacción (1/d)

t = tiempo (d)

Resultados

Situación actual

El levantamiento altimétrico reveló una topografía accidentada (Figura 1). La captación de la única fuente de agua (F_1) se localiza sobre la cota a 910 msnm, mientras que los puntos de consumo más alejados se encuentran a 410 msnm. Esto supone un cambio de elevación cercano a los 500 m. Con tal topografía, se requiere

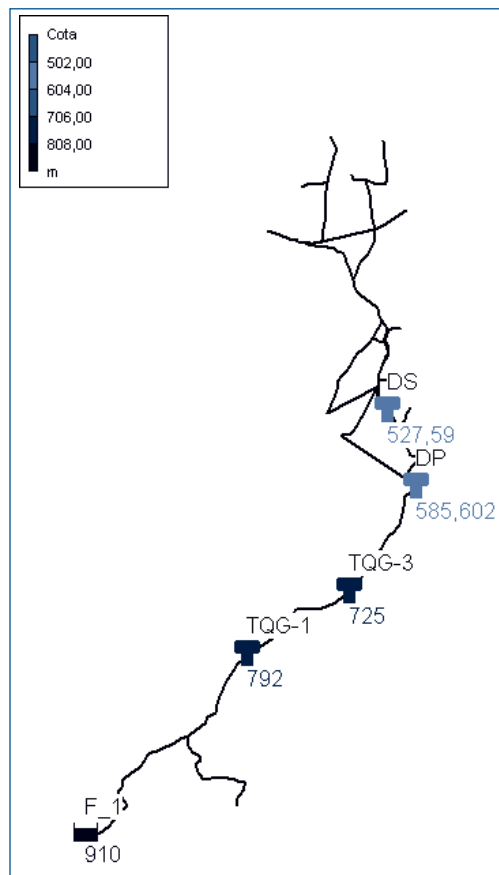


Figura 1. Ubicación de depósitos y tanques quebra-gradientes en el sistema de distribución.

una sectorización de zonas de presión adecuada que impida cargas de presión hidrostáticas mayores a 50 m. Sin embargo, en el SDA Marsella, esta sectorización es muy pobre, ya que sólo existen dos tanques quiebra-gradientes (TQG-1 y TQG-2) y con zonas de presión que superan los 120 m de carga estática. Respecto a la capacidad actual de almacenamiento, ésta alcanza los 68 m³, repartida en dos depósitos de almacenamiento, uno principal (DP de 50 m³) y otro secundario (DS de 18 m³), volumen muy por debajo de los 238 m³ mínimos actualmente requeridos, sin incluir ningún factor de crecimiento a futuro.

La ausencia total de controles conlleva rebalses incontrolados en los depósitos mencionados.

Aun cuando la ASADA lleva registros de consumo en micromedición (Cuadro 1), los cuales fueron utilizados para la asignación espacial de las demandas en los nudos, no existe macromedición, por lo que resulta difícil un balance de masas temporal adecuado para el sistema.

Por otro lado, los reducidos diámetros de conducción y distribución producen

pérdidas excesivas de carga que limitan el suministro en las zonas más bajas de la red de distribución. (Figura 2).

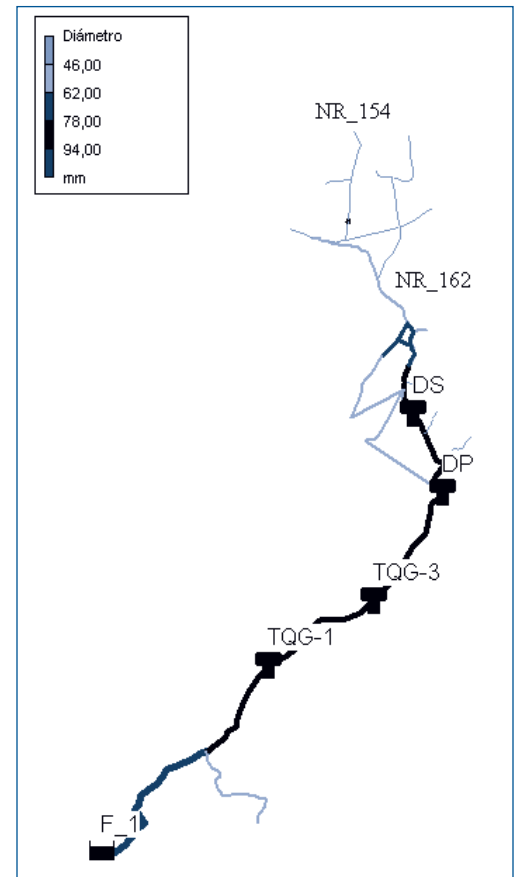


Figura 2. Detalle de variación de diámetros a través del sistema de distribución.

Cuadro 1. Consumo promedio mensual por micromedición para el periodo de análisis.

