

Modelo del sistema de distribución de aguas blancas en la ciudad de Mérida

Model of Mérida city's water supply system

Peña, Eloy¹; Ablan, Magdiel²; Ramírez, Vicente^{1,2*} y Márquez, Renny¹

¹Escuela de Ingeniería de Sistemas. Facultad de Ingeniería. ULA

²Centro de Simulación y Modelos (CESIMO) Facultad de Ingeniería. ULA

Mérida 5101, Venezuela

*vicente@ula.ve

Recibido: 21-10-2008

Revisado: 02-10-2009

Resumen

Este artículo presenta un modelo de simulación del sistema de distribución de aguas blancas de la ciudad de Mérida, utilizando la metodología de Dinámica de Sistemas. Los valores de los parámetros del sistema: tasas de producción de agua, niveles de suministro y almacenamiento en los tanques, consumo y pérdidas fueron estimados a través de entrevistas con el personal involucrado y la documentación proporcionada por la empresa regional de prestación del servicio de agua, Aguas de Mérida. La validación del modelo se llevó a cabo mediante su aprobación por personal experto en la materia. El modelo resultante permite estudiar el impacto de variaciones en los niveles de producción de agua y en la demanda sobre el abastecimiento a la población medido como el nivel total de agua en el sistema y el número y duración de las políticas de racionamiento. Se evaluaron algunos escenarios cuyos resultados podrían ser de interés para la empresa Aguas de Mérida, para impulsar políticas en pro de un uso más racional del agua, y a su vez, prestar un mejor servicio a la población.

Palabras clave: Modelado, simulación, sistema de distribución de agua, dinámica de sistemas.

Abstract

This article presents a simulation model of Mérida city's water supply system, utilizing Systems Dynamics methodology. System parameters such as rates of water production, tanks input flow and storage level, consumption and losses were estimated by interviews with specialized personnel and by studying the documentation provided by the regional water supply company, Aguas de Mérida. Model validation was accomplished by means of experts on the subject. The model allows to study the impact of variations on water production levels and demand over the water supply system measured as total water storage and number and duration of service interruptions. Several scenarios were evaluated that could be use for Aguas de Mérida to develop policies that support a more rational use of water and an improvement of the service.

Key words: Modeling, simulation, water supply system, system dynamics.

1 Introducción

El agua es un recurso esencial para la vida, limitado y con una demanda creciente. Conocer cómo es la dinámica en torno a la producción, distribución y consumo de tan preciado recurso ayuda a la definición de políticas que permitan mejorar su uso y preservación. La Dinámica de Sistemas (Forrester, 1961; Ford, 1999; Serman, 2000) es una metodología de simulación muy útil al estudiar la dinámica de este tipo de sistemas. Utilizando esta metodología, se han desarrollado modelos de la planeación de recursos

hídricos (Huerta, 2007), y de la conducción de agua para riego (Manz, 2007), entre otros.

El sistema de distribución de aguas blancas de la ciudad de Mérida cuenta con tres fuentes naturales de suministro de agua: El río Mucujún, el río Albarregas y la quebrada La Cuesta. Estas fuentes superficiales tienen una capacidad limitada de producción de agua, con tendencia a la disminución de su cantidad y calidad, debido a situaciones ambientales y urbanas, tanto locales como globales, tales como la contaminación de ríos y quebradas por desarrollos urbanos y ampliación de las fronteras agrícolas, deforestación y

cambio climático, entre otros entre otras.

Además, el acueducto posee plantas de potabilización con una capacidad de producción de aprox. 1200 l/s, una batería de tanques de almacenamiento ubicados en diversos sitios estratégicos de la ciudad, y una amplia red de distribución con válvulas de sectorización que controlan el funcionamiento del abastecimiento de agua potable. Este acueducto pareciera estar llegando al límite de su capacidad de funcionamiento eficiente; la ciudad ha crecido y lo continúa haciendo, demandando mayores volúmenes de agua para consumo humano. Así, surge la inquietud de elaborar un modelo de simulación para entender lo que sucede en el sistema de distribución de aguas blancas de la ciudad de Mérida y cuál sería su comportamiento ante distintos escenarios. Dicho modelo podría ser de utilidad para la empresa Aguas de Mérida¹ pues le permitiría establecer políticas de mejoramiento del servicio.

El objetivo propuesto fue elaborar un modelo de simulación del sistema de distribución de aguas blancas de la ciudad de Mérida, utilizando Dinámica de Sistemas. En particular se planteó: a) Estudiar el sistema de distribución de aguas blancas de la ciudad de Mérida (sistema real); b) Diseñar un modelo de simulación a partir de lo observado en el sistema real; c) Implantar y validar el modelo en Dinámica de Sistemas; y d) Evaluar escenarios que permitan establecer políticas de mejoramiento del servicio.

La metodología utilizada es la propuesta por (Forrester, 1961 y Sterman, 2000), para la elaboración de modelos de simulación continua: 1) se recolectó información sobre el funcionamiento del sistema de distribución de aguas blancas de la ciudad de Mérida a través de entrevistas a los trabajadores de Aguas de Mérida CA, documentación existente y observación directa. El producto en este paso fue la descripción de lo que en la literatura de Dinámica de Sistemas se conoce como el sistema real. 2) Se construyó un modelo de simulación a partir de la descripción del sistema real. La herramienta utilizada fue el Vensim (Ventana, 2007), programa de simulación que sirve para construir la estructura del modelo y visualizar la dinámica generada por dicha estructura. 3) Se recolectaron los datos de los parámetros necesarios para el ajuste del modelo. 4) Se validó el modelo con la ayuda de los trabajadores de la empresa. 5) Se realizó el análisis de sensibilidad para estudiar cómo se comporta el modelo ante cambios en las variables y parámetros que rigen su comportamiento. 6) Se analizaron diferentes escenarios.

Este artículo se estructura de la siguiente manera: En la sección 2 se describe el sistema real. El modelo, que comprende la estructura (ecuaciones) y las relaciones entre las variables (diagrama de flujo de niveles y tasas) se presenta en la sección 3. En la sección 4 se describen los resul-

tados de las simulaciones que incluyen la simulación base, la validación y verificación del modelo y el análisis de sensibilidad. En la sección 5 se discuten algunos escenarios. Por último, en la sección 6, se presentan las notas finales

2 Sistema real

Según (Mays, 2002), el esquema general de un sistema de distribución de agua consiste en la obtención de suministro de una fuente, tratarla hasta obtener una calidad aceptable y posteriormente entregarla a los consumidores, a través de una red de tuberías interconectadas, depósitos de almacenaje e instalaciones de bombeo. La demanda per cápita varía dependiendo de la ubicación geográfica, clima, extensión de la industrialización y otros factores propios de cada localidad. Para satisfacer la demanda se prefieren los depósitos de almacenamiento pues generalmente son menos costosos y más fáciles de operar que las instalaciones.

2.1 Sistema de distribución de agua de Mérida

(Tahal, 1998), define el sistema de distribución de agua del acueducto de Mérida como el conjunto de todos los elementos que permiten que el agua tratada por las plantas potabilizadoras Dr. Eduardo Jáuregui y Dr. Enrique Bourgoïn sea llevada hasta cada usuario. Está compuesto por los tanques de almacenamiento, dispuestos en las diferentes zonas de consumo y por la red de distribución, conformada por tuberías de mayor diámetro que alimentan grandes zonas y tuberías de pequeño diámetro de donde se conectan las tomas domiciliarias. La Fig. 1 muestra un esquema de la red.

