

DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA PARA ESTIMAR LOS CONSUMOS DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE DE BARQUISIMETO, VENEZUELA

Antonio Caravacas¹, Antonio Vela², Asis Alvarez¹, Elisa Verruschi¹ e Yris González¹

Resumen

En el presente trabajo se desarrolló una metodología para la estimación de consumos de una red de distribución de agua potable, cuando no se cuenta con equipos de medición instalados en la red para la cuantificación de los mismos. Para tal fin se analizó la red de distribución de agua potable de la ciudad de Barquisimeto, que abastece a una población de alrededor de un millón de habitantes. Dicha metodología se plantea en dos etapas, la primera de ellas destinada a la estimación de los consumos a través de variables que son también utilizadas en la estimación de caudales de aguas residuales como lo son: coeficientes de densidad poblacional y de superficie servida, y la otra, para la validación de los valores de presión obtenidos a través de la simulación al compararlos con los valores de presión medidos en algunos puntos de la red. Los resultados obtenidos indican que la calibración de la red, en cuanto al promedio de presiones, es satisfactorio, sin embargo el análisis puntual demuestra que se debe calibrar cada sector por separado para de esta forma lograr que la curva de comportamiento de presiones pueda ajustarse correctamente.

Palabras clave: Agua, Consumo, Hidráulica, Red de Distribución

INTRODUCCIÓN

Las empresas hidrológicas venezolanas, se han dado a la tarea de mejorar los sistemas de distribución, en cuanto a niveles de presión en la red y gasto requerido, en busca de satisfacer los requerimientos de los usuarios. Por tal motivo, se requiere tener mayor control en la red de distribución utilizando simuladores, que permitan ensayar distribuciones de gasto más eficientes a niveles de presión satisfactorios. Sin embargo, para operar la red bajo la acción de un simulador, se requiere que ésta se encuentre calibrada. En el caso de Barquisimeto, se cuenta con una red de distribución de aproximadamente 132 Km de acueducto, cuyos diámetros oscilan entre 150 mm y 1600 mm, abasteciendo a una población de alrededor de un millón de habitantes. Esta red no cuenta con equipos de medición de gasto instalados, que per-

mitan establecer una base de datos, con la cual se puedan cuantificar los consumos a lo largo de la red para lograr la calibración. De esta forma, surge la necesidad de desarrollar una metodología para la estimación de consumos de la red de distribución de agua potable, cuando no se cuenta con equipos de medición instalados en la misma para la cuantificación de tales consumos. Dicha metodología se plantea en dos etapas, la primera de ellas destinada a la estimación de los consumos, y la otra para la validación de los valores obtenidos, mediante la comparación de la presión medida en algunos puntos de la red. Hay que resaltar que las variables más importantes que se deben tomar en cuenta para llevar a cabo dicha estimación se refieren a la densidad poblacional, los niveles de consumo y la superficie abastecida, como se establece en la determinación de caudales de aguas residuales.

⁽¹⁾ Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre". Vice Rectorado de Barquisimeto. Av. Corpahuaico entre Av. La Salle y Av. Rotaria. Barquisimeto. Venezuela ⁽²⁾ Departamento de Tecnología. Universidad Jaume I. Campus de Riu Sec, Castellón, España
Dr. Antonio Vela Gasulla: Tel. 34 - 64 - 728209, Fax: 34 - 64 - 728106, E-mail: vela@tec.uji.es. Ing. Antonio Miguel Caravacas Solís: Tel. 051-423549, Fax: 051-414654, E-mail: acaravac@bqto.unexpo.edu.ve. Ing. Asis Eduardo Alvarez Lagos: Tel. 051-423549, Fax: 051-414654, E-mail: aalvarez@bqto.unexpo.edu.ve. Ing. Elisa Marisol Verruschi Pigliacampo: Tel. 051-423549, Fax: 051-414654, E-mail: everrus@bqto.unexpo.edu.ve. Ing. Yris Kenelma González Triana: Tel. 051-423549, Fax: 051-414654, E-mail: ytiana@bqto.unexpo.edu.ve

Artículo recibido y aceptado para su publicación el 8 de noviembre de 2001. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

Una herramienta disponible para ayudar en la gestión de redes es la de la simulación por medio de modelos matemáticos para régimen permanente, lo cual permite el estudio de diferentes condiciones de operación para una determinada red sin necesidad de intervenir físicamente en ella. Para lograr dicha simulación es necesario conocer, entre otras cosas, la distribución de consumos de la red, sin embargo, instalar un sistema de medición que permita conocer dicha distribución significa una elevada inversión para realizarse a corto plazo.

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Realizar la estimación de los consumos de caudal de la red de Barquisimeto, a través de una metodología fundamentada en el software EPANET1, usando el modelo estático para resolución de redes, validando los resultados mediante la medición de la presión estática, en diversos puntos de la red.

OBJETIVOS

Definición del coeficiente que permite relacionar el consumo de las diversas zonas de la red como una función del caudal disponible en la misma.

Asignación de la relación porcentual del consumo de cada nodo, como una función del caudal asignado a los sectores de la red.

Estimación del consumo de cada nodo en los diferentes sectores de la red.

Ajuste de los consumos asignados, mediante la validación de las mediciones basadas en la presión estática en diversos nodos a lo largo de la red.

Evaluación de la calibración lograda por la metodología aplicada.

La red de distribución en estudio mantiene diversas condiciones de operación, mediante la maniobra de válvulas principales, según la necesidad dispuesta por la gerencia operativa, sin embargo los objetivos planteados se aplican a una única condición de operación, considerada como la más trascendental.

