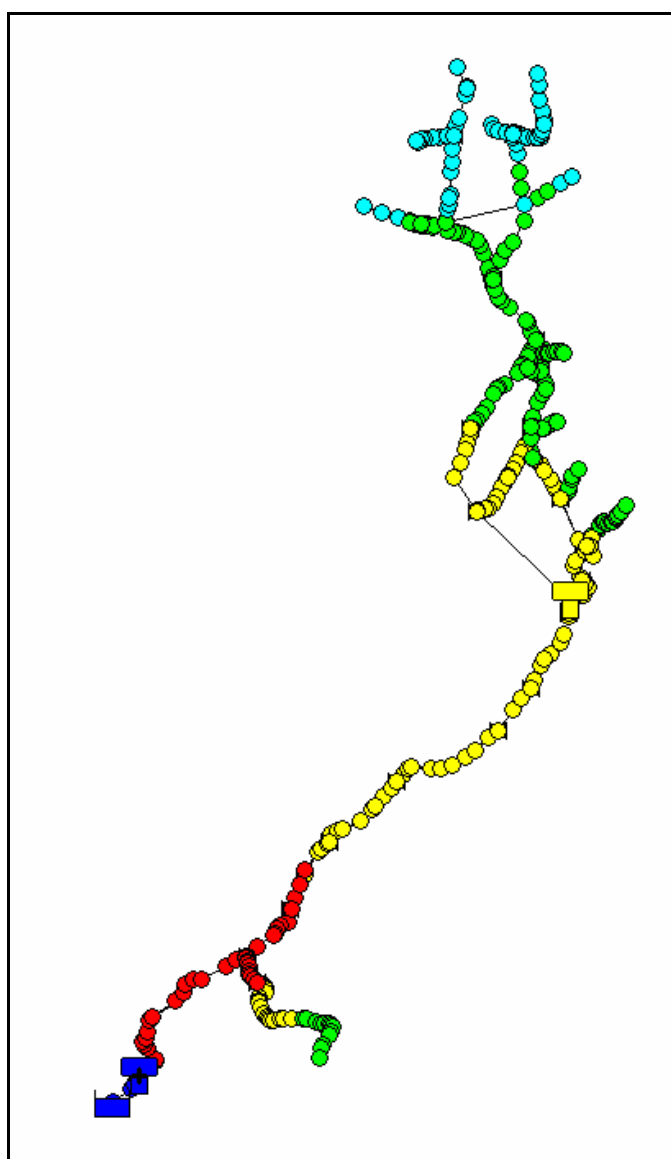


# Optimización del sistema de distribución de agua potable en la comunidad de Marsella



# Abstract

The main objective of this project is to establish the technical and feasible criteria necessary for the optimization process of Marsella's Water-Distribution-System, a rural community located in La Venecia de San Carlos.

For this purpose, a hydraulic and water-quality like analysis was undertaken for the whole system's extension. Based 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 at the Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), which has assumed the responsibility to guarantee the future continuity of the system. The assignment was undertaken in several stages, from the field characterization and data gathering to the analytical process and financial statement. A total compliance with the national legislation in accordance with all relevant institutions involved was ensured.

Key Word: Water, Analysis, Distribution, System, Optimization

# Resumen

La finalidad del presente proyecto es establecer los criterios para el proceso de optimización del sistema de distribución de agua potable de la comunidad de Marsella, ubicada en La Venecia de San Carlos. Para ello se ejecutó un análisis hidráulico y de calidad de agua para la extensión total del sistema de distribución de agua potable. Fundamentado en ello se pretende tomar acciones correctivas con el fin de garantizar la continuidad y correcta operación del sistema a largo plazo.

En la actualidad el sistema presenta diversas deficiencias en su desempeño. Uno de los principales factores de riesgo que actualmente posee, está directamente relacionado con la construcción del túnel del Proyecto Hidroeléctrico Toro III. Existe la posibilidad de que esa obra impacte negativamente la fuente principal de abastecimiento del sistema de distribución de agua potable.

Esta práctica se realizó en el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), entidad que asumió el compromiso de garantizar la continuidad del sistema. El desarrollo del proyecto se llevó a cabo en diversas etapas. Se inició con la caracterización de campo y se procedió con la recolección de información relevante, y el análisis y presupuestación, en concordancia con los criterios establecidos y demás instituciones involucrados.

Palabras claves: agua, análisis distribución, sistema, optimización.

# Optimización del sistema de distribución de agua potable en la comunidad de Marsella



ING. PAMELA CALDERÓN MURILLO

Proyecto final de graduación para optar por el grado de  
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Diciembre del 2007

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

# Contenido

Prefacio	1
Resumen Ejecutivo	2
Introducción	4
Marco Teórico	6
Alcances y Limitaciones	19
Metodología	21
Resultados y Análisis	23
Conclusiones	65
Recomendaciones	67
Apéndices	68
Anexos	69
Referencias Bibliográficas	70

# Prefacio

La acelerada modernización del país ha generado una dependencia y, al mismo tiempo, mayor demanda de electricidad. Es por esto que el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) se ve cada vez más presionado a la búsqueda de energía que sea rentable y viable ambientalmente para el país. En Costa Rica la fuente más confiable y común que se tiene es el agua, cada día hay más proyectos hidroeléctricos, y continuamente se exige un menor impacto ambiental y social de ellos.

Con el desarrollo de los proyectos hidroeléctricos se demanda del ICE mayores compromisos hacia las comunidades involucradas, esto para minimizar los impactos. Existen diferentes tipos y niveles de impactos, que comprometen al ICE en magnitudes acorde con el efecto o daño producido en cada zona. Es en este tipo de compromiso social el que generó este proyecto, ya que un recurso como el agua potable se considera vital, y se debe realizar toda la prevención posible para que no falte a ninguna comunidad.

En este caso el riesgo es causado por la construcción del túnel del Proyecto Hidroeléctrico Toro III, pues éste pasa relativamente cerca de la fuente que suministra de agua a la comunidad de Marsella.

El proyecto consiste en la optimización del sistema de distribución de agua potable de la comunidad de Marsella. El diseño conlleva el análisis completo de la fuente hasta los nudos de consumo, para así realizar los cambios necesarios en toda la infraestructura, de modo que opere correctamente a todo lo largo del periodo para el que fue diseñado.

Se le agradece al ICE por su disposición para que el proyecto fuese posible. Igualmente un agradecimiento al Ing. Federico Avilés, y a todo el personal de la institución, colaboradores todos, de una forma u otra, para que este proyecto fuera posible en tan corto tiempo. Un reconocimiento especial a mi profesor guía el Ing. Maikel Méndez, cuya ayuda fue indispensable en el desarrollo del proyecto.