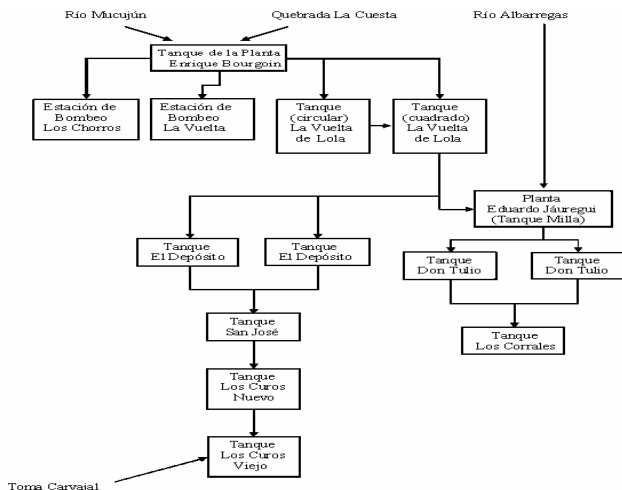


Fig. 1. Esquema de la red de distribución de agua de la ciudad de Mérida

La red de distribución de la ciudad de Mérida nace en los tanques La Vuelta a cota 1770 msnm y termina en la La Mara a cota de 1220 msnm. El agua proveniente del río Albarregas es tratada en la planta potabilizadora Jáuregui,

¹ Aguas de Mérida C.A. es la empresa regional, creada en 1998, para "garantizar la prestación material, directa, continua, eficaz y con regularidad, del servicio de abastecimiento de agua potable y de recolección, tratamiento y disposición de aguas residuales en el Estado Mérida, con plena autonomía de gestión administrativa y técnica" (Aguas de Mérida, 2007).

ubicada en la Hoyada de Milla, a cota 1702 msnm. La planta fue construida en 1943 y en la actualidad está tratando aprox. 300 l/s. El agua procedente del río Mucujún y la quebrada La Cuesta es potabilizada en la planta Bourgoin, ubicada en El Vallecito a cota 1812 msnm. La planta fue construida en 1973 y opera actualmente con un caudal aprox. de 900 l/s. La red incluye también el acueducto rural de Los Curos, cuya fuente de captación es la toma Carvajal, la alimentación es por gravedad y consta de una tubería de 2250 m. La capacidad de conducción de ésta supera los 30 l/s que como máximo se captan en la toma. El agua del acueducto rural recibe tratamiento en el mismo tanque de distribución (Tahal, 1998).

El sistema así descrito no incluye todos los sectores de la ciudad. Algunos sectores son surtidos por acueductos rurales locales o no se encuentran conectados al sistema automático que monitorea la red de distribución. Este es el caso, por ejemplo, del sector la Pedregosa.

2.2 Elementos que conforman el sistema: tanques y estaciones de bombeo

- Tanque Bourgoin: con capacidad de 1440 m³, se conecta con los tanques de la Vuelta de Lola. Almacena el agua proveniente de la planta de potabilización Bourgoin (también conocida como Planta Nueva).
- Los tanques de La Vuelta de Lola: dos tanques, uno de sección cuadrada con capacidad de 600 m³ y otro de sección circular con capacidad de 1200 m³. Se alimentan de Planta Nueva; antes de que la tubería entre al predio existe una derivación a cada estación de bombeo. El tanque de sección circular es sólo de transición, ya que opera para alimentar al tanque cuadrado. La salida suministra agua a la población y es fuente de distribución principal para los tanques El Depósito y Milla.
- Estaciones de bombeo Los Chorros y Vuelta de Lola: cada estación de bombeo se alimenta de una derivación de la tubería proveniente de Planta Nueva, antes de que la tubería entre al predio de los tanques de La Vuelta de Lola.
- El tanque Milla: con una capacidad de 4300 m³, es el depósito de agua filtrada de la Planta Jáuregui (también conocida como Planta Vieja); recibe también aporte desde La Vuelta de Lola. Es el tanque más antiguo del sistema. La salida del tanque se convierte en el alimentador principal del casco central de la ciudad de Mérida y en la distribución a los tanques Don Tulio.
- Los tanques Don Tulio: dos tanques cilíndricos, con capacidades de 2700 m³ y 2500 m³, localizados en la Av. Don Tulio y calle 36. Su alimentación proviene de Planta Vieja, a través de dos ramales del mismo diámetro, uno para cada tanque. Ambas salidas se conectan para unirse al alimentador de la Av. Don Tulio y va en parte al tanque Los Corrales y en parte a satisfacer a la población.
- El tanque Los Corrales: localizado en la Urb. Los Corrales; con capacidad de 2000 m³. Se alimenta del tanque Don Tu-

lio. La salida sólo va dirigida al consumo de la población.

- Los tanques El Depósito: dos tanques cilíndricos, con capacidades de 1700 m³ y 1800 m³, ubicados a una misma altura, en la Av. Los Próceres en las cercanías del Parque La Isla. La alimentación proviene de La Vuelta de Lola. Funcionan como uno solo ya que tienen conectadas las entradas y las salidas. El caudal de entrada, y por consiguiente el nivel en el tanque y el servicio en la zona abastecida, es comandado por la abertura de la válvula reguladora de caudal en la entrada de planta vieja desde la Vuelta. En ciclos, que se repiten varias veces por día, se cierra la entrada a planta vieja de manera que todo el caudal que sale de La Vuelta ingresa a estos tanques hasta que alcanzan un nivel considerable. Al abrir la entrada a Planta Vieja disminuyen su nivel pues el caudal es mermado. La salida va en parte al tanque San José y en parte a la población.
- El tanque San José: cilíndrico, con una capacidad de 2000 m³, localizado en la Av. Los Próceres a la altura de la Urb. San José. La entrada y la salida están conectadas al alimentador principal que corre por dicha avenida. Su alimentación proviene de los tanques El Depósito. La salida va al tanque Los Curos Nuevo y a satisfacer a la población.
- El tanque Los Curos Nuevo: cilíndrico, con una capacidad de 1200 m³. Su alimentación proviene del tanque San José y su salida se convierte en una parte del suministro al tanque Los Curos Viejo: suministra a la población.
- El tanque Los Curos Viejo: cilíndrico, con una capacidad de 1250 m³, localizado en la zona alta del sector Los Curos. Su entrada proviene del tanque Los Curos Nuevo y a la toma Carvajal. La salida sólo va dirigida al consumo de la población.

El sistema de distribución presenta una estructura tipo ramificada (Mays, 2002), con lo cual, cuando la tubería se rompe la solución es el corte del servicio, dejando sin suministro a los usuarios directos de ese tanque y a los tanques dependientes. De igual forma, cuando se realiza mantenimiento se corta el servicio.

Si existen dos tanques en un mismo lugar, caso de los tanques Don Tulio y El Depósito, se mantiene en operación sólo uno de ellos.

2.3 Monitoreo de la red de distribución

La red es monitoreada a través de un sistema SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*). Con este sistema el operador puede observar los niveles de agua de cada tanque y, en base a éstos, manipular la abertura de las válvulas de entrada y salida de cada uno. Las válvulas tienen dos estados (*ON/OFF*); la abertura está dada por las válvulas reductoras de presión de los caudales, ajustadas mensualmente por los técnicos. Si el sensor de un tanque está dañado el nivel del agua de dicho tanque es reportado por un trabajador, quien se comunica con el operador del sistema para aplicar las acciones necesarias. El sistema SCADA

no arroja información acerca del caudal de agua que sale de los diferentes tanques, sólo se conocen los caudales de entrada.

Las estaciones de bombeo Los Chorros y Vuelta de Lola no poseen tanque de almacenamiento. El agua suministrada para dichos sectores de la población es fija. Cada una opera con su propia bomba; en la estación Los Chorros se activa una segunda bomba en las horas pico (de 6 am a 8 am, de 11 am a 2 pm, y de 6 pm a 8 pm).