METODOLOGÍA

La metodología se inicia con el procedimiento requerido para estimar el caudal de consumo de la red, desarrollando previamente una descripción de la misma y de los parámetros requeridos para tal fin. Posteriormente, se desarrolla un proceso de ajuste mediante la validación de los resultados, y finalmente se describe una evaluación de la metodología para establecer el grado de calibración de la red.

Descripción de la red

La red de agua potable de Barquisimeto, se alimenta por gravedad desde dos grupos de tanques, uno localizado al oeste de la ciudad denominado tanques “El Tostao”, conformado por dos unidades con una capacidad de 30.000 metros cúbicos cada uno, cuyo abastecimiento proviene de la planta de tratamiento “Ciudad de Barquisimeto”; ubicada a 26 kilómetros de los tanques “EL Tostao”, que

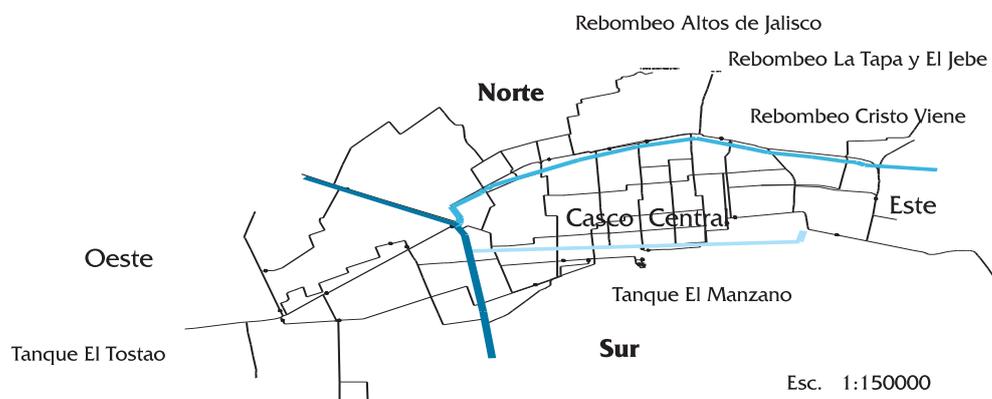


Figura 1. Esquema del Macromodelo la Red de Esc. 1:150.000

toma agua del embalse “Dos Cerritos”, ubicado a 28 kilómetros de la planta de tratamiento. El otro grupo está conformado por un tanque ubicado al sur de la ciudad, denominado “Los Colosos”, con una capacidad de 12.000 metros cúbicos, el cual se abastece de un grupo de pozos denominados “Pozos de Macuto” (Ver Figura N° 1).

Esta red suministra agua a una población de alrededor de un millón de habitantes, con un caudal promedio de entrada de 3.200 l/s, de los cuales, alrededor de 2.800 l/s, son suministrados por los tanques de “El Tostao”, y el resto por el tanque “Los Colosos”.

La red de Barquisimeto dispone de una serie de acueductos principales, cuyos diámetros oscilan entre 150 mm y 1.600 mm., recorriendo una extensión de Oeste a Este, de aproximadamente 25 Km. de longitud de tubería, comprendidos desde los tanques de “El Tostao”, hasta la avenida “Los Leones” ubicada al Este de la ciudad.

Fases para la asignación de los consumos

Para desarrollar este cometido se dispone de un modelo de detalle elaborado por la empresa; el cual sirvió como marco de referencia, para realizar cada una de las etapas que se indican a continuación:

- Recopilación de información.
- Esqueletización de la red.
- Análisis y asignación de consumos.

Siguiendo estas etapas se dispone de un primer modelo sin validar. Las siguientes etapas se centran en la corrección y ajuste de los parámetros de la red, para que el modelo la reproduzca con una cierta fiabilidad.

- Toma de medidas de presión y caudal.
- Ajuste del modelo.

Recopilación de información.

Cuando se habla de la información de un sistema de distribución, se refiere a los elementos que lo conforman: como tuberías, válvulas, bombas y depósitos; el esquema de operación de las plantas de tratamiento y pozos como puntos de suministro; el esquema de regulación de la red, maniobras de válvulas y todos aquellos aspectos que sirven para reproducir el comportamiento de la red en el tiempo.

En función de la información requerida, los datos recopilados fueron:

Topología de la red: se estableció la conectividad entre los elementos que conforman el sistema, a partir de un vuelo de la ciudad de Barquisimeto en una escala de 1 a 50.000, el cual contenía la topología del acueducto de Barquisimeto. Sin embargo, la información concerniente a la localización de algunas válvulas de regulación y cierre fue suministrada por el personal de operación del sistema. Además la red se encuentra dividida en cinco sectores: Oeste, Norte, Sur, Casco Central y Este; como se indica en la Figura N° 1.

Tuberías: se recopiló la información de los planos de detalle referente a diámetro y longitud. En cuanto al material, no se disponía de la información, y se mantuvo el factor de rugosidad usado en el Modelo de referencia, con un valor de 0,2 mm, el cual está dentro del rango de valores recomendado en la bibliografía para tuberías en servicio (0,1 mm²).

Bombas y/o estaciones de bombeo: el sistema de bombeo, se utiliza para suministrar agua a otros sectores del acueducto, según se indica en la Figura N° 1; por lo que en este estudio, dichos puntos son considerados como consumos.