# Resumen ejecutivo

La electricidad es un recurso primordial para el funcionamiento del país, cuya demanda aumenta día con día, por lo que la institución encargada se abastecer esta necesidad en el país, el Instituto Costarricense de Electricidad busca constantemente proyectos con este fin.

Es por lo anterior que se da la necesidad del presente proyecto pues, en la búsqueda de electricidad se presentan situaciones en las que se compromete algún recurso o servicio de las comunidades y, es responsabilidad el ICE, evitar y minimizar todo impacto que estos proyectos puedan causar.

La comunidad de Marsella se encuentra ubicada en la zona cercana a la construcción del Proyecto Hidroeléctrico Toro III. De mayor importancia es la cercanía de la construcción del túnel del proyecto a la fuente de agua que suministra el recurso al sistema de distribución de agua potable de la comunidad.

Dado que el agua potable es un servicio del cual la sociedad actual es completamente dependiente, por razones de higiene, salud e ingesta, entre otras, se están realizando todas las medidas necesarias para asegurar el servicio.

En el presente proyecto propuso entonces una optimización del sistema de distribución de agua potable, con el fin de asegurar de parte del ICE a la comunidad de Marsella un servicio continuo, eficiente, de calidad y a un largo plazo.

Además de analizar si la presente fuente es capaz de cumplir las necesidades, se requiere saber el caudal necesario para una naciente alterna, en caso de que se vea afectada la naciente actual, sin embargo, la ubicación y estudio sobrepasa el alcance del presente proyecto.

El objetivo general del proyecto es analizar el sistema tal y como está, para así decidir las mejoras necesarias de acuerdo al análisis.

Para cumplir con el propósito del proyecto se crearon etapas. La primera etapa es un diagnóstico de la topografía e infraestructura existente, la segunda contempla un estudio de

demanda y consumo de la comunidad, la tercera es un análisis del sistema de distribución de agua tal que como se encuentra actualmente y, finalmente, se procedió al diseño de las mejoras necesarias para un funcionamiento satisfactorio.

Para esto se hizo una recolección de datos y características de la infraestructura actual. Posteriormente ubicaron e identificaron los puntos de demanda y el tipo de cada una de éstas. En las demandas se encontró una variación importante de acuerdo al tipo de acometido y las industrias de la zona (la lechería y las polleras), cuyos consumos son considerablemente altos en comparación con el consumo residencial teórico y real de la comunidad de 200 y 225 litros por persona por día, respectivamente.

Con estos datos se realizó un análisis detallado de los nudos de demanda para la situación actual, y posteriormente, se proyectó para obtener datos aplicables a 20 años, lo que evidenció que la naciente actual no es capaz de abastecer la comunidad por si sola en todo el período de diseño a futuro.

Los datos anteriores se introdujeron en un programa de simulación de sistemas de agua potable (EPANET), por medio del cual se observó el comportamiento del sistema en la actualidad. De este modo se identificaron las fortalezas y deficiencias de demanda, con el fin de utilizarlas en la próxima etapa.

Las deficiencias encontradas fueron, básicamente, problemas de excesos y falta de presión, dependiendo del sector, esto debido a falta de sectorización de zonas de presión, mala ubicación de los depósitos de almacenamiento, a la insuficiencia de área hidráulica en las tuberías y a la falta de controles en todo el sistema, en especial en lo depósitos que permiten la existencia de rebases.

De acuerdo a los problemas encontrados en el análisis anterior, se realizaron los cambios en el programa de simulación, y se pudo así evaluar cuáles eran las mejoras necesarias. Los cambios

involucran, en primer lugar, una correcta sectorización por medio de controles con el fin de mantener presiones de entre 10 y 60m.c.a, lo que significó 11 cajas de controles para crear 10 zonas de presión, de alrededor de 50m.c.a cada una, lo que resulta lógico al considerar que existen 500m de diferencia de altura entre la naciente y el más bajo servido.

Además se reubicaron los depósitos en zonas con cotas acorde a las necesidades de la comunidad y se instalaron controles que eliminen el rebalse. También se hizo un aumento importante del volumen de almacenamiento, el cual toma en cuenta, además del volumen para el correcto funcionamiento del sistema, un volumen contra incendio y uno para emergencias. Para esto se colocaron dos depósitos, lo que resulta en un total de 450m<sup>3</sup>

Adicionalmente se incorporó en el diseño un sistema de cloración para mantener un estándar en calidad del agua a lo largo de toda la extensión de la red de distribución, éste contempla parámetros mínimos de concentración de cloro en el agua, así como tiempo de retención de agua en los depósitos.

Posteriormente se realizó un presupuesto preliminar para la conducción principal, para los controles en los depósitos y para las cajas de control. Además se incluyó la excavación y la mano de obra necesaria para la colocación de la tubería.

# Introducción

La presente práctica profesional dirigida se realizó en el ICE para la comunidad de Marsella, ubicada en la Venecia de San Carlos. Su propósito inicial fue realizar una optimización del sistema de agua potable, de acuerdo con un análisis hidráulico y de calidad de agua para la extensión total del sistema, todo esto con el fin de plantear las mejoras necesarias para un funcionamiento confiable y eficiente a largo plazo.

El proyecto nació de la necesidad de un mejor funcionamiento del sistema de distribución del agua potable en la comunidad, ya que éste tiene problemas de operación en algunos sectores. Adicionalmente el diseño responde a una medida preventiva generada por la construcción del túnel del Proyecto Hidroeléctrico Toro III muy cerca a la naciente que alimenta el sistema de distribución de agua.

Paralelamente un equipo de trabajo del departamento de Geología se encuentra actualmente estudiando el potencial de producción de fuentes de agua alternas a la ya existente. Esto incluye la evaluación tanto de fuentes sub-superficiales como de pozos profundos, con el objeto de ser conectadas al sistema de distribución de agua únicamente en el caso de ser necesario.

Igualmente existe una necesidad de analizar la extensión total del sistema de distribución de agua potable, debido a la inclusión a futuro de una nueva fuente que vendría a asistir la ya existente, en el caso de que se viera eventualmente afectada por la construcción antes mencionada o simplemente para complementar el caudal para el futuro crecimiento de la población servida por el sistema de distribución de agua potable.