2.4 Trabajadores

El equipo de trabajo de la sala de control está integrado por un ingeniero, quien labora de lunes a viernes de 8 a 12 am y de 2 a 6 pm; y un operador de turno, quien trabaja por un periodo de ocho horas de manera ininterrumpida. Hay cinco operadores, quienes se alternan de lunes a domingo.

2.5 Políticas para establecer el estado de una válvula

En general y en funcionamiento normal, todas las válvulas se encuentran abiertas, permitiendo el flujo a la población y la alimentación entre tanques. Las válvulas se controlan automáticamente a través de sensores. Se cierran cuando el tanque alcanza su valor máximo y se abren cuando el nivel desciende un valor prefijado. El cierre se realiza para evitar reboses. Por sus características particulares algunos de los tanques se manejan de forma diferente, los cuales se describen con detalle a continuación.

La válvula de conexión entre los tanques Los Curos Nuevo y Los Curos Viejo se encuentra abierta si Los Curos Viejo tiene un *nivel bajo*, es decir, el suministro del acueducto rural no es suficiente para abastecer a la población y necesita suministro adicional, que podría ser el proveniente del tanque Los Curos Nuevo, siempre y cuando éste tenga un *buen nivel* de agua, de lo contrario la válvula permanecerá cerrada. Si Los Curos Nuevo tiene *buen nivel* y se decide alimentar al tanque Los Curos Viejo, esta válvula permanecerá abierta mientras Los Curos Viejo alcanza un *buen nivel* o hasta que Los Curos Nuevo descienda hasta un cierto *nivel mínimo*, ya que no se puede disponer de toda la cantidad almacenada allí para alimentar al otro tanque, pues debe tener cierta reserva de agua para responder ante cambios bruscos en la demanda. Los valores *nivel bajo*, *buen nivel* o *nivel mínimo* de agua varían según el operador, ya que cada uno de ellos tiene una percepción distinta de los factores que se deben tomar en cuenta para tomar una decisión, como la hora, el estado general del sistema o la estimación de los niveles según lo aprendido (pues ha funcionado anteriormente).

Las válvulas de conexión entre los tanques La Vuelta – Depósito y La Vuelta – Milla se encuentran abiertas si Depósito y Milla mantienen un *nivel normal*. Si Milla presenta un *nivel bajo* y Depósito mantiene un *nivel normal*, la válvula de conexión La Vuelta - Depósito se cierra, incremen-

tándose el flujo de entrada al Milla. Dicha válvula permanecerá cerrada hasta que Milla alcance un *nivel normal* o hasta que Depósito disminuya a un *nivel mínimo*. De manera similar ocurre si Depósito presenta un *nivel bajo*. Si ambos tanques presentan un *nivel bajo* se favorece al tanque que se sacrificó la última vez que se presentó esta situación ó se beneficia al tanque Depósito, pues el suministro proveniente de La Vuelta es su única fuente de abastecimiento, a diferencia del tanque Milla, que siempre recibe agua de Planta Vieja.

Por otra parte, la condición del sistema en términos de suministro puede ser crítica, regular o buena, dependiendo de la totalidad de agua en un instante de tiempo dado (suma de lo almacenado en todos los tanques). Será crítica si el total de agua es menor a 5.000 m³, regular si es menor a 11.000 m³, y buena cuando supera este último valor. La política de racionamiento se aplica cuando la condición del sistema es crítica y consiste en el cierre de las válvulas de salida de los tanques Don Tulio, Los Corrales, San José y Los Curos Nuevo, que permanecerán cerradas hasta que el sistema supere los 11.000 m³.

La pérdida de agua es la diferencia entre el agua tratada y la facturada (agua no contabilizada). Se debe a:

- Errores de medición: exactitud de los macromedidores (en las plantas de tratamiento) y los micromedidores (en las tomas domiciliarias).
- Pérdidas por facturación: usuarios clandestinos y error en la estimación del consumo de clientes sin medidor. Se estima que el exceso de consumo es de un 60% con respecto al valor facturado (Tahal, 1998).
- Pérdidas físicas: debido a roturas en las tuberías.

3 Modelo propuesto

El modelo abarca desde el suministro de agua proveniente de las plantas potabilizadoras y la toma Carvajal, hasta el consumo por parte de los usuarios de los distintos tanques, la alimentación entre tanques y la toma de decisiones por parte de los operadores al momento de efectuar un cierre de válvula. Los supuestos que se establecieron fueron: a) Los tanques dobles (Depósito, Don Tulio y La Vuelta), se representan en el modelo mediante uno solo, equivalente a la suma de sus capacidades y b) El porcentaje de agua no contabilizada se reparte uniformemente a lo largo de todo el sistema.

3.1 Nomenclatura usada en las ecuaciones del modelo

Para presentar las ecuaciones del modelo se emplea la siguiente nomenclatura: Cada vez que se mencione alguna de las variables del modelo se hace en letra cursiva para diferenciarla del texto. Para identificar los nombres de variables se usan sólo letras minúsculas, en el caso de las variables Nivel su nombre comienza con la primera letra en mayúscula y para las constantes todas las letras son mayúsculas. Siempre que se haga mención a una variable por pri-

mera vez se colocan sus unidades entre paréntesis. Con Dmnl se indica que la variable no tiene dimensión, muy útil en Dinámica de Sistemas para manejar multiplicadores.

3.2 Estructura del modelo

El diagrama de flujo para un tanque con entrada de una fuente se muestra en la Fig. 2. Las ecuaciones 1-3 describen las relaciones entre las variables que representan el suministro a un tanque, donde el nivel Tanque (l) es la cantidad de agua almacenada en un instante determinado, INTEG es la integral de las tasas y un valor inicial expresado por NIVEL DEL TANQUE INICIALMENTE (Ec. 1).

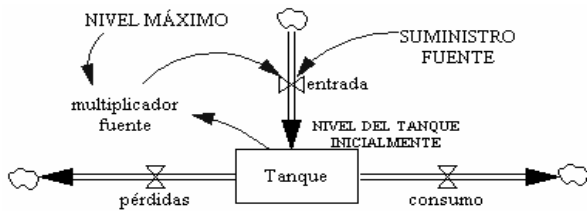


Fig. 2. Estructura que representa un tanque

$$\text{Tanque} = \text{INTEG} (\text{entrada} - \text{consumo} - \text{pérdidas}, \text{NIVEL DEL TANQUE INICIALMENTE}) \quad (1)$$

$$\text{Entrada} = \text{SUMINISTRO FUENTE} * \text{multiplicador fuente} \quad (2)$$

$$\text{multiplicador fuente} = \text{Tanque} / \text{NIVEL MÁXIMO} \quad (3)$$

El flujo entrada (l/min) representa la cantidad de agua que entra al Tanque. El SUMINISTRO FUENTE (l/min) es el valor promedio de producción de la fuente de suministro de agua. El multiplicador fuente (l/min) regula la tasa de producción de la fuente de suministro de agua. El NIVEL MÁXIMO (l) es la cantidad de agua que el Tanque puede almacenar para evitar reboses.