Elementos de regulación: la información de las válvulas principales, en cuanto a diámetro, tipo, y apertura, fue suministrada por el personal de operación del sistema; para dos condiciones de regulación, “válvula obelisco abierta y válvula obelisco cerrada”; a partir de estos datos se determinaron sus características resistentes.

Depósitos: el sistema en estudio, dispone de los dos grupos de depósitos descritos anteriormente.

Puntos de consumo: el sistema dispone de un conjunto de rebombes, ver Figura N° 2, y para la ubicación de los puntos de consumos en la red, se partió del Modelo de referencia.

Esqueletización de la red

Esta fase consiste en el tratamiento de la información recopilada, hacia la simplificación y la esquematización de los elementos de la red, de acuerdo a las facilidades del programa de simulación a utilizar.

EPANET, es un programa de simulación que utiliza el modelo cuasi-estático, para seguir la evo-

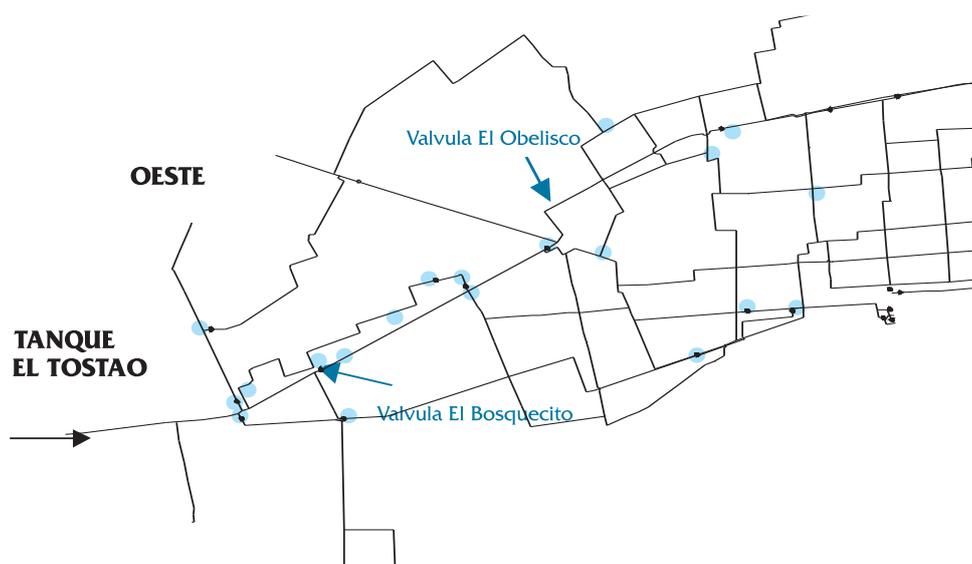


Figura 2. Ubicación de las válvulas “El Obelisco” y “Bosquesito”

lución del flujo del agua en las tuberías, de la presión en los nudos de demanda, del nivel del agua en los depósitos, y de la concentración de cualquier sustancia a través del sistema de distribución durante un período de simulación prolongado. Esto permite una comprensión eficaz del comportamiento de los sistemas y sus respuestas a los diferentes condicionantes que se les va imponiendo a lo largo del tiempo, constituyendo un instrumento eficaz en la gestión de los sistemas de distribución de agua.

Entre las simplificaciones en la red para la elaboración del macromodelo, cabe mencionar:

Simplificación de tuberías: Se consideraron como parte de la red los diámetros mayores a 300 mm., sin embargo en algunos casos, fue necesario incluir tuberías de menor diámetro con el fin de mantener la conectividad de la red.

Estado de operación del sistema: se refiere a la operación de los tanques de suministro “El Tostao”, la cual se caracteriza por la presencia de una conducción a canal en un tramo de la tubería que une los tanques con la válvula “El Bosquesito” (ver Figura N° 2); mientras que para el tanque “Los Colosos”, la salida de dicho tanque se encuentra presurizada pero se genera una conducción a canal en la entrada de la red. Este estado de operación se simula de la siguiente manera: Los Tanques “El Tostao”, se consideran como un reservorio, cuya cota se varía hasta lograr la presión en un punto de referencia (válvula “El Bosquesito”), la cual es conocida. Para el Tanque “Los Colosos”, se conside-

ra como un punto de inyección al sistema; excluyendo del modelo la aducción de salida del tanque.

Estado de regulación del sistema: se define a través de la condición de apertura o cierre de la “Válvula Obelisco”; ya que con la maniobra de esta válvula, la empresa controla la distribución de caudal en diferentes sectores de la ciudad.

Análisis y asignación de consumos.

En la red de distribución de agua de la ciudad de Barquisimeto no se cuenta con registros de consumo, ni en el domicilio, ni en el acueducto. La Gerencia Comercial de la Empresa establece sus tarifas basándose en una distribución de consumos por zonas denominado tarifa plana, la cual se basa en los antecedentes de la empresa y de acuerdo al tipo de actividad que se desarrolla en cada zona (comercial, residencial, industrial, etc.).

Realizar una estimación de consumos como lo establece la Gaceta Oficial de nuestro País implica un trabajo muy laborioso y complicado dada la extensión de la zona y la variedad de actividades que en ella se desarrollan, por otro lado el *Plan de Desarrollo Urbano Local* (PDUL) de la ciudad de Barquisimeto considera una dotación de 266 l/p/día para toda la ciudad, a excepción de las zonas industriales, para las cuales recomienda una dotación de 90 l/p/día, sin embargo estos valores no representan adecuadamente el comportamiento del sistema, ya que considera por igual todos los sectores de la ciudad.