La participación principal en la optimización del sistema de distribución de agua corresponde al ICE ya que este es el responsable del diseño, la construcción y el pago de los gastos involucrados. La comunidad cuenta con un representante que es la Asociación Administrativa del Sistema de Distribución de Agua Potable

(ASADA), la cual vela por la administración de este sistema de distribución y para que se cumpla el proyecto tal y como se firmó en el compromiso adquirido por el ICE. Posterior a la realización de la optimización propuesta en el presente proyecto, la ASADA volverá a tener el control respecto a las mejoras que deseen realizar y al mantenimiento de la infraestructura construida e instalada, esto debido a que el compromiso abarca únicamente la conducción principal, los depósitos necesarios y los controles para el correcto funcionamiento, mientras que los cambios necesarios en el resto del sistema de distribución serán afrontados por esta asociación.

Sin embargo dado que esta optimización es el principio de un reordenamiento completo del sistema, de acuerdo con los planes de la ASADA, el ICE va a brindar asesoría técnica para el resto de los cambios necesarios en la red de distribución, para que la optimización se lleve completamente a cabo y en forma correcta.

El responsable en materia económica para el diseño de las mejoras, los materiales necesarios y construcción en el sistema de distribución de agua potable es el ICE. Esta institución tiene previstos \$100 000 para tales fines, sin embargo, existe la posibilidad de que se requieran mayores recursos, los que están dispuestos también a cubrir. Como ya se dijo, posteriormente, los cambios en el resto de la red serán cubiertos por la ASADA.

La comunidad de Marsella se encuentra en la provincia de Alajuela, cantón de San Carlos, y pertenece al distrito de Venecia. El pueblo se encuentra en una zona con una diferencia de alturas de importante, ya que pasa de casi 910m sobre el nivel del mar en la parte suroeste a 410 al extremo final en la parte norte de Marsella.

La comunidad es rural, por lo tanto la mayor parte del territorio esta cubierto por viviendas, sin embargo la mayor actividad comercial está estrechamente vinculada a la zona, ya que son lecherías de carácter familiar. Igualmente aún permanece gran parte del área como terreno sin



uso, a forma de fincas, o bosques. Aunque en el presente es escaso se espera un crecimiento en el turismo, especialmente el turismo rural.

Las principales actividades económicas de la zona son la ya mencionada lechera y la industria avícola que poco a poco parece estar sustituyendo a la primera.

La ASADA, tiene un manejo completo del sistema de distribución de agua potable, y el principal actor de decisiones es el fontanero del pueblo. A pesar de lo anterior, se mantiene un buen orden del mismo. La comunidad inició la instalación de micromedición en 1993 y tienen medidores en todas las previstas desde 1998, actualmente cada usuario debe poseer un medidor desde que se empieza a hacer uso de este servicio.

Igualmente es importante notar que su funcionamiento no es el mejor para todos los usuarios, pues existen zonas con falta o con exceso de presión, además en el presente existe una desorganización en el sistema completo respecto a tuberías.

Por todas las razones anteriores es que, antes de iniciar un diseño completamente nuevo, es de vital importancia estudiar el actual, analizar las fortalezas y deficiencias, para determinar así qué se puede hacer para contar con una forma más eficiente en funcionalidad, economía y durabilidad.

Para el diseño de un sistema de distribución de agua potable se debe tomar en consideración diversos parámetros, que marcan hitos indispensables para un resultado final satisfactorio, estos parámetros incluyen, un estudio exhaustivo de la demanda y de los patrones de consumo de agua en la comunidad, la planeación del sistema de distribución, un diseño preliminar de la conducción y distribución, así como del almacenamiento, materiales y controles necesarios para el correcto funcionamiento.

De todo lo anterior se concluye que no se puede realizar un proyecto de tal índole, sin el manejo de información amplia y veraz sobre la fuente a utilizar y sobre la comunidad a la que se va a suplir.

Los objetivos para llevar a cabo el trabajo mencionado son los siguientes.

## **Objetivo General**

- 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 deficiencias en operación e infraestructura.
- Proponer y cuantificar soluciones a las deficiencias encontradas, en el ámbito hidráulico y de calidad de agua, con el fin de garantizar la continuidad y calidad del servicio a largo plazo.

# Marco Teórico

## Acueducto

Un acueducto es la combinación de estructuras necesarias para trasladar el agua desde un lugar remoto (la fuente) hasta el punto de inicio de la distribución (Mays L, 2000)

La fuente de energía en un acueducto normalmente es la diferencia de altura entre el punto de toma y el de distribución, para esto se deben agregar consideraciones de la conducción como, la forma y el tamaño de la sección, el material, el costo de la estructura y los esfuerzos que debe resistir (Babbitt H & Doland J, 1931).

## Sistema de distribución de agua potable

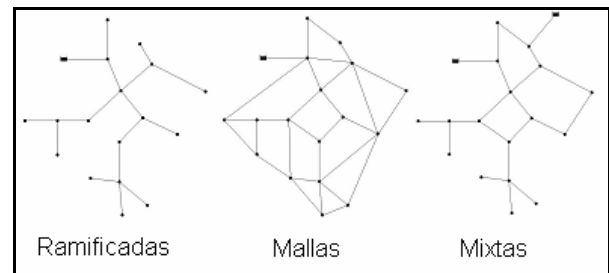
Un sistema de distribución de agua incluye elementos tales como, tramos de tuberías, válvulas, hidrantes, almacenamiento, ecualización, reservorios de distribución, acometidas domiciliarias y medidores, además todos los otros dispositivos necesarios para llevar el agua desde la red de distribución a los consumidores (Babbitt H & Doland J, 1931).

El objetivo de un sistema de agua potable es proveer de un servicio eficiente, constante y con la calidad que éste requiere en las distintas situaciones que se pueden presentar (Universitat Jaume I, 2003).

Los componentes principales de un sistema de distribución son las tuberías principales y tuberías secundarias, esto porque sirven diferentes propósitos. Las tuberías principales (también conocido como conducción) trasladan el líquido entre lugares, pero no a los consumidores

directamente, por lo que tienen diámetros mayores; en contraposición, las tuberías secundarias (distribución) tienen la función de conducir el agua a los usuarios directamente y en tramos más cortos, por lo que sus diámetros son menores.

Existen 3 tipos de arreglos de un sistema de distribución: un sistema de grilla, de árbol o de círculo (ver Figura 1), éste se determina por la ubicación de las tuberías en los caminos, y los diámetros de las tuberías varían dependiendo del diseño de cada sistema de distribución (Babbitt H & Doland J, 1931).



**Figura 1.** Diagramas de los tipos de sistemas de distribución (Fuente: El autor, 2007).

Estos tipos de redes pueden ser ramificadas, malladas, o mixtas, como se muestran en la Figura anterior respectivamente (Universitat Jaume I, 2003).