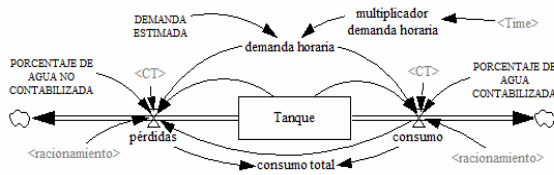


Fig. 3. Salida de un tanque

El diagrama de flujo para la salida de un tanque se muestra en la Fig. 3. Las ecuaciones 4-8 describen dichas relaciones.

$$\text{consumo} = \text{IF Tanque} / \text{CT} > \text{demanda horaria} * \text{PORCENTAJE DE AGUA CONTABILIZADA} \text{ THEN } \text{demanda horaria} * \text{PORCENTAJE DE AGUA CONTABILIZADA} \text{ ELSE } \text{Tanque} / \text{CT} \quad (4)$$

$$\text{demanda horaria} = \text{DEMANDA ESTIMADA} * \text{multiplicador demanda horaria} \quad (5)$$

$$\text{multiplicador demanda horaria} = \text{IF hora pico THEN } 1.2 \text{ ELSE } 1 \quad (6)$$

$$\text{multiplicador demanda horaria} = \text{IF hora pico THEN } 1.2 \text{ ELSE } 1 \quad (6)$$

El flujo consumo (l/min) representa el agua facturada. La constante de tiempo CT (min) permite comparar un Nivel y los distintos flujos que se derivan de éste cada CT unidades de tiempo, sin originar conflicto entre las unidades de dichas variables. La demanda horaria (l/min) representa la cantidad de agua demandada por los consumidores según la hora del día. La DEMANDA ESTIMADA (l/min) es el promedio demandado por los consumidores. El multiplicador demanda horaria (Dmnl) representa la variación en la demanda, aumentándola a 1.2 veces la DEMANDA ESTIMADA durante las horas pico (6 am a 8 am, de 11 am a 2 pm y de 6 pm a 8 pm) a lo largo del día. El PORCENTAJE DE AGUA CONTABILIZADA (Dmnl) se refiere a la facturación mensual.

$$\text{pérdidas} = \text{IF Tanque} / \text{CT} - \text{consumo} > \text{demanda horaria} * \text{PORCENTAJE DE AGUA NO CONTABILIZADA} \text{ THEN } \text{demanda horaria} * \text{PORCENTAJE DE AGUA NO CONTABILIZADA} \text{ ELSE } \text{Tanque} / \text{CT} - \text{consumo} \quad (7)$$

El flujo pérdidas (l/min) representa el agua no facturada. El PORCENTAJE DE AGUA NO CONTABILIZADA (Dmnl) está referido al agua no facturada mensualmente, producto de usuarios clandestinos, error en la estimación del consumo de clientes sin medidor y roturas en las tuberías.

$$\text{consumo total} = \text{consumo} + \text{pérdidas} \quad (8)$$

El consumo total (l/min) corresponde a la cantidad de agua que sale del Tanque.

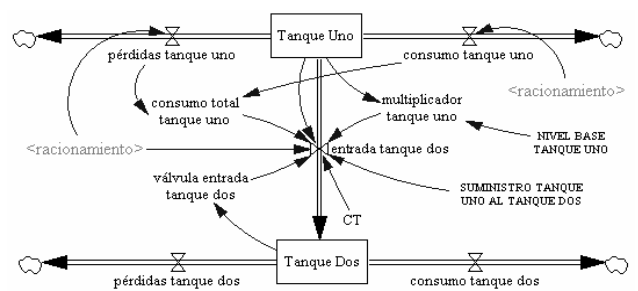


Fig. 4. Alimentación entre tanques

El diagrama de flujo para la alimentación entre tanques se muestra en la Fig. 4. Las ecuaciones 9 y 10 describen las relaciones entre las variables que representan la alimentación entre tanques.

entrada tanque dos = IF válvula de entrada tanque
 dos = -1 THEN 0 ELSE (IF Tanque Uno/CT >
 consumo total tanque uno THEN (IF (Tanque
 Uno/CT - consumo total tanque uno) > SUMINIS-
 TRO
 TANQUE UNO AL TANQUE DOS*multiplicador
 tanque uno THEN
 SUMINISTRO TANQUE UNO AL TANQUE
 DOS*multiplicador
 tanque uno ELSE (Tanque Uno/CT - consumo to-
 tal tanque uno))
 ELSE 0)

multiplicador tanque uno = Tanque Uno / NIVEL
 BASE TANQUE UNO (10)

El flujo entrada tanque dos (l/min) representa la cantidad de agua que entra al Tanque Dos desde el Tanque Uno. La válvula de entrada tanque dos (Dmnl) puede estar cerrada (-1) o abierta (+1). El SUMINISTRO TANQUE UNO AL TANQUE DOS (l/min) es el flujo promedio dirigido hacia el Tanque Dos desde el Tanque Uno. El NIVEL BASE TANQUE UNO (l) es el valor de referencia del tanque alimentador para ajustar la presión. El multiplicador tanque uno (Dmnl) regula el flujo hacia el Tanque Dos; dependiendo del nivel de Tanque Uno. El consumo total tanque uno = consumo tanque uno + pérdidas tanque uno.

Las ecuaciones 4, 7 y 9 se modifican cuando hay racionamiento, es decir, si la variable auxiliar racionamiento = 1 entonces el suministro a la población es cero, en caso contrario, permanecen invariantes. La política de racionamiento se ha modelado usando las ecuaciones 11-14.

racionamiento = IF total de agua en el sistema <
 COTA INFERIOR THEN 1 ELSE (IF salida en el
 instante de tiempo anterior = 0 :AND: total de
 agua en el sistema < COTA SUPERIOR THEN 1
 ELSE -1) (11)

total de agua en el sistema = Tanque Bour-
 goin+Tanque Depósito+Tanque Don Tu-
 lio+Tanque La Vuelta+Tanque Los Corra-
 les+Tanque Los Curos Nuevo+Tanque Los Curos
 Viejo+Tanque Milla+Tanque San José (12)

salida = IF racionamiento = 1 THEN 0 ELSE 1 (13)

salida en el instante de tiempo anterior = DELAY
 FIXED (salida, TIME STEP, -1) (14)

El racionamiento (Dmnl) permite recuperar la cantidad total de agua almacenada en el sistema, mediante el corte del servicio a la población de diferentes sectores. Su valor es 1 (política activa) ó -1 (política inactiva). El total de agua en el sistema (l) corresponde a la cantidad total de agua almacenada en el sistema en un instante de tiempo. COTA INFERIOR (l) y COTA SUPERIOR (l) corresponden a la cantidad mínima y máxima de agua en el sistema para apli-

car la política de racionamiento. La salida (Dmnl) es una variable auxiliar que se utiliza para mantener activa la política de racionamiento, una vez que el total de agua en el sistema ha alcanzado la COTA INFERIOR. La variable salida en el instante de tiempo anterior (Dmnl) es igual al último valor que tomó la variable salida y permite conocer que no está saliendo agua de los tanques que se ven afectados por el racionamiento, y así mantener la política hasta que se alcance la COTA SUPERIOR.

El diagrama de flujo para el suministro a las estaciones de bombeo se muestra en la Fig. 5. Fig. 5 Las ecuaciones 15-17 describen las relaciones entre las variables que representan el suministro a las estaciones de bombeo.

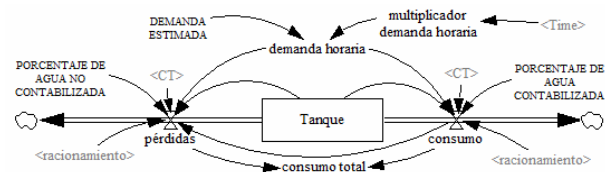


Fig. 5. Suministro a las estaciones de bombeo

bombeo la vuelta = IF Tanque Bourgoin/CT > DE-
 MANDA BOMBEO LA VUELTA THEN DE-
 MANDA BOMBEO LA VUELTA ELSE Tanque Bourgoin/CT (15)

bombeo los chorros = IF (Tanque Bourgoin/CT -
 bombeo la vuelta) > DEMANDA BOMBEO LOS
 CHORROS*multiplicador horario de bombeo los
 chorros THEN DEMANDA BOMBEO LOS CHO-
 RROS*multiplicador horario de bombeo los chorros,
 ELSE (Tanque Bourgoin/CT - bombeo la vuelta) (16)

multiplicador horario de bombeo los chorros = IF
 hora pico THEN 1.66 ELSE 1 (17)

El flujo bombeo los chorros (l/min) representa la cantidad de agua dirigida a los usuarios desde la estación Los Chorros. El flujo bombeo la vuelta (l/min) representa la cantidad de agua dirigida a los usuarios desde la estación La Vuelta. El multiplicador horario de bombeo los chorros (Dmnl) regula el suministro a los usuarios, activando una segunda bomba en las horas pico. La DEMANDA BOMBEO LA VUELTA (l/min) y la DEMANDA BOMBEO LOS CHORROS (l/min) representan los valores promedio demandados por los usuarios de las respectivas estaciones de bombeo.