Año	Mes	Consumo Mensual Total	
		(m ³)	(l/s)
2006	Octubre	16,4290	0.00613
2006	Noviembre	14,9050	0.0058
2006	Diciembre	15,8050	0.0059
2007	Enero	16,7080	0.0062
2007	Febrero	16,4820	0.0068
2007	Marzo	14,3170	0.0053
2007	Abril	16,0730	0.0062
2007	Mayo	16,5200	0.0062
2007	Junio	16,6390	0.0064
2007	Julio	15,4460	0.0058

Algunos sectores alimentados por el depósito secundario (DS), los cuales alcanzan cargas de presión altas en la noche, paradójicamente llegan a presentar cargas de presión dinámica bajas o incluso cercanas a cero durante las horas de mayor consumo. Tal es el caso del Nudo NR_162 (ubicado sobre la cota 466.024 msnm), que presenta un rango de variación de más de 55 m, con presiones peligrosamente cercanas a cero en las horas de la mañana (Figura 3). El Nudo NR_154 (sobre la cota a 407,234 msnm) por su parte llega a exhibir presiones tan altas como 110 m a lo largo del periodo, lo cual sobrepasa

el límite máximo admisible (75 m) para zonas de presión con topografías quebradas (AyA, 2007).

Es importante recalcar que los patrones de variación de presión y consumo son en sí función de la curva de modulación asumida

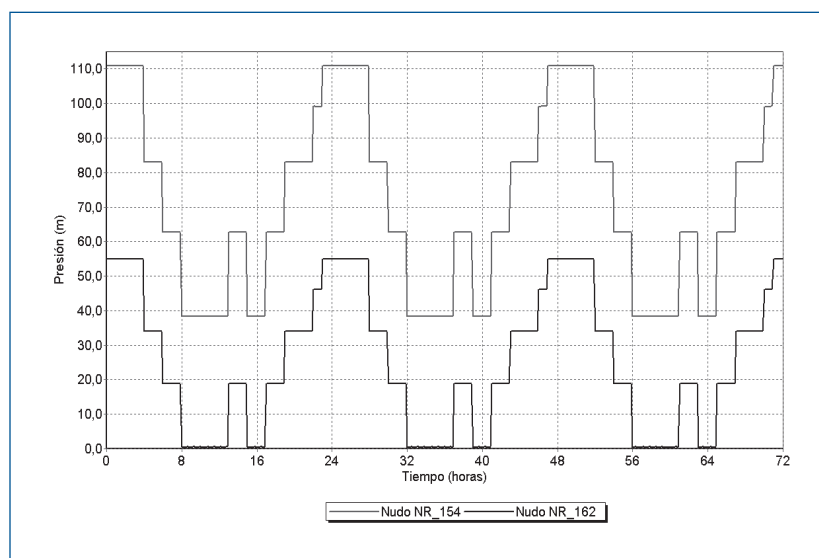


Figura 3. Variación temporal de la presión para los Nudos NR_162 y NR_154.

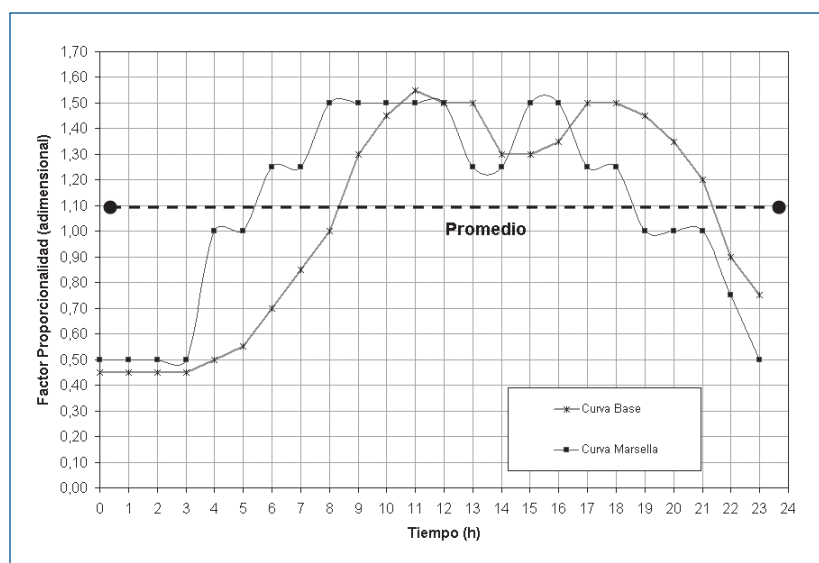


Figura 4. Curva de modulación típica y de Marsella. Factor proporcional versus tiempo.

(Figura 4), la cual debe ser ajustada y validada en posteriores campañas. El índice de agua no contabilizada (IANC) se asumió en un 10% del consumo medio diario. Un aspecto igualmente importante es el efecto negativo que la ausencia de controles y comandos adecuados imparten a la seguridad e integridad física del sistema, principalmente por la presencia de transitorios hidráulicos o golpes de ariete, a causa de aperturas o cierres súbitos de válvulas.