Por lo anteriormente expuesto, a continuación se presenta la metodología desarrollada para cargar la red con una estimación de demandas que se ajuste mejor a su comportamiento, tomando en cuenta los dos aspectos citados previamente. Según George Tchobanoglous, en su libro *Ingeniería de aguas residuales* de 1995, establece que las variables que se toman en cuenta para la estimación de los consumos son: densidad poblacional, clase de consumidores (residencial, industrial, comercial, etc.) y superficie abastecida. Estas tres variables se relacionan entre sí, de tal forma que se puede estimar el consumo por zonas, como un porcentaje del caudal suministrado a la red, según un coeficiente de corrección denominado "Coeficiente de Consumo por Zona",

Una vez obtenido el caudal de consumo para cada una de las zonas y previa selección de los nodos de consumo por zona, se procede a distribuir uniformemente las demandas de la zona. Finalmente se determina el caudal de consumo correspondiente a cada uno de los cinco sectores en que está dividida la red, agrupando para ello las diferentes zonas que contiene cada sector, de tal forma que la demanda para cada nodo se expresa en función del caudal del sector. El procedimiento para la determinación de los consumos se presenta a continuación:

Clasificación de las zonas

Para establecer el coeficiente de densidad poblacional, es necesario clasificar los diferentes niveles de consumo o zonas que existen en la red.

De esta forma, dichas zonas se clasificaron según el siguiente criterio:

Zona Baja: aquélla en la cual existen sólo residencias unifamiliares (casas).

Zona Media: aquélla en la cual existen tanto residencias unifamiliares como multifamiliares (casas y edificios)

Zona Alta: aquélla en la que sólo existen residencias multifamiliares (edificios) o zonas comerciales.

Zona Muy Alta: asignada a las zonas industriales.

Determinación de los coeficientes de consumo por zonas

El coeficiente de densidad poblacional permite estimar el valor porcentual del consumo en las zonas, sin embargo no considera el área geométrica involucrada para cada zona, por lo que la asignación de consumo no es totalmente representativa, ya que no es suficiente el conocer la cantidad de personas que requieren el servicio, sino también como están distribuidas territorialmente.

El objetivo de este paso es determinar un valor porcentual asignado a las diferentes zonas a lo largo de la red, de tal forma que, el consumo asignado a esa zona se represente por el producto del caudal total de entrada a la red y este valor porcentual.

Para ello se debe considerar el área geométrica correspondiente a cada zona y corregirla mediante el coeficiente de densidad poblacional, de tal forma que, el área de distribución de consumo se verá incrementada si el coeficiente de densidad poblacional es mayor a uno, o disminuida para el caso contrario.

Finalmente, el Coeficiente de Consumo por Zona (CCZ) se puede determinar como un valor porcentual del cociente entre el área corregida por zona y el área corregida de la totalidad de la red, según la relación:

$$CCZ = \frac{\text{área corregida por zona}}{\sum \text{áreas corregidas por zona}} \quad (1)$$

donde el área corregida por zona se determina a través del área geométrica, corregida con el coeficiente de densidad poblacional (Cdp), según la ecuación (2):

$$A_{cpz} = Cdp * A_{gz} \quad (2)$$

donde:

A_{cpz} : Área Corregida por Zona

Cdp: Coeficiente de Densidad Poblacional

A_{gz} : Área Geométrica de la Zona.

Con la finalidad de identificar más claramente las zonas a lo largo de la red, se tomó el plano de planta y se subdividió en cuadrantes, dentro de los cuales se podían identificar las diversas zonas, tal como se muestra en la Figura N° 3.

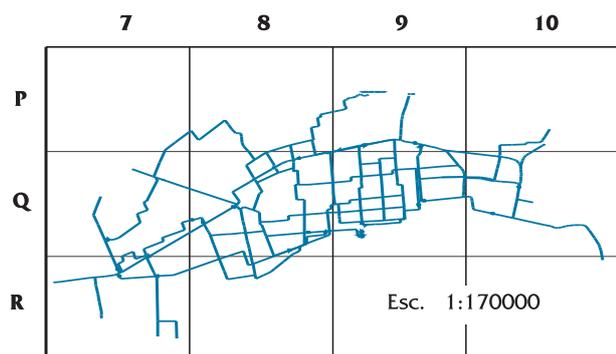


Figura 3. División de la red en cuadrantes

Determinación de los coeficientes de densidad poblacional

La asignación de consumos para las diferentes zonas debe establecerse en función de la densidad poblacional existente. Por ello se define un coeficiente que considere los valores porcentuales de asignación del consumo relativo a las diferentes zonas, tomando un valor de referencia, al cual se le asignará un coeficiente igual a uno. Así, los coeficientes por encima de uno, indican zonas de mayor consumo y coeficientes inferiores a la unidad, zonas de menor consumo, respecto a este valor preestablecido.

El parámetro mínimo de consumo se consideró como 20 casas por manzana, asignándole dicho caso a las zonas bajas. Para las zonas medias, se consideró la existencia de casas y edificios, de tal forma que, un edificio ocupa el espacio físico correspondiente a 5 casas y a su vez, representa 15 casas a nivel de consumo, además se fijó el valor de 1.5 edificios por manzana para este caso, lo que establece que dicha zona considera un parámetro de consumo de 35 casas por manzana, representando un aumento del 75% con respecto al parámetro mínimo (20 casas/manzana).