Finalmente, el diagrama de flujo para el estado de la válvula de entrada de un tanque (abierto o cerrado) se muestra en la Fig. 6. Las ecuaciones 18-20 describen las relaciones entre las variables que representan el estado de la válvula de entrada de un Tanque.

válvula de entrada = IF Tanque > NIVEL MAXIMO
 THEN -1 ELSE (IF entrada anterior del tanque = 0
 :AND: Tanque > NIVEL PARA REACTIVAR LA
 ENTRADA THEN -1 ELSE 1) (18)

entrada aux = IF válvula de entrada = -1 THEN 0 (19)

ELSE 1

$$\text{entrada anterior del tanque} = \text{DELAY FIXED}(\text{entrada aux, TIME STEP, -1}) \quad (20)$$

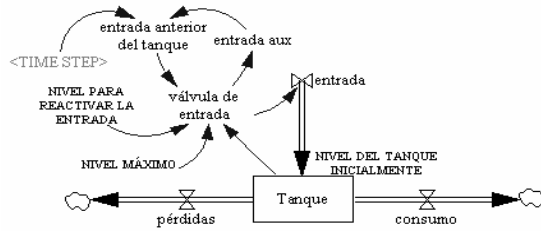


Fig. 6. Estado de la válvula de entrada de un tanque

El valor de válvula de entrada será igual a -1 (cerrado) si el nivel del Tanque es mayor que NIVEL MAXIMO, y mantendrá este valor hasta que el tanque descienda al NI-

VEL PARA REACTIVAR LA ENTRADA. De no haber alcanzado el NIVEL MAXIMO el valor de válvula de entrada será igual a 1 (abierto). El NIVEL PARA REACTIVAR LA ENTRADA (I) es el valor al cual debe descender el Tanque una vez que ha alcanzado el nivel máximo. La entrada aux (Dmnl) es una variable auxiliar que se utiliza para mantener cerrada la válvula de entrada, hasta que el Tanque alcance el NIVEL PARA REACTIVAR LA ENTRADA. La variable entrada anterior del tanque (Dmnl) es igual al último valor que tomó la variable entrada aux.

El modelo se completa con varios submodelos o vistas e incluye también una interfaz que les permite a los usuarios no experimentados manipularlo más fácilmente.

La Fig. 7 muestra una vista de modelo. Por razones de espacio no se muestran todas. Los detalles sobre el modelo pueden ser consultados en (Peña, 2008).

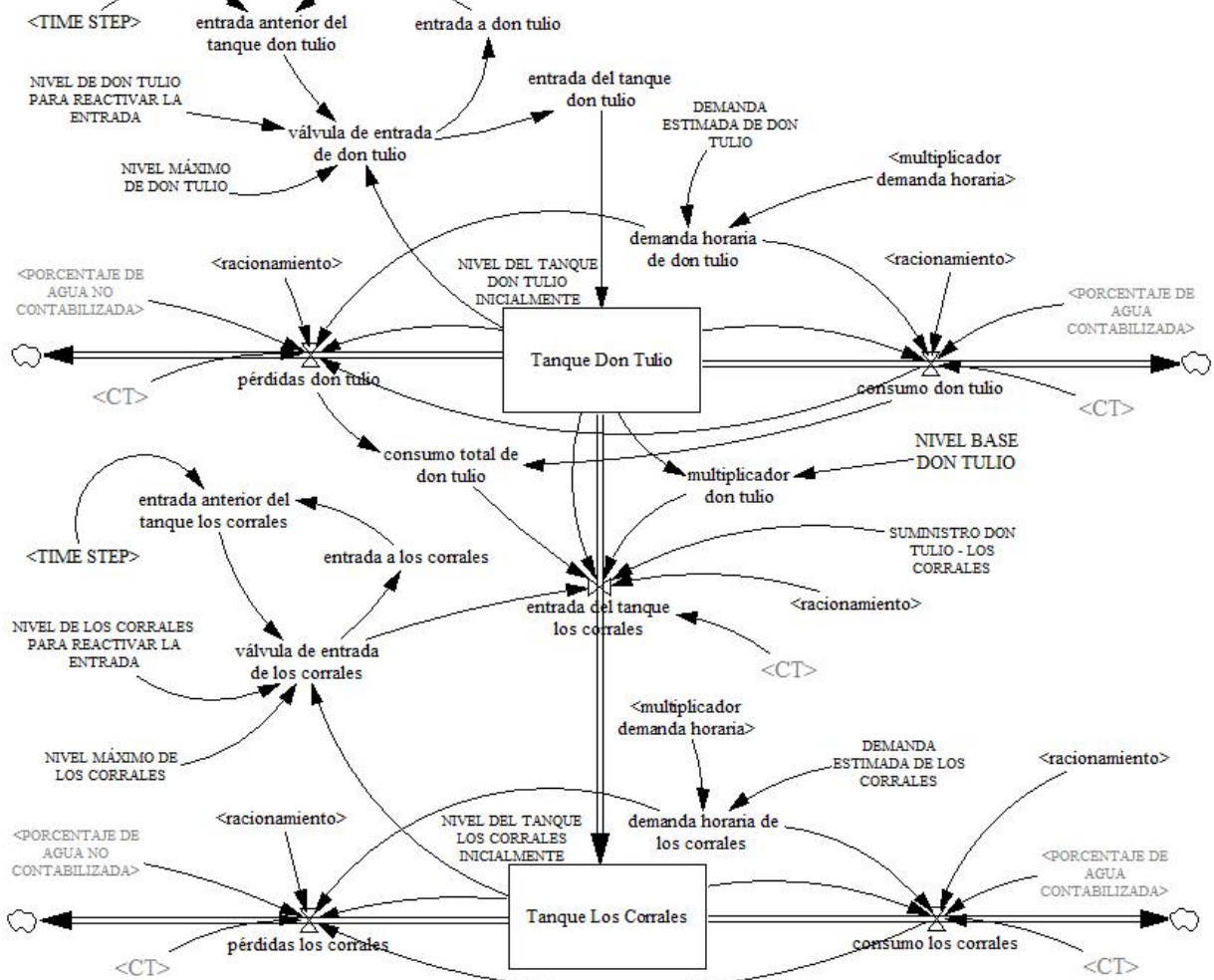


Fig. 7. Una vista del modelo

3.3 Estimación de parámetros

Desafortunadamente, la mayoría de los sensores que almacenan el valor del flujo de entrada, del sistema SCADA, están fuera de servicio, lo que hace imposible la estimación del consumo mediante el valor del flujo de entrada y la variación del nivel del tanque. Por tal motivo, los valores de los parámetros fueron asignados de acuerdo a la experiencia de los operadores, posteriormente validados por el ingeniero.