La figura 5 muestra variaciones de presión de alrededor de 120 m para el Nudo N_41 (aguas arriba de TQG-1), en lapsos muy cercanos a los cero segundos. Lo anterior imparte sobrepresiones considerables al sistema, las cuales generalmente terminan por dañar las tuberías y propiciar fugas subterráneas profundas.

La ausencia de un sistema adecuado de oxidación es reflejo de los conteos de coliformes fecales realizados en la red, que alcanzan hasta 40 coliformes por cada 100 mL en la red de distribución. Conteos en el sitio de fuente no pudieron ser realizados, dado lo inaccesible de la zona. Con base en este análisis y a manera de resumen, se identificó las siguientes deficiencias inmediatas en el SDA de Marsella:

- Pobre sectorización de las zonas de presión.
- Poca capacidad de crecimiento de la demanda, dadas las condiciones actuales.
- Diámetros insuficientes en las tuberías de conducción y distribución.
- Déficit de almacenamiento.
- Rebalses, sobrepresiones y transitorios por ausencia de controles.
- Ausencia de macromedición.
- Ausencia de sistema de cloración.

Mejoras Propuestas

La siguiente discusión gira alrededor de diversas mejoras propuestas al SDA, cuyas

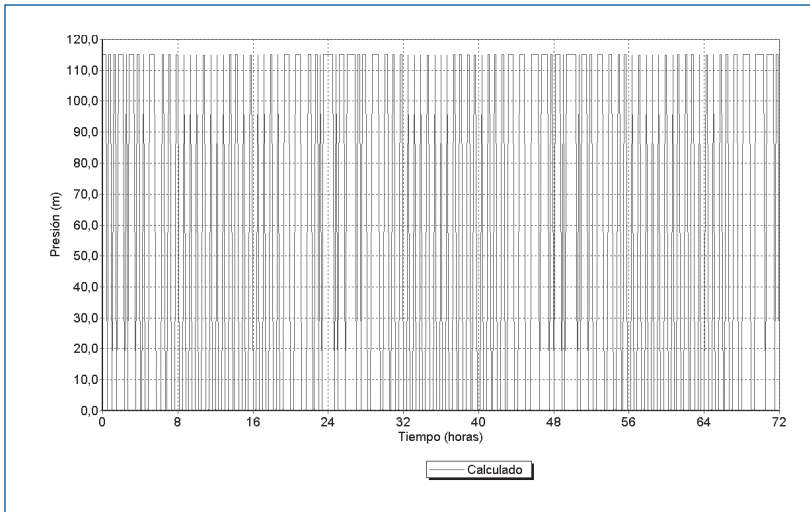


Figura 5. Variación temporal de la presión para el Nudo N_41.

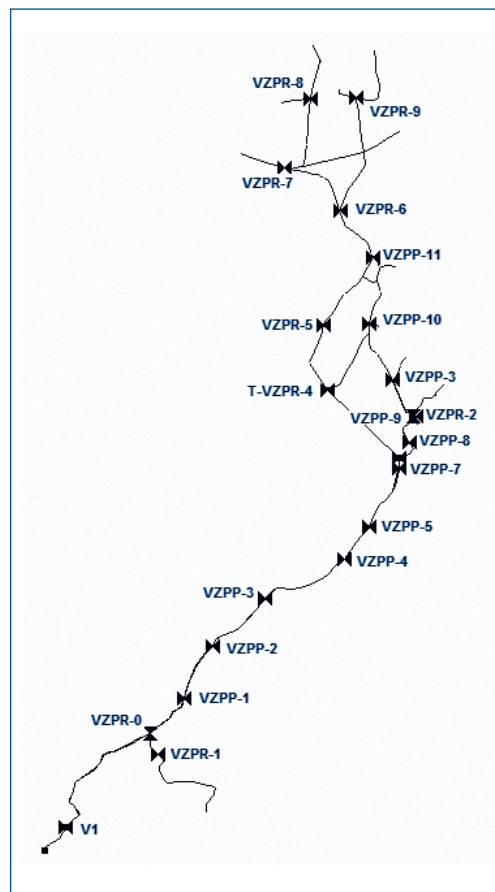


Figura 6. Distribución propuesta para las nuevas zonas de presión con base en PRVs.

respuestas fueron debidamente simuladas mediante EPANet. Cabe mencionar que al momento de redactar este documento, el ente ejecutor (ICE) aún no había iniciado la ejecución de las obras. Respecto a la situación de las presiones extremas, se consideró zonas de presión hidrostática a cada 50 m ó 60 m máximo sobre las líneas de conducción, distribución y ramales. Se utilizarán Válvulas Reductoras de Presión (PRVs) conjuntamente con válvulas de alivio para evitar daños en caso de sobrepresiones (Figura 6). Dichas válvulas garantizan un rango de presión mínimo de 10 m y un máximo de 60 m de carga dinámica. La figura 7 representa la zonificación de presión establecida por la válvula VZPP-2 (conectada por los Nudos CN_40 y N_40), la cual se encontrará localizada sobre el trazo de la conducción principal. Como se muestra aguas arriba de VZPP-2, la variación de presión en periodos de 24 horas oscila entre los 52 m máximo y los 45 m mínimo, lo cual se encuentra dentro del rango meta establecido para máximas presiones hidrostáticas. Por otro lado, la misma figura muestra cómo aguas abajo del elemento, la presión permanece constante en el valor de consigna establecido de 10 m.