Por otra parte, en la zona alta se consideró que existen únicamente 4 edificios por manzana, lo que representa un parámetro de consumo de 60 casas/manzana (al considerar 15 casas por edificio) y un incremento de consumo del 300%. Finalmente para las zonas muy alta se consideró que existen 5 edificios por manzana, por lo que el parámetro de consumo representa 85 casas/manzana, lo que implica un incremento del 425 %.

Para el cálculo del “Coeficiente de Densidad Poblacional” se tomó como valor de refe-

rencia el correspondiente a la zona media (35 casas/manzana), así, para esta zona el valor de dicho coeficiente es de uno. En la Tabla 1 se muestran los valores del coeficiente de densidad poblacional para las diferentes zonas.

Por ejemplo, el cálculo del coeficiente para la zona baja es, $Cdp = 20/35$, $Cdp = 0.5714$.

Con la metodología planteada arriba, se obtienen los resultados de los Coeficientes de Consumo por Zona, los cuales se pueden observar en la Tabla N° 1.

Tabla 1. Coeficiente de Densidad Poblacional (Cdp)

Zona	Casas por manzana	Cdp
Baja (C)	20	0,5714
Media (C+E)	35	1,0000
Alta (E)	60	1,7143
Muy Alta (ZI)	85	2,4286

C: Casas, E: Edificios, ZI: Zona Industrial

Determinación de los consumos por sectores

Como se mencionó anteriormente Hidrolara ha dividido la red en cinco sectores: Oeste; Norte; Sur; Casco Central y Este.

Esto permite un control en cuanto al proceso de facturación, el cual consiste, en asignar para cada sector, un conjunto de tarifas que se apoya en una asignación de consumos estimados, denominado “tarifa plana”.

Para la determinación de los consumos se utilizó esta misma sectorización, así, para cada sector se determinó el conjunto de zonas existentes, para luego sumar los coeficientes de consumo de dichas zonas. Por otra parte, se determinó la cantidad de caudal disponible para el consumo, es decir, al total de agua inyectada en la red (El Tostao y Los Colosos) se le restó el agua utilizada para re-

Tabla 2. Consumos por sector

Sector	Porcentaje de Consumo	Consumo Ips
Oeste	14	339,94
Norte	31	766,22
Casco Central	25	612,88
Sur	6	157,31
Este	24	604,94
Caudal Total Consumido		2481,29

bombeos y para llenaderos de camiones cisterna. De esta forma se obtiene el caudal disponible para ser distribuido en la red, luego, al multiplicar éste por el coeficiente de consumo del sector, se obtiene el caudal disponible para ser distribuido en el sector.

En la tabla N° 2 se muestran el porcentaje de consumo y el caudal para cada sector.

En la Tabla N° 3 se muestran los valores para los caudales de entrada a la red y para los rebombes, así como el caudal disponible para el consumo.

Tabla 3. Caudal disponible en la Red

Tanques de Suministro	Caudales (lps)
Macuto (N3007)	410
El Tostao	2783
Sub-Total	3193,0

Rebombes	lps
Altos de Jalisco (N24)	136,66
El Jebe (N45)	91,31
Cerro Gordo (N76)	72,26
Zona Industrial (N134)	65,57
Las Colinas (N489)	31,00
Bobare (N971)	60,00
La Paz (N991)	183,80
Llenadero (N2086)	71,11
Total de Rebombes	711,71

Caudal disponible en la red	2481,29
------------------------------------	----------------

Determinación de los consumos por nodo

El procedimiento para la determinación del consumo por nodo fue el siguiente:

Se escogió un número representativo de nodos por cada sector.

Se determinó para cada nodo seleccionado, el tipo de zona al cual corresponde (Baja, Media, Alta o Muy Alta).

Para cada sector se totalizó el número de nodos por tipo de zona.

Se distribuyó uniformemente el caudal de cada zona entre el número de nodos de dicha zona, por ejemplo: en el cuadrante P-08 existen dos zonas identificadas como Baja y Muy Alta, a las cuales se les designaron dos y un

nodo respectivamente, luego, el coeficiente de consumo del nodo referido al sector se puede calcular de la siguiente manera:

$$CCN = \frac{CCZ}{NNZ} * \frac{CDR}{CS} \quad (3)$$

donde:

CCN: Coeficiente de consumo de los nodos de la zona.

CCZ: Coeficiente de consumo de la zona.

NNZ: Número de nodos de la zona.

CS: Caudal de consumo del sector.

CDR: Caudal disponible en la red.

Expresar el coeficiente de consumo de los nodos como una función del caudal del sector permite calibrar el modelo en una primera fase, (macro calibración) mediante la variación de los consumos por sector.

Toma de medidas de presión y caudal

Este macromodelo se encuentra en una primera etapa de desarrollo en cuanto a la elaboración de un modelo estático, considerando un estado de regulación del sistema bajo la condición de Válvula Obelisco abierta. Esta condición de operación ocurre durante toda la semana a excepción de los días lunes, miércoles y viernes, desde las 3:00 p.m. hasta la 6:00 am del día siguiente, es decir la válvula se cierra a las 3:00 p.m. para abrirla nuevamente a las 6:00 a.m. del día siguiente.

Con respecto a la medición de caudal, se tienen como datos del sistema, los caudales de entrada a la red, y los consumos que van a los rebombes.