Tabla 1. Estimación de la demanda

Elemento del Sistema	Demanda	
	l/s	l/min
Bombeo La Vuelta	12	720
Bombeo Los Chorros	60	3600
Tanque La Vuelta	90	5400
Tanque Milla	280	16800
Tanque Depósito	220	13200
Tanque Don Tulio	135	8100
Tanque Los Corrales	120	7200
Tanque San José	140	8400
Tanque Los Curos Nuevo	40	2400
Tanque Los Curos Viejo	40	2400

La demanda y el suministro fueron estimados en l/s ya que los operadores están familiarizados con esta unidad, y transformados a l/min, unidad utilizada en el modelo. La tabla 1 muestra la demanda estimada para cada uno de los elementos del sistema.

Tabla 2. Estimación de los suministros

Fuente	Suministro	
	l/s	l/min
Planta Nueva	900	54000
Planta Vieja	280	16800
Toma Carvajal	33	1980
De Tanque Bourgoin a Tanque La Vuelta	820	49200
De Tanque La Vuelta a Tanque Milla	310	18600
De Tanque La Vuelta a Tanque Depósito	430	25800
De Tanque Milla a Tanque Don Tulio	280	16800
De Tanque Don Tulio a Tanque Los Corrales	130	7800
De Tanque Depósito a Tanque San José	220	13200
De Tanque San José a Tanque Los Curos Nuevo	60	3600
De Tan. Los Curos Nuevo a Tan. Los Curos Viejo	65	3900

La tabla 2 muestra los suministros provenientes de las plantas potabilizadoras y la toma Carvajal así como el suministro estimado entre los tanques que conforman la red de distribución de agua. La tabla 3 muestra el nivel máximo para cerrar la válvula de entrada con el fin de evitar reboses, el nivel mínimo al cual debe descender cada tanque para reactivar la entrada y el nivel de cada tanque inicialmente (datos almacenados por el SCADA el 05/03/2008). La tabla 4 muestra la capacidad de almacén de los tanques medida en l/m de altura y el nivel base, que es el nivel de cada tanque a partir del cual varía el flujo de salida, representando el efecto de la presión.

Los porcentajes de agua contabilizada (56%) y no contabilizada (44%) fueron calculados a partir de la relación entre la cantidad de agua producida por las plantas potabilizadoras y la toma Carvajal, y la cantidad de agua facturada mensualmente.

Tabla 3. Niveles de control de válvulas y nivel inicialmente

Tanque	Nivel Máximo		Nivel Mínimo		Nivel Inicialmente	
	(m)	(l)	(m)	(l)	(m)	(l)
Bourgoin	3.0	1200000	2.0	800000	1.25	500000
La Vuelta	5.5	1700000	4.5	1300000	2.26	789531
Milla	3.5	4180540	2.5	2986100	0.09	108246
Depósito	5.5	3208320	4.0	2333320	3.87	2257820
Don Tulio	5.5	4766680	4.0	3466680	1.94	1684700
Los Corrales	5.5	1833310	4.0	1333320	2.98	994457
San José	5.5	1833310	4.0	1333320	1.48	492915
Los Curos Nuevo	5.5	1100000	4.0	800000	3.26	652771
Los Curos Viejo	9.5	1187500	7.0	875000	3.99	498632

El manejo de las válvulas de conexión entre los distintos tanques es regulado por los siguientes parámetros:

- NIVEL MÍNIMO DE DEPÓSITO PARA CERRAR LA VUELTA-MILLA = 566.666 (l).
- NIVEL DE DEPÓSITO PARA REACTIVAR CONEXIÓN LA VUELTA - MILLA = 1533333 (l).
- NIVEL MÍNIMO DE MILLA PARA CERRAR LA VUELTA - DEPÓSITO = 300000 (l).
- NIVEL DE MILLA PARA REACTIVAR CONEXIÓN LA VUELTA - DEPÓSITO = 800000 (l).
- NIVEL MÍNIMO DE LOS CUROS VIEJO PARA SOLICITAR SUMINISTRO = 375000 (l).
- NIVEL MÍNIMO DE LOS CUROS NUEVO PARA DAR SUMINISTRO = 800000 (l).

- NIVEL MÍNIMO DE LOS CUROS VIEJO PARA CERRAR LA CONEXIÓN = 600000 (l).
- BUEN NIVEL DE LOS CUROS VIEJO = 800.000 (l).

Tabla 4. Capacidad de almacén de los tanques en litros por metro de altura y nivel base para efecto de presión

Tanque	Capacidad (l)	Altura (m)	Capacidad (l/m) de Altura	Nivel base (l)
Bourgoin	1440000	3.6	400000	699997
La Vuelta	1800000	5.0	350000	900000
Milla	4300000	3.6	1194444	2150000
Depósito	3500000	6.0	583333	1700000
Don Tulio	5200000	6.0	866667	1500000
Los Corrales	2000000	6.0	333333	n/a
San José	2000000	6.0	333333	1000000
Los Curos Nuevo	1200000	6.0	200000	900000
Los Curos Viejo	1250000	10.0	125000	n/a

La cantidad total de agua en el sistema para aplicar y suspender la política de racionamiento: COTA INFERIOR = 5000000 l; COTA SUPERIOR = 11000000 l. CT = 1 min.

Las horas pico son de 6 am a 8 am, de 11 am a 2 pm, y de 6 pm a 8 pm; pues los niveles de los tanques presentan mayores fluctuaciones según lo observado por los operadores. Por ello, en estos intervalos el multiplicador demanda horaria incrementa el valor de la DEMANDA ESTIMADA en 1,2 veces su valor normal, en un todo de acuerdo con lo expuesto por (Tahal, 1998). En las horas pico se activa la segunda bomba de la estación de bombeo Los Chorros (multiplicador horario de bombeo los chorros = 1,66) teniendo por efecto que el flujo de agua suministrado a los consumidores alcance 6000 l/min.

4 Resultados y simulaciones

4.1 Simulación base

La unidad de tiempo utilizada es el minuto. La corrida base se realizó para una semana, un total de 10080 min. El PASO DE TIEMPO para la simulación fue de 0.125 y el método de integración Runge-Kutta. La Fig. 8 muestra la altura (m) del nivel de agua de los tanques a lo largo del tiempo de simulación. Las líneas divisorias verticales representan la culminación de un día.

Para el tanque Bourgoin las fluctuaciones presentes a lo largo del día vienen dadas por las horas pico, recuperando su nivel en horas nocturnas. Su nivel más bajo es 1.25 m y el máximo 1.84 m. Nivel promedio de 1.71 m.

La cantidad de agua suministrada por la estación de bombeo La Vuelta es constante a lo largo del día, ya que sólo está en funcionamiento una bomba; la estación de bombeo Los Chorros activa una segunda bomba en las

horas pico, lo que hace que se incremente casi en un 100% la cantidad de agua suministrada a los usuarios.

Las fluctuaciones del tanque La Vuelta se deben a las horas pico, pues es de tránsito (no almacena gran cantidad de agua). Su menor nivel es 2.12 m, alcanzado al mediodía, por aprox. 3 h. Su valor máximo es 2.55 m, alcanzado antes de la primera hora pico. Nivel promedio de 2.4 m.