Asimismo, el Cuadro 2 muestra los valores de consigna para cada una de las válvulas contempladas en el plan de mejora, junto con su elevación y diámetro nominal.

Respecto a los diámetros reducidos, se decidió reforzar la línea de conducción actual con una línea de conducción paralela de 100 mm en HDPE (Figura 8). No obstante, parte de los ramales de distribución con diámetros menores a 30 mm debe ser sustituida por diámetros mayores, dada la complejidad de conectar líneas paralelas en distribución. En ambos casos, las velocidades durante el periodo no alcanzan valores superiores a los 2.5 m/s, con una proyección de crecimiento a 20 años plazo, tal como se discute más adelante en este documento.

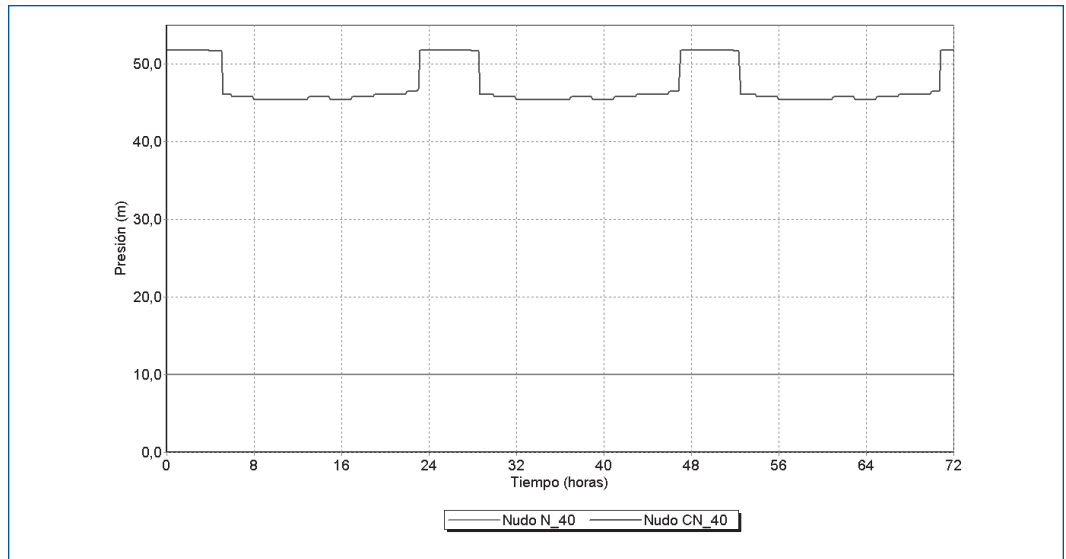


Figura 7. Variación temporal de la presión para los Nudos N_40 y CN_40 con base en PRVs.

Cuadro 2. Valores de consigna para las válvulas de control contempladas.

Elemento	Cota (msnm)	Diámetro (mm)	Tipo	Consigna (m o LPS)
Válvula V-1	890,000	150	FCV	15
Válvula VZPP-1	840,659	105	PRV	10
Válvula VZPP-10	509,870	82	PRV	20
Válvula VZPP-11	478,745	105	PRV	20
Válvula VZPP-2	798,821	105	PRV	10
Válvula VZPP-3	756,798	105	PRV	10
Válvula VZPP-4	715,354	105	PRV	10
Válvula VZPP-5	669,418	105	PRV	10
Válvula VZPP-6	628,542	105	PRV	10
Válvula VZPP-7	617,253	105	PRV	12
Válvula VZPP-8	570,964	82	PRV	10
Válvula VZPP-9	537,049	82	PRV	20
Válvula VZPR-3	519,858	55	PRV	10
Válvula VZPR-0	843,463	55	PRV	10
Válvula VZPR-1	819,632	55	PRV	10
Válvula VZPR-2	535,852	55	PRV	10
Válvula VZPR-4	554,738	82	PRV	10
Válvula VZPR-5	516,520	55	PRV	10
Válvula VZPR-6	466,024	55	PRV	15
Válvula VZPR-7	451,243	55	PRV	15
Válvula VZPR-8	425,500	55	PRV	15
Válvula VZPR-9	427,260	55	PRV	20