### Redes Ramificadas

Una red ramificada se distingue por su forma, ya que tiene ramales desde un punto o una línea mayor como una rama de un árbol.

En estas redes existe una única dirección de flujo y se facilita el cálculo del caudal, pues por su distribución, solo se aplica el gradiente de cargas totales.

La simplicidad en el cálculo de este tipo de redes las hace comunes y deseables gracias a la economía que presenta la poca longitud de tubería requerida y su facilidad en el proceso constructivo.

A pesar de estas ventajas, posee problemas en el funcionamiento, dado que en caso de presentarse una fuga, especialmente en una tubería principal causa una suspensión del servicio una parte importante del sistema (Figura 1).

Además dado que el agua no fluye constantemente, sino que se puede mantener fija en los puntos extremos del sistema, el tiempo de permanencia puede aumentarse lo suficiente como para producir formación de subproductos de oxidación.

Características principales de una red ramificada:

- No cuenta con circuitos cerrados.
- Dos nudos solo se pueden conectar por un solo camino.
- Cada uno recibe caudal de una sola línea.

## Redes Malladas

Este tipo de red tiene ventajas importantes como es la distribución de presiones más equilibradas, así como mayor confiabilidad del sistema. A diferencia de las redes ramificadas en estas lo común es los circuitos cerrados y dos nudos pueden unirse por dos líneas diferentes o más (Figura 1).

Esto significa que el flujo de agua no tiene una única dirección, por lo que dos líneas pueden alimentar el mismo nudo, haciendo así que la dirección del flujo cambie en función del tiempo.

Las ventajas mencionadas, implican otras dificultades diferentes, como la complejidad del análisis, ya que únicamente la ecuación de continuidad no describe el comportamiento de los caudales, lo que demanda la inclusión de otras ecuaciones que representen la dinámica en los circuitos. Esta complejidad hace que su uso se limite a zonas urbanas.

## Redes Mixtas

Este tipo es precisamente lo que el título describe, la combinación de ambos sistemas creando así un sistema con ventajas y desventajas combinadas, dependiendo de la configuración específica usada. Este sistema es

el que más comúnmente se presenta en las redes (Figura 1).

## Fuente

Una fuente o naciente de agua es un lugar en la superficie de la tierra donde brota agua naturalmente. El origen del agua puede ser variado, sin embargo la mayoría es de agua llovida que se filtra en el suelo de un área de terreno superior de donde se alimenta la naciente, llamada zona de recarga (North Carolina Cooperative Extension Service). El punto del suelo donde el agua brota se llama ojo de agua (Oxfam).

Una naciente de agua puede surgir en distintas circunstancias, el agua puede manar del terreno por gravedad o puede salir a presión por un acuífero confinado debajo de ésta (Oxfam).

Las nacientes se pueden dividir en tres categorías: las que emergen de fisuras en capas de rocas, las que surgen del estrato de roca sedimentaria sobre o contiguo al manto rocoso y las que brotan de un terreno aluvial.

Los manantiales pueden mantener un flujo de agua constante todo el año, o puede ser intermitente, dependiendo de la estación (Oxfam).

El agua de una naciente no siempre es ideal para consumo humano, ya que la calidad depende de varios factores tales como el uso del terreno en la zona de recarga y que tanto se filtra naturalmente, entre otros (North Carolina Cooperative Extension Service).

## La captación

Una captación o toma es la estructura en la que se encausa el agua de un manantial, ya sea hacia un tanque o a una tubería directamente.

El diseño de una toma es mayoritariamente por criterio del diseñador, esto debido a la gran cantidad de aspectos a considerar y la falta de reglas establecidas en la materia (Babbitt H & Doland J, 1931).

La estructura y el mecanismo de recolección de agua dependen del tipo fuente, la topografía existente y la ubicación.

Para la toma de agua en un estrato rocoso, inicialmente se debe limpiar de tierra y exponer totalmente el manto rocoso, de modo que el agua que emerge de esta roca sea capturada en un

reservorio impermeable que conducirá el agua posteriormente a las tuberías (Douglas, A & Spurr. R, 1916).

En caso que la naciente brote de una roca sedimentaria, el agua que proviene de capas de roca floja y arenosa, esto hace que transporte mucha arena. Para solucionar esto, se debe construir en la toma una trampa de arena y hacer un tanque mayor donde se establezca una velocidad baja de modo que el agua que continúe a los conductos sea limpia, libre de materiales (Douglas, A & Spurr. R, 1916).

Las nacientes de suelos aluviales si se encuentran en la parte superior de una montaña, sufren el mismo problema de arena en el agua que las nacientes de la categoría anterior. Sin embargo, si son de la región baja del terreno aluvial, se dan en depresiones de ríos, lagos u otros, por lo que brotan y burbujan en una calidad más limpia, aunque por su condición se manifiestan como pozos, que se pueden mezclar con agua llovida. Es por esto que generalmente se necesita un sistema de bombeo que evite la contaminación del agua (Douglas, A & Spurr. R, 1916).

Para la consideración del uso de una naciente para el abastecimiento de agua potable para una comunidad se deben estudiar varios factores. Los factores son la cantidad de agua que produce, la calidad de la fuente en sí, el costo de desarrollar el proyecto, el costo de operación y mantenimiento del mismo y los monitoreos y requisitos salubres del proyecto (USACE).

## Depósitos de almacenamiento

Un depósito o tanque de almacenamiento se utiliza para asegurar un abastecimiento eficaz, mantener la presión necesaria, utilizar un sistema de bombeo, mantener una proporción de tratamiento, reducción de medios de transmisión y mejorar la flexibilidad y eficiencia de la operación de un sistema (Mays L, 2000).

Características principales de un depósito:

- Cota de solera: el nivel del agua es cero.
- Diámetro: si es de sección circular o la curva de cubicación para otras secciones.
- Nivel de agua inicial, mínimo y máximo.
- Calida inicial del agua.

Existen diferentes tipos de depósitos, de acuerdo con el material, la sección y por su ubicación en el terreno (elevado, enterrado, etc.).

La clasificación que es determinante para una modelación de un sistema es la ubicación en el terreno, conocido como si "flota" en el sistema. Un depósito "flota" cuando la línea de carga piezométrica del este coincide con la línea de carga piezométrica (LCP) del sistema inmediatamente aguas abajo del depósito.

Escenarios importantes de un depósito:

- Deposito flotante con superficie libre.
- Deposito "no flotante o por bombeo" (enterrado o semi-enterrado).