Por otro lado, para realizar la medición de presión se selecciono un número de nodos equivalentes al 20% del total del sistema, según recomendación bibliográfica 3. La ubicación de estos nodos fue definida de común acuerdo con la parte operativa de la empresa. Los datos de medición de presión, se tomaron para un período de tres meses, desde Agosto

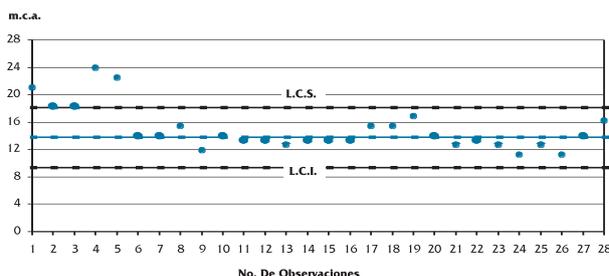


Figura 4. Registros de Presión. La Consolidada. Aguas Arriba.

hasta Octubre de 2000. Para la depuración de esta data, se utilizó un estudio estadístico de los parámetros: media y varianza para cada punto de medición, ver Figura N° 4; excluyendo los datos que estaban fuera de un rango de varianza de $\pm 3\sigma$. Para realizar las mediciones se utilizaron manómetros tipo Bourdon con una apreciación de un psi.

Posteriormente, se estudió el comportamiento de cada punto de medición, lo que permitió seleccionar los días martes y jueves para el estudio del comportamiento de válvula obelisco abierta; al realizar esta depuración mejoró el comportamiento de los puntos de medición, y se procedió a seleccionar el día 20 de Septiembre para los datos de ajuste del modelo, en función de la garantía del estado de operación (caudal de suministro y de rebombado); y máximo número de puntos de medición.

Ajuste del modelo

El criterio seguido para realizar la macrocalibración del modelo fue el de comparar el promedio de presiones simulado para cada sector con el promedio de presiones medido en campo para ese mismo sector. Por otra parte, se estableció un error máximo de 2 m.c.a. entre los valores antes mencionados. Este valor de error se basa en el hecho de que la información topográfica no guarda una precisión muy elevada ya que fue extraída de un vuelo en una escala de 1:5.000.

El procedimiento seguido durante la macrocalibración del modelo fue el siguiente:

Se diseñó una hoja de cálculo en la cual se relaciona el consumo en los nodos con el caudal de consumo del sector. A su vez, dicho caudal depende de un porcentaje. Este porcentaje representa la variable a ser modificada durante esta fase de calibración.

Se diseñó un documento vinculado con la hoja de cálculo, de manera que cualquier modificación realizada en los nodos de consumo a través de la hoja de cálculo sea inmediatamente actualizada en el documento. Este documento se transforma luego en un archivo .INP con un nuevo nombre para ser leído por el EPANET, de esta forma se mantiene el archivo vinculado.

Luego de crear el archivo .INP se hace la corrida del EPANET.

Desde el EPANET se genera una tabla con las presiones de todos los puntos.

Esta información se pasa a la hoja de cálculo a través del portapapeles (Comandos Copiar y Pegar).

En la misma hoja de cálculo se representan gráficamente las presiones de aquellos nodos que son monitoreados en campo, (presiones medidas en la red) y las presiones obtenidas del EPANET, se grafican también los promedios de los dos conjuntos de datos. Esto da como resultado un gráfico para cada sector. La Figura N° 5 muestra la comparación de presiones en el sector Este.

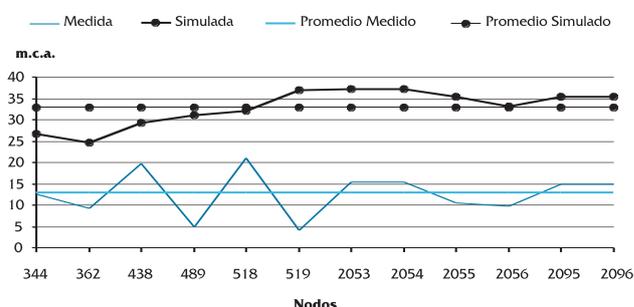


Figura 5. Gráfico de comparación de Presiones. Sector Este.

Se representa la diferencia de promedios para todos los sectores, dando como resultado el del gráfico mostrado en la Figura N° 6.

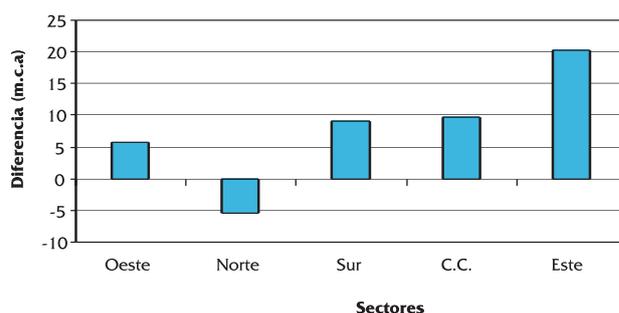


Figura 6. Gráfico de la diferencia del Promedio de Presiones

Como puede observarse en la Fig. N° 6, el error varía entre 5 y 20 m.c.a., resultado que se repite para cualquier combinación de consumos por sectores, por lo que fue necesario redistribuir los nodos de consumo, considerando una distribución más uniforme de los mismos y una menor superficie abastecida por cada nodo, con el fin de lograr la macrocalibración. Los resultados

DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA PARA ESTIMAR LOS CONSUMOS DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE DE BARQUISIMETO, VENEZUELA

finales de porcentajes de consumo por cada sector y la distribución de consumos por nodo, se muestran en las Tablas N° 4 y N° 5 respectivamente.