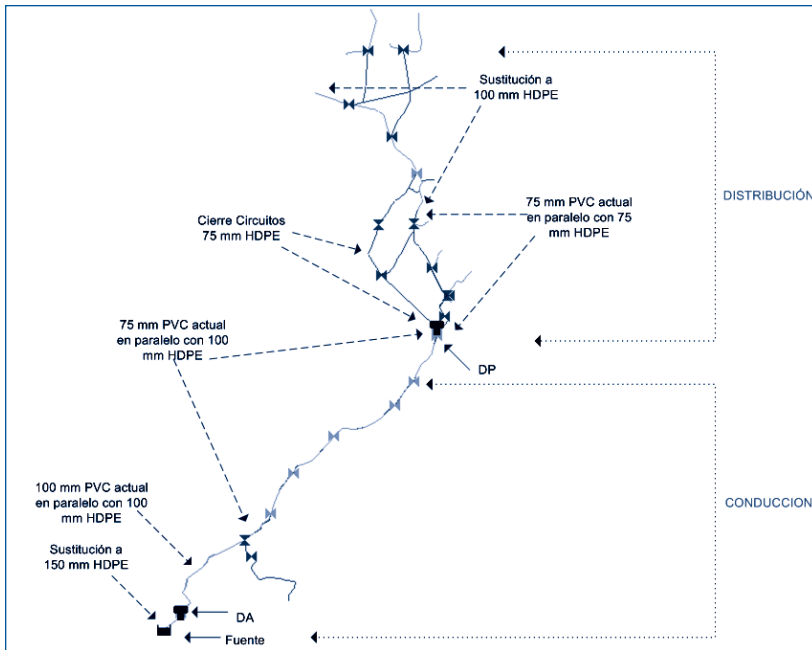


Figura 8. Demarcación de mejoras a lo largo del sistema de distribución.

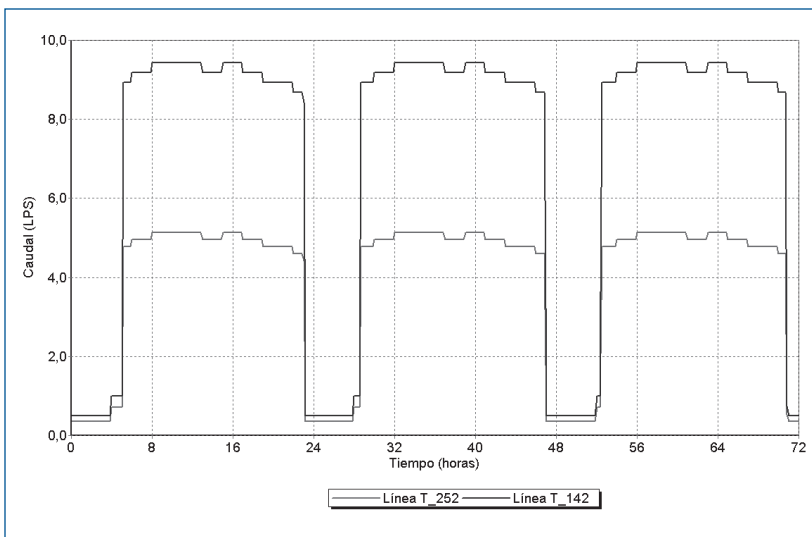


Figura 9. Variación temporal de la velocidad para las líneas T_252 y T_142.

La Figura 9 muestra la distribución de velocidades entre un tramo de la conducción actual en 82 mm PVC (T_125) y la nueva conducción en paralelo de 105 mm HDPE (T_347). Puede notarse cómo durante las 72 horas de la modelación, las velocidades en ambos casos se mantienen

en el orden de 1.0 m/s. Esto se debe en parte al hecho de que efectivamente existe poco consumo conectado en la conducción en la actualidad y se espera que tal comportamiento se mantenga con el tiempo. Tal como la teoría plantea, en sistemas de tuberías en paralelo, las pérdidas del tramo deben alcanzar valores similares y por ende, presentar velocidades igualmente semejantes.

Con base en la proyección de crecimiento poblacional de un 3,5% anual a 20 años (Cuadro 3), se determinó un caudal medio diario de 10.73 LPS. Igualmente, se dimensionó un depósito principal de almacenamiento de 400 m³ (DP) que incluye fracciones volumétricas de regulación/compensación (231.76 m³), contra incendios (28.8 m³) y emergencias (139.06 m³). Cabe mencionar que la curva de modulación típica utilizada en la simulación de las condiciones actuales (Figura 4), fue ajustada dentro de los dominios de EPANet para reflejar el crecimiento proyectado a 20 años, además de incluir un IANC de 10%. La ubicación del depósito principal (DP) sobre la cota a 617.257 msnm, fue primordial para enfrentar la mayor concentración de nudos de consumo, así como la sectorización de las zonas de presión.

La entrada de flujo a este depósito principal se ve limitada por una válvula limitadora de caudal (FCV) que impide un tránsito de flujo superior a 12 LPS, con el objeto de no exceder la capacidad de producción de la fuente actual. A su vez, se decidió instalar una válvula de flotación controlada por un sensor de nivel, con el objeto de evitar transitorios hidráulicos aguas arriba del depósito, causados a su vez por aperturas y cierres súbitos de la válvula de flotación. El rango de consigna de este sensor de presión se estableció entre 2.25 m y 3.00 m del nivel del depósito, lo que a su vez controla la apertura y cierre de flujo hacia el DP entre dichos rangos.