### • Depósitos flotantes

Se considera flotante si opera por gravedad, lo que implica una diferencia de altura importante tanto respecto de la captación al depósito como del depósito al último consumidor.

Las funciones de un depósito flotante dependen si su uso será de regulación de volúmenes y de compensación de presiones, esto debido a que si es posible disponer de dos tanques, uno principal y uno secundario cercano al centro de población se pueden manejar volúmenes menores.

### • Depósitos no flotantes

Este tipo de depósitos depende de un sistema de bombeo para su almacenamiento. De igual manera que los depósitos flotantes, necesita un depósito de regulación próximo al foco de la ciudad y con una diferencia de altura con la población que permita mantener el rango de presión y volumen necesario en la red.

### • Dimensión de un depósito

Los elementos que deben considerarse en el diseño hidráulico de un tanque son: igualación, manutención de presión, almacenamiento para incendios, almacenamiento para emergencias, consumo de energía, calidad del agua, control hidráulico transitorio (Mays L, 2000).

Para la selección del tamaño de un tanque se debe mantener un balance entre los beneficios y desventajas del volumen de éste, en especial, considerar la seguridad que provee un tanque grande al sistema, contra el alto costo y problemas de la desinfección del agua en éste (pérdida del desinfectante residual) (Mays L, 2000).

Existen tres volúmenes principales que deben ser considerados (Mays, 2001):

- Volumen de ecualización
- Volumen contra incendio
- Volumen de emergencia

El volumen de ecualización es utilizado para facilitar a las fuentes de agua y a los equipos de bombeo establecer un diseño de comportamiento el cual cambia de acuerdo al sistema, su uso y necesidades.

El volumen contra incendios es la cantidad de agua que cumple con la necesidad que genera apagar un incendio. Por aspectos de funcionalidad se espera que un depósito pueda suplir la demanda necesaria para afrontar el incendio y mantener un servicio normal para el resto de los usuarios. El cálculo comúnmente se realiza considerando el caudal necesario para el tipo de hidrante utilizado, complementario se considera un tiempo estándar para apagar un incendio, lo que determina el volumen necesario que, además de proporcionar el caudal para el incendio, mantenga el funcionamiento del resto del sistema de distribución.

A pesar de los volúmenes anteriores siempre es necesario mantener un volumen de emergencia del sistema como tal. La diferencia se establece en cuanto al volumen, ya que este depende de cada sistema y de la debilidad que tenga este por distintos aspectos, tales como sistemas de bombeo únicos, inestabilidad o vulnerabilidad de las fuentes de agua o si esta es única. El volumen se determina aplicando un factor del volumen de la demanda media diaria. Evaluando el sistema se manejan los factores de entre un 10% y un 15%.

## Conducción

La conducción de agua potable se realiza por tuberías que llevan el líquido de un lugar a otro en el sistema.

En una modelación los tubos colocados en serie se consideran como integrales, o sea uno solo.

Los sistemas de distribución de agua potable están diseñados en general para que funcionen a presión, en otras palabras, con la tubería completamente llena, de modo que su comportamiento sea de flujo uniforme.

La presión de una tubería debe mantenerse en un rango entre 10 y 50 metros columna de agua, esto para el debido funcionamiento de la red, la tubería como tal y los dispositivos de consumo de los usuarios (AyA, 2007).

La dirección del flujo es determinada por el gradiente piezométrico, ya que el agua pasa de mayor a menor carga piezométrica.

Los parámetros primordiales de una conducción son, el nudo inicial y el final, el diámetro, la longitud, el coeficiente de rugosidad y el estado (abierto o cerrada).

Para cada elemento existe un parámetro de mayor importancia como lo es la ubicación de un nudo, o el diámetro de una tubería. El diámetro nominal representa, más el tipo y método de fabricación que el diámetro interno real. Es común que el diámetro interno real de una tubería sea mayor, incluso que el diámetro nominal.

A pesar de esto el diámetro puede cambiar en el transcurso del tiempo, por diferentes circunstancias como la corrosión provocada por el contacto de la tubería con el agua, o la acumulación de especies carbonatadas. Estos fenómenos puede disminuir considerablemente el diámetro de la tubería creando diferencias importantes en las estimaciones de capacidad y pérdida de carga en las consideraciones de diseño.

Por las circunstancias anteriores, y en especial por lo inseguros que son esos fenómenos, se dificulta un diseño que permanezca en el tiempo, de modo que para la modelación de un sistema nuevo o de evaluar uno existente, se utiliza el diámetro nominal y el valor de rugosidad absoluta que sea representativos a las instalaciones reales, de modo que subsanen las diferencias de diámetros.

La realidad de un sistema no se ve afectada en el comportamiento hidráulico proyectado, a causa de la compensación de diámetros mencionada anteriormente, sin embargo, la calidad de agua sí podría verse afectada de forma importante, pues la movilidad, el transporte y la dispersión de un agente oxidante están en función de la velocidad de flujo. Es por esto que se debe realizar un proceso de calibración y ajuste que considere tanto las mediciones de campo como las proyecciones teóricas (Castro & Neves, 2003).

Existe una amplia gama de materiales para tuberías, su escogencia depende del uso, de los requerimientos, del presupuesto, de las

facilidades de construcción y de la calidad que se quiera tener en la red. Algunos de los materiales son, concreto, hierro, cloruro de polivinilo (PVC), polietileno de alta densidad (HDPE), etc.

## Válvulas

Una válvula es un elemento que puede encontrarse abierto, cerrado o abierto con restricción al paso del líquido, de tal forma que restringe el movimiento del agua a través de la conducción (Haestad, 2006).

Existen diferentes tipos de válvulas y, en general, se clasifican en 5 categorías:

- Válvula de aislamiento.
- Válvula direccional.
- Válvula de altitud.
- Válvula de doble propósito.
- Válvulas de control.

Las válvulas pueden tener diferentes funcionamientos. Pueden colocarse para que restrinjan automáticamente el paso al líquido de acuerdo a la presión o al caudal, o puede operar manualmente. El funcionamiento de una válvula depende del tipo de ésta (Haestad, 2006).

### -Válvulas de aislamiento

Este tipo de válvula es generalmente utilizado para poder aislar sectores manualmente. Es de gran utilidad cuando se desea aislar un sector para una reparación o cambio en la red, de tal forma que todos los usuarios no se vean afectados, reduciendo al menor número posible (Haestad, 2006).