Tabla 4. Consumo por sector

Sector	Porcentaje de Caudal Total	Consumo lps
Oeste	19	481,61
Norte	5	114,64
Casco Central	31	766,97
Sur	15	364,25
Este	30	753,82
Caudal Total Consumido		2481,29

Tabla 5. Distribución final de caudales

Nudo	Demanda (l/s)	Nudo	Demanda (l/s)
2	4,75	451	97,86
7	4,75	453	97,86
17	4,78	472	97,86
32	2,49	488	33,10
40	4,43	518	97,86
44	4,43	526	97,86
148	16,08	530	97,86
155	16,08	652	30,69
158	16,08	661	16,03
167	37,41	662	16,03
173	37,41	663	37,41
207	24,12	694	16,03
227	6,07	790	24,12
240	24,89	808	24,07
241	16,03	830	52,88
259	6,07	832	52,93
267	6,09	835	16,03
273	6,09	993	52,93
268	36,16	996	17,56
292	36,16	1026	47,74
323	53,29	1028	24,12
324	53,29	1032	24,12
354	97,86	1034	24,12
372	76,82	1080	72,91
382	52,88	1100	62,17
390	52,93	1115	42,74
403	20,80	2031	52,56
405	33,86	2040	24,12
413	24,25	2050	52,56
420	72,91	2064	80,35
425	1,00	2066	20,80
436	107,90	3005	52,93

En las Figuras N° 7 a N° 11 se muestran los valores de las presiones medidas y simuladas así como también el promedio de cada una de esas presiones para los diferentes sectores.

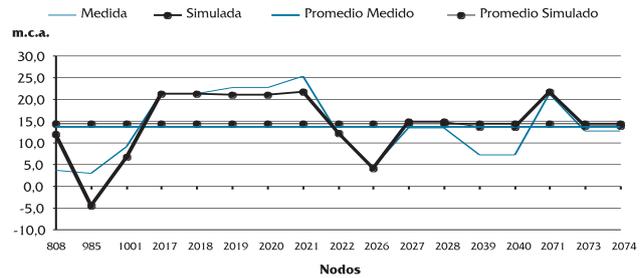


Figura 7. Curva comparativa de presiones. Sector Oeste.

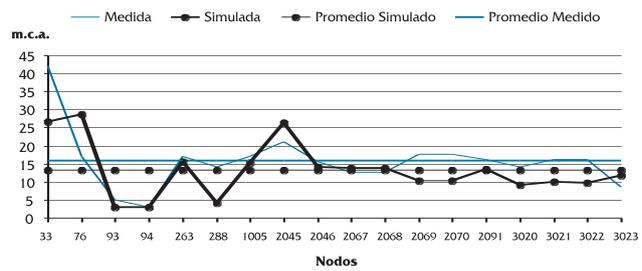


Figura 8. Curva comparativa de presiones. Sector Norte.

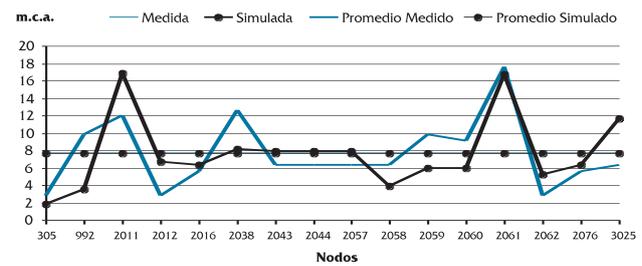


Figura 9. Curva comparativa de presiones. Sector Sur.

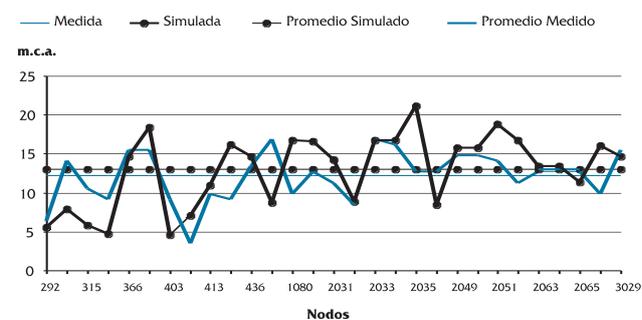


Figura 10. Curva comparativa de presiones. Sector Casco Central.

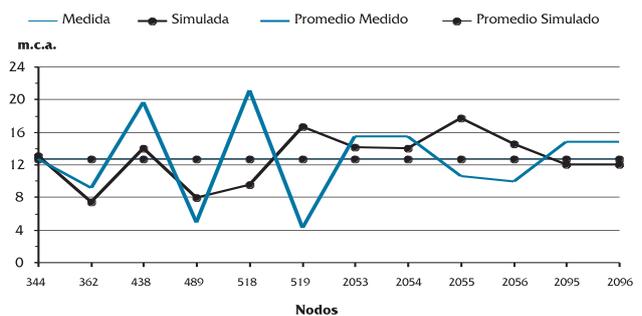


Figura 11. Curva comparativa de presiones. Sector Este.

Por último se muestra en la Figura N° 12, la diferencia entre la presión medida y la presión simulada para cada sector.

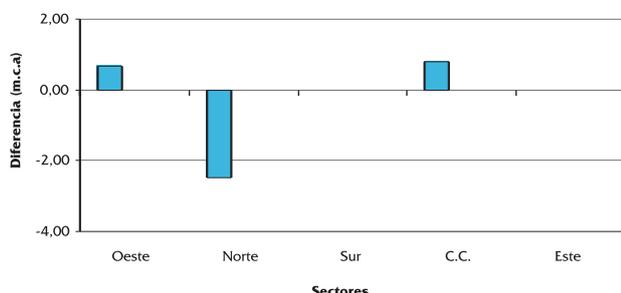


Figura 12. Gráfico de la diferencia del promedio de presiones.