Cuadro 3. Dimensionamiento del depósito principal de almacenamiento (DP).

Volumen de Almacenamiento	Cantidad	Unidades
Caudal Medio Diario Proyectado (20 años)	10,7300	LPS
	927.072,0000	LPD
	927,0702	m3/día
Volumen Promedio Diario (VPD)	927,0702	m3
Volumen Regulación + Compensación	0,2500	Del VPD
VRC	231,7680	m3
Volumen Contra Incendios	Cantidad	Unidades
Caudal del hidrante clase B	32,0000	LPS
Tiempo para apagar el incendio (INS)	15,0000	minutos
Volumen Contra Incendio (VCI)	28,8000	m3
Volumen de Emergencia-	Cantidad	Unidades
Volumen de Emergencia (VE)	0,1500	Del VPD
VE	139,0608	m3
Volumen Total de Almacenamiento (VTA)	139,0608	m3

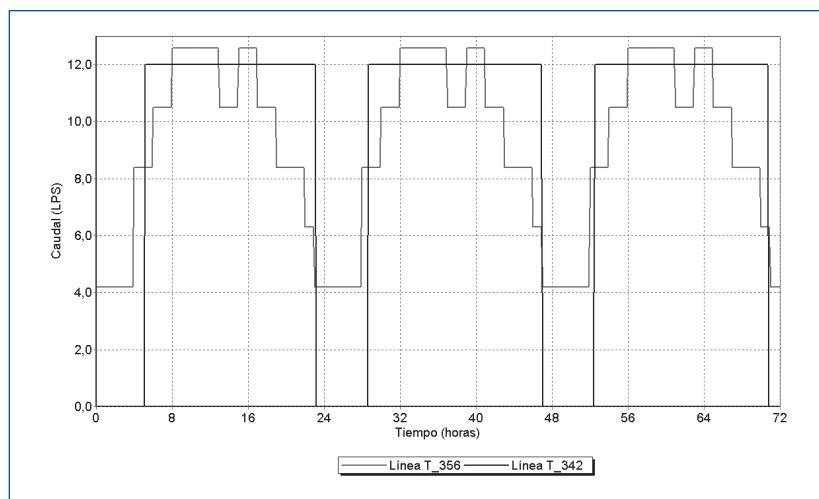


Figura 10. Variación temporal de los caudales de entrada y salida desde el Depósito Principal (DP).

Como lo muestra la Figura 10, el trazado de la línea T_356 presenta los lapsos en que la VRC permite la entrada de flujo al DP, siempre en un valor constante de 12 LPS. Nótese que los eventos de apertura se extienden por aproximadamente 18 horas, lo cual minimiza los transitorios

hidráulicos y favorece una mejor compensación de presiones en toda la sección del sistema conectada al DP. Por otro lado, la demanda aguas abajo del DP y representada por el trazo de la línea T_342, obedece directamente a la curva de modulación de consumo con caudales que van desde los 4 LPS hasta aproximadamente los 12.7 LPS.

Por otro lado, la Figura 11 muestra la consistencia de la variación de niveles en el DP respecto a los valores de consigna programados para el control de nivel. Esto implica que luego de un periodo de 24 horas, el nivel en el DP vuelve a valores muy similares a aquellos que presentaba al inicio de la modelación. También implica que los volúmenes de emergencias e incendios no se ven comprometidos en ningún momento. Un depósito secundario (DS) de 50 m³ (sobre la cota a 890,00 msnm) se posiciona cercano a la fuente, con el fin de abastecer ciertas acometidas en las inmediaciones de la fuente (Figura 8).

Este depósito secundario se utilizará para la instalación del sistema de oxidación.

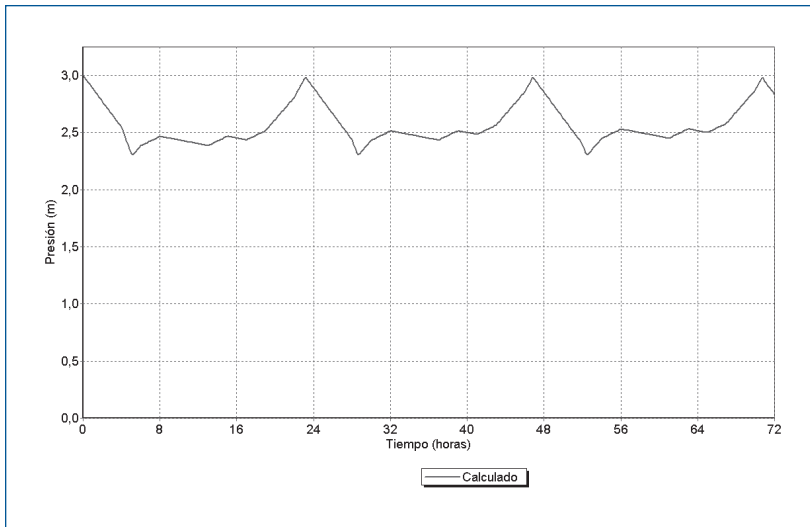


Figura 11. Variación temporal del nivel del Depósito Principal (DP).