### -Válvulas direccionales

Conocidas como "válvulas check". Como indica la palabra, se encargan de mantener la dirección, pues permiten el paso en un sentido, de modo que si el flujo cambia de dirección ésta se cierra para impedirlo. Es utilizada en conducciones para evitar flujos contrarios y en tuberías conectadas a bombas para evitar que el flujo se mueva en dirección contraria a la de la bomba (Haestad, 2006).

### -Válvulas de altitud

El funcionamiento de este tipo de válvulas es común a la entrada de depósitos, de modo que cuando el depósito llega a la altura deseada, la válvula se cierra previniendo un rebalse y, cuando el flujo cambia de dirección, se abre, lo que permite el consumo del agua almacenada (Haestad, 2006).

### -Válvulas de doble propósito

Es común que en sistemas de distribución, se utilicen estas válvulas para liberar aire atrapado en la conducción a través de la red. Una válvula de aire/vacío libera aire atrapado y, en caso de presiones negativas, descargan aire en la tubería. Se pueden realizar combinaciones de alivio de modo que funcionen como una válvula de aire/vacío (Haestad, 2006).

### -Válvulas de control

Las válvulas de control abarcan un grupo de válvulas con diferentes funcionamientos y propósitos de control. Estas válvulas cuentan con un valor de consigna, el cual es un parámetro que le indica a la válvula las condiciones de operación. El valor de consigna depende de su función.

A pesar de esto todas tienen tres estados, independiente del diseño de cada fabricante:

- Abierta, en cuyo caso el valor de consigna no se cumple.
- Cerrada, en donde se encuentra completamente cerrada y tampoco cumple su función de regulación
- Activo (o ninguno), en que se cumple el valor de consigna y regula de acuerdo con él.

Estas válvulas cuentan con un nivel de complejidad muy alto, y su funcionamiento depende de las cargas piezométricas, tanto aguas arriba como aguas abajo, lo que hace de suma importancia su ubicación.

Los tipos de válvulas de control más comunes, son los siguientes (Beckwith et al, 2005):

- Válvulas Reductoras de Presión
- Válvulas Sostenedoras de Presión
- Válvulas Limitadoras de Caudal
- Válvulas de Regulación
- Válvulas de Rotura de Carga
- Válvulas de Propósito General
- Válvulas Preventoras de Reflujo

Las válvulas de control utilizadas en el presente proyecto se describen a continuación:

#### Válvulas Reductoras de Presión (PRV)

Éstas, en el estado activo, controlan la presión de aguas abajo de la misma, de modo que no sobrepase el valor de consigna establecido, mientras la presión aguas arriba sea superior. En el caso de una modelación, las válvulas se consideran elementos independientes de un tramo de tubería.

#### Válvulas Limitadoras de Caudal (FCV)

En estas el valor de consigna lo que determina es el caudal que pasa a través de la válvula, de modo que pasa como máximo este valor de caudal establecido. Se puede dar el caso de que el valor disponible es menor al de consigna, en cuyo caso pasa completo, situación que se prefiere evitar.

Este tipo de válvula es común en sistemas de irrigación o en grandes consumidores.

# Parámetros de diseño de un sistema de distribución agua potable

## Demanda y consumo

El consumo es la cantidad de agua que sale del sistema, sin importar las razones, ya sea por la grifería de un usuario, una fuga en la tubería o el uso de un hidrante.

Existen diferentes tipos de consumos. En primer lugar se puede mencionar la *demanda del usuario*, la cual es la cantidad de agua necesaria para satisfacer las necesidades de éste. En segundo lugar está el *agua no contabilizada*, es el líquido que se pierde en el sistema, ya sea por fugas, previstas no autorizadas u otros. En tercer lugar se encuentra la *demanda de caudal de incendio*, la cual es la capacidad del sistema que es necesaria para abastecer correctamente una emergencia de ese tipo (Beckwith, et al, 2005).

La demanda del usuario se denomina por la cantidad de litros que una persona utiliza diariamente, los criterios estándar para estas

cantidades consideran el tipo de comunidad, la ubicación (costera o ciudad), el clima y otros aspectos.

Dada la gran cantidad de variables, las instituciones encargadas de sistemas de distribución de agua potable, como lo es el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados han determinado tasas teóricas:

- Poblaciones rurales: 200 l/p/d
- Poblaciones urbanas: 300 l/p/d
- Poblaciones costeras: 375 l/p/d
- Gran Área Metropolitana: 375 l/p/d

Estas tasas son para consumo residencial, sin embargo, para desarrollos industriales establece que se deben realizar estudios para cada tipo industria.

## Proyección de la futura demanda

Un sistema de distribución de agua potable es una obra que se realiza para que opere de 20 a 30 años, esto debido a que las tuberías se colocan por debajo del nivel del terreno y no tienen acceso fácilmente.

Para hacer una estimación de la demanda a futuro es de gran importancia la calidad de información provista para hacer las proyecciones (Beckwith, et al, 2005).

Para lograr el periodo estimado, y que el sistema de distribución de agua potable tenga un funcionamiento óptimo durante todo el lapso, se debe prever el crecimiento de la población como el económico del territorio, el cual depende de muchos factores: tanto de la capacidad del lugar para crecimiento, del aumento histórico de la población en la comunidad, así como el posible aumento de la demanda de agua a través de los años. En lugares rurales también es importante considerar un crecimiento de industrias o centros turísticos, ya que si existe la posibilidad, esto puede aumentar significativamente la demanda al sistema de distribución de agua potable.

La decisión de cual opción de proyección a futuro no debe ser usada solamente en la elección del tipo de modelación sino como una herramienta de planeación, pues el diseñador no puede predecir el futuro (Beckwith, et al, 2005).

Existen diferentes formas de realizar la proyección a futuro de la demanda, una de ellas son las llamadas *las proyecciones desagregadas*, que se desarrollan estudiando las razones de la demanda, y se proyecta a futuro, con más entendimiento de las justificaciones que simplemente los números de aumentos en la demanda sin considerar el por qué.

En caso de no haber estudios, se utiliza una proyección de un 3,5% anual en el caso de comunidades rurales.

## Calidad de agua

La finalidad principal de un sistema de agua potable es la atención de usuarios que requieren de un suministro permanente y correcto de agua, que tenga una calidad y cantidad apropiada.

En los parámetros de calidad se involucra factores como la ausencia de sabor, olor y que no represente un riesgo microbiológico para el

usuario. Para mantener estos parámetros en la conducción completa, se deben realizar grandes esfuerzos, debido a la complicación y cantidad de componentes en el sistema (AWWA, 1999)

Para mejorar la calidad del agua se han utilizado desinfectantes desde el siglo 19, debido a la detección de casos de typho y cólera en algunas ciudades del mundo. Cuando se trata con desinfectantes en la administración de un sistema existen procesos físico-químicos que normalmente se presentan como son el transporte, la mezcla y el decaimiento.