La Macrocalibración concluye cuando la diferencia de los promedios de presión es menor al error establecido (2 m.c.a.), y adicionalmente la distribución por sectores se aproxima a la estimada inicialmente.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en la calibración, se analizaron bajo dos puntos de vista: 1) considerando la variación de presión promedio entre la presión medida y la presión simulada de cada sector; 2) el porcentaje de caudal suministrado a cada sector, tal como se muestra en la Figura N° 6 y en la Tabla N° 4, respectivamente.

De la Figura N° 12 se observa que la variación de presión promedio es menor de 2 m.c.a., con lo cual se logra el criterio establecido entre la diferencia de las presiones medidas y simuladas. Este análisis se hace considerando el comportamiento global del sector, sin embargo, si consideramos el comportamiento puntual en cada nodo de presión para cada sector se obtiene el resultado que se muestra en la Tabla N° 6:

Tabla 6. Nodos fuera de rango. Error: 3 m.c.a.

RESUMEN		
Sector	Nodos fuera de rango	% fuera de rango
Oeste	5	29,41%
Norte	10	55,56%
Casco Central	14	48,28%
Sur	7	43,75%
Este	6	50,00%
Global	42	45,65%

La distribución de caudal que se muestra en la Tabla N° 4, satisface el criterio de la variación de presiones promedio establecido; sin embargo, el resultado que se observa en algunos sectores, como por ejemplo el sector Norte, no es representativo, ya que, no se puede considerar cierto que sólo se distribuye el 5% del caudal total disponible, en un sector donde está ubicada la Zona Industrial de la ciudad.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La metodología planteada sirve para realizar una calibración macro del modelo de la red de distribución de la ciudad de Barquisimeto.

La calibración logra variaciones de presiones promedio menores a 2 m.c.a.

Se debe verificar el porcentaje de distribución de caudal a cada sector, para constatar los valores obtenidos en la simulación.

Se recomienda hacer un estudio sectorizado de la red, donde se puede registrar el caudal a distribuir en el sector.

Se recomienda iniciar este estudio en el sector Este de la ciudad.

En vista de los resultados obtenidos de distribución de caudal en cada sector, después de haber hecho una primera fase de calibración, surge la propuesta de realizar un estudio por sectores, en donde se pueda cuantificar el consumo global de éste, el cual permita comparar los resultados obtenidos a través de la simulación con datos reales y que permita lograr una mejor calibración. En vista de que, la ciudad de Barquisimeto se encuentra dividida en cinco sectores, la medición debe realizarse en varias etapas y se propone comenzar por el sector Este.

Se recomienda empezar por el sector Este, ya que ofrece las siguientes ventajas:

Este sector de la red se encuentra totalmente presurizado.

Se puede aislar con facilidad, ya que, únicamente es necesario realizar mediciones en los acueductos de entrada al sector.

Se puede aprovechar la información de consumos a través de los micro-medidores ya instalados.

LISTA DE SIMBOLOS

A_{cpz}	Área Corregida por Zona.
A_{gz}	Área Geométrica de la Zona.
CCN	Coefficiente de consumo por nodo.
CCZ	Coefficiente de Consumo por zona.
Cdp	Coefficiente de densidad poblacional.
CDR	Caudal disponible en la red.
CS	Caudal de consumo del sector.
NNZ	Número de nodos por zona.
L.C.I.	Límite de control inferior.
L.C.S.	Límite de control superior.
σ	Desviación estandar.

AGRADECIMIENTO

Los autores desean agradecer a HIDROLARA C.A., empresa hidrológica del Estado Lara, Venezuela, por el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- 1 LEWIS R. *Epanet Manual Users*. Junio 2000. Water Supply and Water Resources Division. National Risk Management Laboratory. Environmental Protection Agency.
- 2 VELA A. AYZA M. VIDAL R. *Aplicación y Utilización de Modelos*. Ingeniería Hidráulica Aplicada a los Sistemas de Distribución de Agua. Vol II. Págs 795-833. 1996. Universidad Politécnica de Valencia.
- 3 LÓPEZ G., FUENTES M., AYZA M. *Modelización Matemática de una Red en Funcionamiento*. Ingeniería Hidráulica Aplicada a los Sistemas de Distribución de Agua. Vol II. Págs 729-777. 1996. Universidad Politécnica de Valencia.
- 4 MARTÍNEZ F., SIGNES M., SAVALL R., ANDRÉS M., PONZ R. and CONEJOS P. *Construcción and Use of a Dynamic Simulation Model for the Valencia Metropolitan Water Supply and Distribution Network*.
- 5 MARTINEZ J., FUENTES V., PEREZ R. *Cálculo Hidráulico de Tuberías*. Ingeniería Hidráulica Aplicada a los Sistemas de Distribución de Agua. Vol I. Pág 99. 1996. Universidad Politécnica de Valencia.
- 6 TCHOBANOGLIOUS G. *Ingeniería de Aguas Residuales. Redes de Alcatarillado y Bombeo*. Mc Graw – Hill. 1995.
- 7 BOLINAGA J. *Proyectos de Ingeniería Hidráulica*. Vol. 2. 1.999. Fundación Polar.