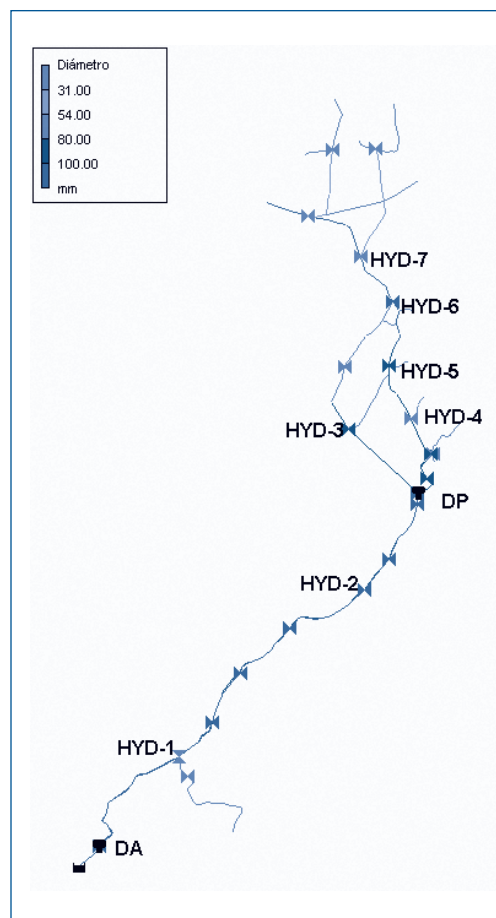


Figura 12. Distribución propuesta para hidrantes en el SDA.

Dado que originalmente se contempló un volumen para incendios en el DP, se decidió ubicar un total de siete hidrantes a lo largo del sistema. Éstos fueron ubicados más en relación con la concentración de acometidas que de acuerdo con los criterios de AyA (Figura 12). De acuerdo con los criterios del Departamento de Ingeniería de Bomberos del Instituto Nacional de Seguros (INS), el SDA debe ser capaz de suministrar un caudal sostenido de 32 LPS a una presión de 15 m durante un evento de incendio, por lo cual se evaluó la respuesta potencial de los hidrantes HYD-3 y HYD-6. En ninguno de los dos casos se llegó a las condiciones ideales. La Figura 13 muestra la respuesta del hidrante HYD-6 durante un periodo potencial de incendio de 6 horas. El caudal suministrado a 15 m de presión osciló entre valores sostenidos de 10.5 LPS y 9.0 LPS aproximadamente y la razón se centra en la carencia de área hidráulica, más que por la carencia de carga piezométrica. Los criterios de dimensionamiento de las tuberías obedecieron a la demanda máxima horaria y no a una demanda potencial de incendios.

Finalmente, con los coeficientes de reacción asumidos y la instalación de un punto de reinyección de caudal másico a 2mg/L de cloro en el depósito secundario, luego de 41 horas de iniciada la simulación (o sea, a las 5:00 PM del día 2), se alcanzó la meta de 0.50 mg/L de cloro libre en el Nudo más alejado del sistema, que es NR_192 (Figura 14).

Conclusiones

Los datos arrojados por EPANet resultan concordantes con las metas de diseño, al mismo tiempo que satisfacen las expectativas tanto del ICE como de la ASADA. Los costos del proyecto, sin incluir la obra gris de los depósitos, ascienden a 174 millones de colones (350,000.00 US dollars), según el presupuesto detallado

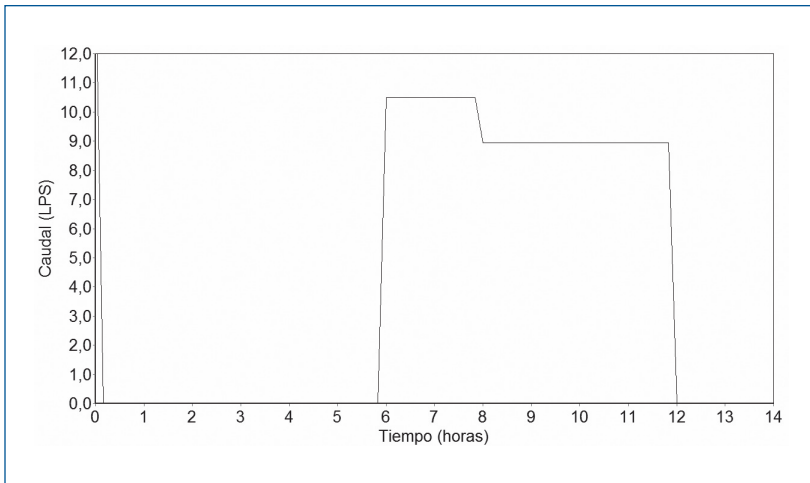


Figura 13. Respuesta del hidrante HYD-6 al evento de incendio planteado.