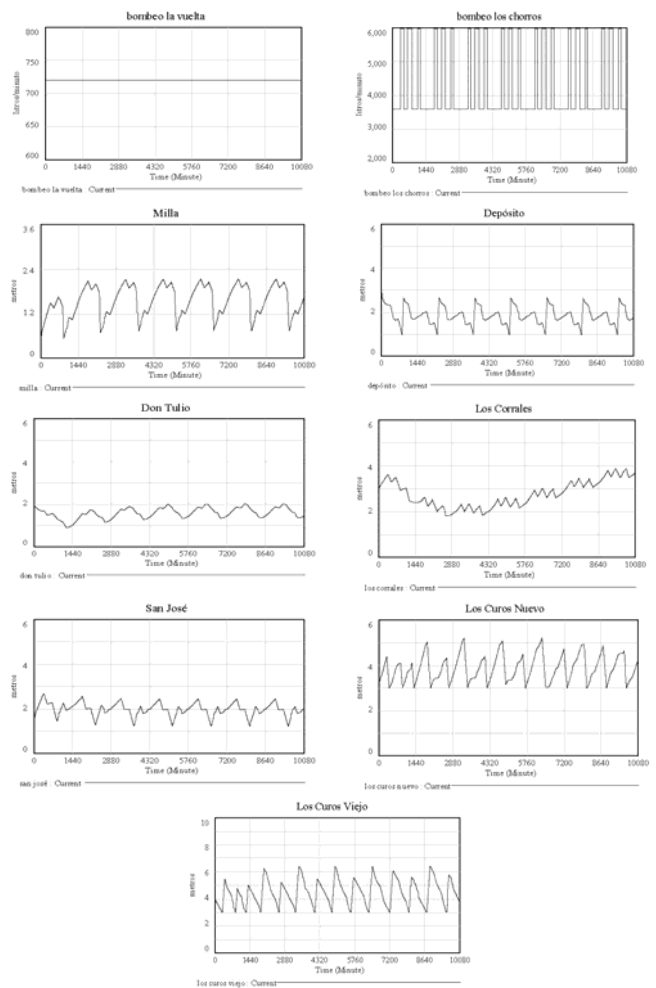


Fig. 8. Nivel de los tanques durante la simulación

El nivel del tanque Milla se ve drásticamente afectado cuando Depósito solicita todo el suministro proveniente de La Vuelta, pues el agua procedente de Planta Vieja no es suficiente para abastecer a los usuarios y alimentar al tanque Don Tulio. Este manejo de conexiones entre La Vuelta - Depósito y La Vuelta - Milla juega un papel fundamental en el nivel de agua que mantienen ambos tanques. El cierre de la conexión La Vuelta - Milla se efectúa una vez al día, dejando al Milla con un nivel por debajo de 1 m; Si este cierre no se efectuara mantendría un nivel aprox. de 1.9 m. Su menor nivel es 0.09 m (valor inicial); el mayor nivel alcanzado es 2.13 m, y el nivel promedio es 1.54 m.

El manejo de las conexiones La Vuelta – Depósito y

La Vuelta - Milla incide sobre ambos tanques. El cierre de la conexión La Vuelta - Milla permite que el tanque Depósito recupere su nivel rápidamente pues, de no ser así, su nivel disminuiría y sería incapaz de abastecer al San José. Su menor nivel es de 0.97 m, su mayor nivel es de 3.87 m (valor inicial); con un valor promedio de 1.86 m.

El nivel del tanque Don Tulio durante el primer día no es estable, con tendencia a la disminución. Esto corresponde a la fase transitoria de la simulación.

A partir del segundo día se puede observar que el nivel se estabiliza, incrementando su valor a tempranas horas y al final del día. Entre la segunda y la tercera hora pico, no se genera un aumento en el nivel del tanque, debido a que en ese intervalo se efectúa el cierre de la conexión La Vuelta - Milla, afectando indirectamente el flujo de entrada al tanque Don Tulio, disminuyendo éste, ya que el nivel de Milla se reduce progresivamente, ejerciendo menor presión sobre el flujo de salida del tanque.

Su menor nivel es 0.91 m, el mayor nivel es 2.02 m, con un nivel promedio de 1.58 m.

El nivel del tanque Los Corrales es afectado por las fluctuaciones de los tanques que le preceden. El incremento del nivel en los últimos dos días puede ser debido al supuesto que el consumo es constante, lo cual podría no ser totalmente cierto, ya que abastece a una zona mayormente residencial y la cantidad demandada los fines de semana puede ser mayor que la demandada entre semana, estabilizando el nivel del tanque. Su menor nivel es 1.82 m, el mayor nivel es 3.89 m, y el nivel promedio es de 2.75 m.

4.2 Validación y verificación del modelo

La validación del modelo fue realizada por los técnicos del ingeniero de Aguas de Mérida. La verificación se realizó con las siguientes pruebas (Serman, 2000).

- Adecuación de límites: el tiempo de simulación definido corresponde a una semana y las variables exógenas que pueden variar más allá de este periodo de tiempo son: a) La cantidad de agua demandada, por comportamiento estacional o por temporada vacacional. b) La cantidad de agua suministrada por las plantas potabilizadoras y la toma Carvajal, afectadas por la estación climática. Tomando en cuenta estas variables, la definición de los límites del sistema fue considerada adecuada.
- Estructura del modelo: la cantidad de agua almacenada en los tanques no alcanza valores negativos, pues está validada en las ecuaciones de los flujos de salida. El proceso de toma de decisión por parte de los operadores del sistema, está representado por el manejo de las conexiones La Vuelta - Milla, La Vuelta - Depósito y Los Curos Nuevo - Los Curos Viejo, según un promedio de los valores que ellos utilizan para decidir.
- Condiciones extremas: a) cero suministro de las plantas potabilizadoras y la toma Carvajal. Se abastece a la población con la cantidad de agua almacenada en los tanques inicialmente, para luego entrar en un periodo de racionamiento en el minuto 53, que se mantiene por el resto de la simulación. Los tanques, cuya salida está controlada por la política de racionamiento, conservan cierto nivel de agua, mientras el nivel de los otros tanques cae a cero. b) Incremento del 100% en el suministro de las plantas potabilizadoras y la toma Carvajal. Todos los tanques alcanzan el valor máximo y oscilan entre dicho valor y el nivel para reactivar la entrada. c) Cero demanda. Todos los tanques se estabilizan en el nivel máximo y las tasas de producción de las plantas potabilizadoras y la toma Carvajal descienden a cero. d) Incremento del 100% en la demanda. En el minuto 48 se activa la política de racionamiento y se mantiene por el resto de la simulación. La Vuelta, Depósito, Milla y las estaciones de bombeo abastecen a la población; sus usuarios van a consumir toda la producción de ambas plantas y por eso el sistema no abandona el racionamiento, ya que la cantidad total de agua en el sistema no logra alcanzar el nivel para abandonar dicha política. Los Curos Viejo no satisface la demanda completamente, ya que la conexión Los Curos Nuevo - Los Curos Viejo está cerrada debido al racionamiento y la producción de la toma Carvajal es insuficiente.

4.3 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad evalúa si los resultados del modelo cambian en forma significativa cuando las suposiciones del mismo varían dentro del rango de incertidumbre de cada parámetro. Se realizó sobre las variables total de agua en el sistema y RACIONAMIENTOS, pues resumen el comportamiento del sistema y afectan directamente a los usuarios. Este análisis se realizó haciendo 200 simulaciones. Para cada uno de los parámetros involucrados se selecciona al azar su valor en el rango de variación del mismo. Los resultados se resumen calculando el límite de confianza de 50%, 75%, 95 y 100% del valor obtenido sobre los resultados. El rango de incertidumbre para los parámetros considerados fue definido por los expertos.

Variación de la demanda base en un $\pm 5\%$. Con un 95% de confianza, la cantidad total de agua oscila entre 5000 m³ y 16400 m³ y, se aplica la política de racionamiento hasta dos veces por semana, lo cual no dista mucho de la realidad, ya que el sistema opera cercano al límite para aplicar la política de racionamiento.

Variación en la tasa de producción del $\pm 20\%$ en Planta Nueva y del $\pm 10\%$ en Planta Vieja y la toma Carvajal. La simulación se efectuó de manera simultánea, debido a que los factores que alteran dichas tasas de producción afectan a las tres paralelamente, como por ejemplo, el periodo de sequía. Con un 95% de confianza la cantidad total de agua en el sistema va de 5000 a 18600 m³ y el número de racionamientos puede llegar hasta 10 a la semana.