Existe una gran variedad de desinfectantes en uso, sin embargo, hay tres que son los más comunes: el ozono, la luz ultravioleta y el cloro o sus derivados.

El uso de ozono y la luz ultravioleta presenta una cantidad mínima de sub-productos de desinfección y de baja interacción con el agua, con el inconveniente de que no garantizan un efecto residual en toda la extensión de la red debido a su corta vida y duración en el mismo (Castro & Neves, 2003).

La utilización de cloro en la desinfección por oxidación de la materia orgánica tiene la delantera en permanencia y efecto residual duradero en la red de distribución. Este efecto se presenta debido a la durabilidad del agente oxidante, la cual es imprescindible para evitar cualquier eventual re-contaminación por agente patógenos, lo que se puede generar por intrusiones en sectores de la red con presiones negativas o por la formación e interacción de biofilme en las paredes de las tuberías (Faust & Aly, 2001).

### • Transporte de Oxidantes

El transporte de oxidantes en la extensión de una red de distribución generalmente se maneja con teoremas matemáticos que utilizan un modelo de transporte basado en la advección reactiva unidimensional (ODAR). En el transporte advectivo, (ec. 1) un volumen dado de agua es trasladado a lo largo de la tubería, con una velocidad directamente proporcional a la velocidad media del flujo. Esto se logra considerando que no hay mecanismos de dispersión de importancia en un flujo turbulento.

Esta propuesta cree que en condiciones ideales (únicamente presente el transporte advectivo) no se da ninguna otra reacción interna en el seno del agua, por lo que la concentración



de un oxidante sería el mismo en todo el recorrido del agua en la tubería, sin importar la longitud de ésta. Esto significa que no existe un intercambio de masa en fracciones de agua continuas cuando se trasladan en la tubería, de modo que se puedan realizar diluciones de oxidantes únicamente en depósitos, nudos de unión o cualquier otra unión de tuberías en el sistema (AWWA, 1999).

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = u_i \frac{\partial C_i}{\partial x} + R(C_i) \dots\dots\dots \text{ec.1}$$

Donde:

C<sub>i</sub>= concentración de oxidante [M/L<sup>3</sup>] en la tubería i en función de la distancia x y el tiempo t.

U<sub>i</sub>= velocidad de flujo en la tubería i [L/T].

R= velocidad de reacción [M/L<sup>3</sup>/T] como función de la concentración.

• Mezcla de Oxidantes

En el caso de mezcla de oxidantes el proceso se considera completo e inmediato. Es por esto que al salir del nudo, la concentración de un oxidante en el agua, es la suma ponderada respecto a los caudales de las concentraciones de todos los flujos que llegan al nudo

Por lo tanto para el nudo "k" puede representarse así:

$$C_i \Big|_{x=0} = \frac{\sum_{jlk} Q_j C_j \Big|_{x=L_j} + Q_{k,ext} + C_{k,ext}}{\sum_{jlk} Q_j - Q_{k,ext}} \dots\dots \text{ec.2}$$

Donde:

i= línea de tubería por la que sale caudal del nudo "k".

lk= conjunto de líneas que fluyen hacia el nudo "k".

L<sub>j</sub>= longitud de línea "j".

Q<sub>j</sub>= caudal de la línea "j".

Q<sub>k,ext</sub>= caudal externo que entra a la red a través de nudo "k".

C<sub>k,ext</sub>= concentración del oxidante en el caudal externo que entra a la red a través del nudo "k".

C<sub>i</sub>|<sub>x=L</sub>=concentración de oxidante en el caudal al final de la línea.

Para la mezcla en depósitos existen cuatro teoremas principales que describen los fenómenos que ocurren (Rossman 2002). De estos el que representa el fenómeno del presente proyecto es el siguiente.

• Teorema de Mezcla Completa: se considera que el agua que entra al depósito se mezcla completamente y súbitamente con el agua almacenada. Es el modelo más sencillo de mezcla que puede desarrollarse. Para esto no se ningún parámetro adicional y de acuerdo con esta práctica, se prueba que concuerda con gran cantidad de depósitos de regulación.

• Decaimiento de Oxidantes

El decaimiento de oxidantes es el proceso de consumo del oxidante conforme recorre la red de distribución, lo que produce que existan sectores extremos con concentraciones peligrosamente bajas. Es por esto que de debe estudiar cuidadosamente el comportamiento físico-químico del cloro, para así interpretar y modelar matemáticamente la red, de modo que se asegure la sanidad del agua en cualquier punto de la red. El decaimiento del cloro y sus derivados se da mayoritariamente por tres fenómenos: la evaporación, las reacciones internas con el agua y las reacciones con las paredes de las tuberías y otros elementos.

La evaporación tiene relevancia en los puntos en que el agua se encuentra a presión atmosférica como un depósito, no es así el decaimiento por reacciones internas, ya que éste se describe por reacciones cinéticas (ec. 3) en las que se incluye una constante de reacción, constante Kb. La ecuación 3 es comúnmente utilizada en programas de modelación y simulación en el mercado.

$$C=C_0 (e^{-K_b t}) \dots\dots\dots \text{ec. 3}$$

Donde:

C= concentración del oxidante en el tiempo "t" [M/L<sup>3</sup>]

C<sub>0</sub>= concentración inicial del oxidante [M/L<sup>3</sup>]

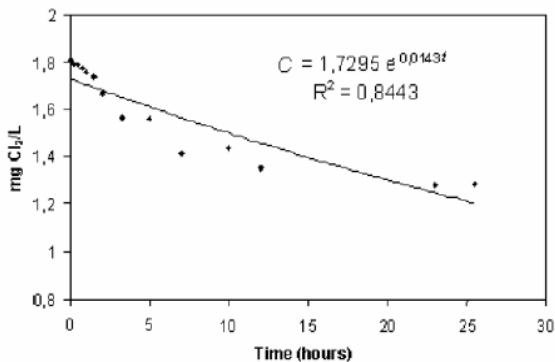
t= tiempo [T]

K<sub>b</sub>= coeficiente de reacción de primer orden [1/T]

El valor de K<sub>b</sub> varía en función del agua que se quiere desinfectar y es un valor que es usual

determinarlo por medio de ensayos experimentales en laboratorio, o se ajusta al sistema específico posteriormente. En ambos casos es posible graficar el comportamiento del decaimiento del cloro, como la concentración del cloro versus tiempo, de este tipo de gráfico se puede realizar una regresión exponencial simple para obtener el valor de  $K_b$

presentan los parámetros determinados por una norma del Comité Coordinador Regional de Instituciones de Agua Potable y Saneamiento de Centroamérica, Panamá y República Dominicana, CAPRE (Anexo 5).