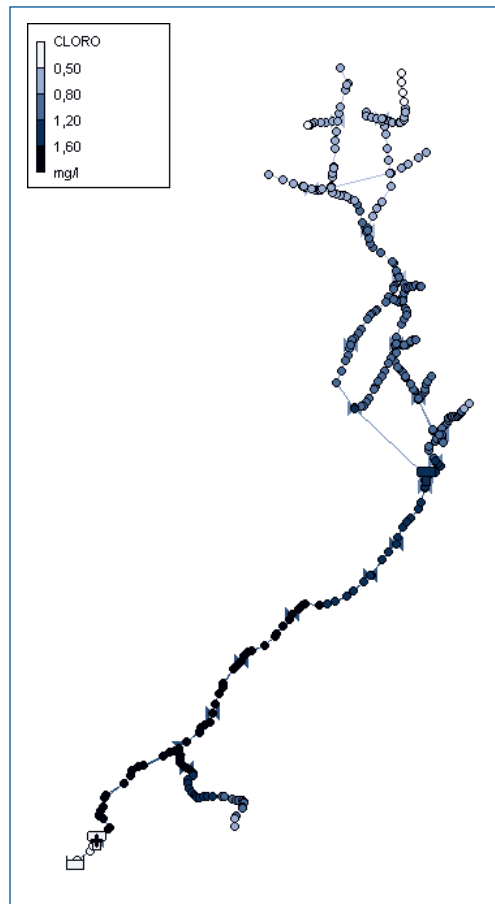


Figura 14. Concentración de cloro en los nodos de caudal del SDA a las 41 horas de iniciada la simulación.

por la coautora a la fecha de publicación de este documento. Las conclusiones se agrupan en función de los objetivos específicos y de forma analógica entre el sistema actual y el propuesto.

Situación actual

- El sistema de distribución de agua potable actual de la comunidad de Marsella presenta problemas de funcionamiento y calidad.
- La sectorización de zonas de presión es ineficiente e insuficiente, acusando así presiones en exceso altas y bajas dependiendo del horario.
- La operación de los tanques quebra-gradientes y depósitos con rebalse genera escasez de agua en los usuarios aguas abajo.
- El volumen de almacenamiento es incapaz de suplir de agua a todo el sistema en operación en el horario de mayor demanda, sin siquiera considerar un eventual incendio o emergencia.
- La insuficiencia del área hidráulica induce a un exceso en la pérdida de energía por fricción.

Mejoras propuestas

- Por medio de la simulación de las mejoras propuestas, se logró proyectar una operación continua y de calidad satisfactoria para los usuarios del sistema en los próximos 20 años.
- La correcta sectorización de zonas de presión asegura presiones por medio de controles y mantiene la presión en rangos adecuados para los usuarios, independientemente de su ubicación.
- Un estudio real y profundo de las demandas y patrones de consumo, tanto temporal como espacialmente, resulta indispensable para un diseño confiable y para una correcta toma de decisiones.
- La inclusión de un sistema de oxidación garantiza la potabilidad del agua en

el sistema desde el punto de vista microbiológico.

Recomendaciones

- Realizar las mediciones de campo necesarias para validar el diseño simulado, una vez que las mejoras propuestas hayan sido implementadas.
- Efectuar estudios bacteriológicos propiamente en la fuente.
- Establecer macromedición en el sistema de forma permanente, de modo que se pueda manejar un índice de agua no contabilizada propia de la red de distribución.
- Comprobar la ubicación escogida para los nuevos depósitos, además de realizar los estudios de factibilidad correspondientes, junto con las expropiaciones y servidumbres necesarias.
- Adiestrar al personal de la ASADA en el uso correcto de los controles planteados.

Bibliografía

- Beckwith, E; Cattran, S; Chase, D. 2005. Advanced Water Distribution, Modeling and Management. Haestad. Methods Inc. NY.
- Castro, P; Neves, M. 1998. Chlorine decay in water distribution systems case study – Iousada network. Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry. ISSN: 1579-4377.
- Fujiwara, O. 1998. Reliability Analysis of Water Distribution Networks in Consideration of Equity, Redistribution, and Pressure-Dependent Demand. Water Resources Research, vol. 34, N.º 7, p. 1843-1850.
- Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. 2007. Normas de diseño y construcción para urbanizaciones y fraccionamientos.
- Mays, L. 2001. Water Distribution Systems Handbook. American WaterWork Association. Mc Graw Hill Inc. NY.
- Rossman, L. 2002. EPANET 2, Users Manual. Water Supply and Water Resources Division National Risk Management Research Laboratory. U.S. Environmental Protection Agency. OH.