5 Escenario

El nivel de los tanques inicialmente corresponde a los valores generados al final de la corrida base.

- Escenario 1: disminución en la tasa de producción y un aumento en la demanda debido a la temporada de verano. La disminución en la tasa de producción viene dada por una reducción en los caudales de las fuentes de suministro del 20% para Planta Nueva y del 10% tanto para la Planta Vieja como la toma Carvajal. El aumento de un 5% en la demanda se plantea debido al incremento en la cantidad de agua dirigida al riego de plantas, lavado de automóviles, entre otros. Bajo este escenario se implementan doce racionamientos en una semana. Los días en los cuales se efectúan dos veces el corte de suministro a la población, éstos se realizan en la madrugada o al final del día. El total de agua en el sistema es, en promedio, de 7948 m³, 9% menor en comparación con la corrida base.
- Escenario 2: interrupción del funcionamiento de las plantas potabilizadoras, por dos días, debido a la obstrucción de los diques en la temporada de invierno.

El dique es el sitio de captación del afluente del río. Consta de una estructura en forma de rejilla que tiene como función retener sólidos de dimensiones considerables. Al terminar el periodo de sequía no hay vegetación en las zonas adyacentes a la Planta, lo cual permite que al comenzar el periodo de lluvia éstas arrastren todos los sólidos existentes en la zona, originando la obstrucción de los diques y la paralización de la Planta por dos días, tiempo en el cual cesa la lluvia, un equipo de trabajadores limpia el dique, se reactiva la planta, y posteriormente se suministra agua al sistema. Los días seleccionados para paralizar la producción son el tercero y el cuarto.

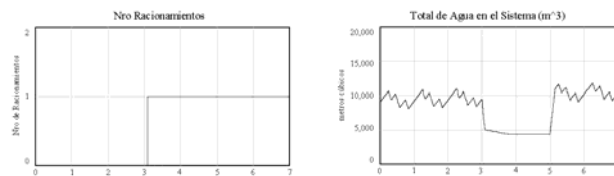


Fig. 9. Total de agua en el sistema ante la interrupción del funcionamiento de Planta Nueva

Al interrumpir el funcionamiento de Planta Nueva, hubo un racionamiento. La Fig. 9 muestra el total de agua en el sistema durante el racionamiento. La ejecución de dicha política comienza 2.1 h después de que la producción de Planta Nueva se detiene, manteniéndose activa por 3.5 h luego de reanudada la producción, tiempo en el cual el sistema alcanza el nivel para abandonar dicha política.

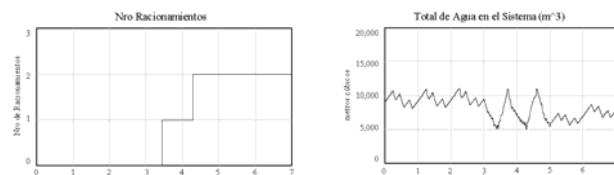


Fig. 10. Total de agua en el sistema ante la interrupción del funcionamiento de Planta Vieja

Al interrumpir el funcionamiento de Planta Vieja, hubo dos racionamientos. La Fig. 10 muestra el intervalo de duración de cada racionamiento. Los cortes de suministro a la población se efectúan el día 4 (10:33am-5:26pm) y el día 5 (6:45am-2:31pm). Esto indica que el sistema no se paraliza con esta interrupción. Con una interrupción en Planta Nueva, el sistema se paralizaría debido a que la tasa de producción de Planta Vieja es alrededor del 30% de la producción de Planta Nueva.

- Escenario 3: disminución del 15% de la producción en las plantas potabilizadoras debido al elevado nivel de turbidez del agua durante la temporada de invierno. En temporada de lluvias es necesario disminuir la tasa de producción de las plantas potabilizadoras para producir la homogenización de los compuestos químicos en el agua (sustancias añadidas para la potabilización). Si se mantiene la tasa de producción el proceso de homogenización no se lleva a cabo de manera correcta. Bajo este escenario se implementan nueve racionamientos, al menos uno diario. El segundo y quinto día sufren un corte del servicio en horas de la mañana y de la noche. El total de agua en el sistema es de 7810 m³, con una disminución del 10.6% en comparación con la corrida base.
- Escenario 4: aumento de agua no contabilizada (mayor cantidad de agua demandada), a causa de: a) Error en la estimación del consumo de clientes sin medidor (se facilita el despilfarro); b) Aumento en el número de usuarios clandestinos; c) Roturas en las tuberías, las cuales se producen con el paso del tiempo, siendo difícil sus reparaciones pues se encuentran enterradas.

Cuando el PORCENTAJE DE AGUA NO CONTABILIZADA es de 49%, la demanda se eleva en 5%, y cuando es de 54%, la demanda se eleva en 10%. Se aplicaron cinco y siete racionamientos respectivamente, aún cuando en ambos casos el incremento en la demanda no es excesivo, ocasiona un alto impacto en la población. El total de agua en el sistema es, en promedio, 8289 m³ y 7936 m³ respectivamente, con una disminución del 5.1% y 9.1% en comparación con la corrida base.

6 Notas finales

El modelo de simulación del sistema de distribución de aguas blancas de la ciudad de Mérida propuesto acá, provee una herramienta adicional a la empresa Aguas de Mérida para entender el funcionamiento del sistema y prepararse ante situaciones que pudieran presentarse. Sirve también como ejercicio académico para comprender la estructura y funcionamiento de este vital sistema para la población de nuestra ciudad.

Los resultados sugieren que, con el estado actual del sistema, un aumento del 15% en la demanda o una disminución del 15% de las plantas potabilizadoras, tendrían un fuerte impacto en el consumo (doce y nueve racionamientos

respectivamente). También, que se debería tener mayor control sobre los usuarios clandestinos, incrementando los clientes cubiertos por micromedición. Tener mayor control sobre el consumo real permitiría estimar y controlar las pérdidas del sistema debido a roturas en las tuberías. Lo anterior conduciría a un uso más racional del agua y a prestar un mejor servicio.

El modelo puede ser extendido incorporando la variación estacional de las fuentes de producción.

Agradecimientos

Agradecemos al personal de Aguas de Mérida, por la colaboración prestada durante la realización de esta investigación y al CDCHT por su apoyo con el proyecto I-1079-07-02-f.

Referencias

- Aguas de Merida, 2007, Aguas de Mérida. Disponible en <http://www.aguasdemerida.com>. Consulta: 15/11.2007.
- Forrester J, 1961, *Industrial Dynamics*, Cambridge MA: Productivity Press.
- Ford A, 1999, *Modeling the Environment: An Introduction to System Dynamics Models of Environmental Systems*. Island Press.
- Huerta J, 2007, La dinámica de sistemas en la planeación de los recursos hídricos. Disponible en <http://seia.guanajuato.gob.mx/>. Consulta: 20/06/2007.
- Manz D, 2007, Evaluación del funcionamiento de los sistemas de conducción de agua para riego, usando modelos de simulación dinámica. En <http://www.unesco.org.uy/>. Consulta: 19/06/2007.
- Mays L, 2002, *Manual de Sistemas de Distribución de Agua*, McGraw-Hill.
- Peña E, 2008, *Modelo del Sistema de Distribución de Aguas Blancas de la Ciudad de Mérida*. Proyecto de Grado. Escuela de Ingeniería de Sistemas, Fac. de Ingeniería, ULA.
- Sterman J, 2000, *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*, McGraw-Hill.
- Tahal 1998, Abastecimiento de agua informe de diagnóstico Mérida. Technical report, Tahal, Consulting Engineers LTD.
- Ventana 2007, Vensim from Ventana Systems, Inc. Disponible en <http://www.vensim.com/>; Consulta: 01/05/2007.