**Figura 2.** Decaimiento de Cloro libre de acuerdo a cinética de primer orden para una muestra de agua dada (Castro & Neves, 2003).

Un ejemplo del decaimiento es el ensayo experimental de la Figura 2, donde se obtiene para este caso específico un valor de  $K_b$  de 0.0143 horas. El coeficiente de correlación  $R^2$  representa una correlación de 85% aproximadamente, lo que indica que la cinética de primer grado aplica al decaimiento de cloro con una precisión próxima a 85% para tal muestra.

La otra causa del decaimiento de oxidantes son las reacciones entre el oxidante y el material de la tubería, sin embargo el estudio de estas complejas reacciones sobrepasan el alcance del presente trabajo.

Para asegurar la calidad del agua se han establecido niveles máximos de contaminación (MCLs). Estos niveles están basados en la ingesta diaria de consumo de agua y determinados para proteger al público de posible contaminación en el agua. Esta contaminación puede ser de diferentes tipos: químicos, orgánicos e inorgánicos, contaminantes microbiológicos, total trihalomethanes, turbiedad y radioactividad (USACE, 1999).

Existen parámetros mínimos que se deben cumplir y que han sido establecidos por diferentes instituciones o leyes. En los Cuadros 1 y 2 se

<b>CUADRO 1. PARÁMETROS ORGANOLÉPTICOS*</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor Recomendado</b>	<b>Valor máximo Admisible</b>
Color Verdadero	mg/L	1	15
Turbiedad	UNT	1	5
Olor	Factor Dilución	0	2 a 12°C 3 a 12°C
Sabor	Factor Dilución	0	2 a 12°C 3 a 12°C

\* Norma CAPRE, 1994 (Anexo 5)

<b>CUADRO 2. PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS*</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor Recomendado</b>	<b>Valor máximo Admisible</b>
Temperatura	°C	18 a 30	
Concentración de Iones Hidrógeno	Valor pH	6.5 a 8.5 (a)	
Cloro Residual	mg/L	0.5 a 1.0 (b)	(c)
Cloruros	mg/L	25	250
Conductividad	μS/cm	400	
Dureza	mg/L CaCO <sub>3</sub>	400	
Sulfatos	mg/L	25	250
Aluminio	mg/L		0.2
Calcio	mg/L CaCO <sub>3</sub>	100	
Cobre	mg/L	1.0	2.0
Magnesio	mg/L CaCO <sub>3</sub>	30	50
Sodio	mg/L	25	200
Potasio	mg/L		10
Sólidos Disueltos Totales	mg/L		1000
Zinc	mg/L		3.0

(a) El agua debe ser estabilizada de manera que no produzcan efectos corrosivos ni incrustaciones en los sistemas de distribución de agua potables.

(b) Cloro residual libre.

(c) 5mg/l en base a evidencias científicas las cuales han demostrado que este valor "residual" no afecta la salud. Por otro lado cada país deberá tomar en cuenta los aspectos económicos y organolépticos en la interpretación de este valor.

\* Norma CAPRE, 1994 (Anexo 5)

### • Calidad de agua en un depósito

En la calidad de agua en un reservorio interviene tres tipos de problemas, los químicos, los microbiológicos y los físicos (Mays L, 2000).

Existen múltiples problemas químicos con el almacenamiento del agua, entre los que se cuentan la pérdida del residuo desinfectante, la formación de desinfectante por productos, el desarrollo de olor y sabor, la variación en la

acidez del agua y acumulación de hierro y manganeso, entre otros (Mays L, 2000).

Los problemas microbiológicos son producidos por microorganismos que se introducen al tanque por diversos medios, tales como la conducción, problemas en el sistema de desinfección, el trato inadecuado del agua, infiltración de agua externa en el tanque, problemas de funcionamiento del tanque como falta de cerramiento y errores constructivos en el techo del tanque, uniones de paredes (Mays L, 2000).

En los inconvenientes físicos se deben a sobretodo a la acumulación de sedimentos y a la entrada directa de contaminantes al tanque, por falta de cerramiento (Mays L, 2000).

# Análisis hidráulico y de calidad de agua

## Modelación de sistemas de distribución de agua

La modelación de sistemas de distribución de agua es la más reciente herramienta tecnológica, para el diseño de esta infraestructura. La modelación facilita significativamente proveer a las comunidades de sistemas confiables de forma eficiente y segura, tanto en el presente como en el futuro.

Lo que hace la modelación de un sistema de distribución de agua potable es simular el comportamiento de un sistema por medio de otro sistema, de forma semejante en concepto.

Esto se realiza por medio de representaciones matemáticas de un sistema real llamado modelo. Lo anterior facilita el diseño al disminuir o eliminar la necesidad de realizar modelos o experimentación dentro de un sistema pues es posible conocer, antes de construir, el comportamiento hidráulico y de calidad de agua, ya que las mediciones de calidad, una vez concebido el sistema de distribución, puede ser costosas y peligrosas para los usuarios servidos durante el tiempo de pruebas.

El uso de esta herramienta es de gran utilidad debido a que se pueden analizar gran variedad de escenarios y alternativas sin afectar el funcionamiento real del sistema o incurrir en grandes gastos económicos.

La simulación puede realizarse en distintos rangos de tiempo, los periodos cortos reflejan determinado momento de un sistema de distribución, mientras que tiempos más prolongados pueden reflejar el comportamiento

total del sistema, incluyendo depósitos y válvulas en operación.

La modelación, si bien puede ser utilizada para diversos fines como conducciones de aceite, enfriamientos industriales y otros, su uso más común se da en los sistemas de distribución de agua.

La utilización de modelos es especialmente práctica cuando se trata de ubicaciones con topografía muy compleja, con mucho cambio en los usuarios, y en grandes tamaños. Algunos de los servicios de modelación de sistemas de distribución de agua son:

- Planeamiento a largo plazo de nuevos sistemas y rehabilitación de ellos.
- Estudios de protección contra el fuego
- Investigaciones de calidad de agua
- Utilización de energía
- Diseño de sistemas
- Usos diarios operacionales (entrenamiento de personal, solución de emergencias y problemas)

## EPANET

EPANET 2.0 es un programa que realiza simulaciones que ayudan a predecir el comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en el sistema de distribución de agua en diferentes espacios de tiempo.

EPANET es un programa creado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S Environmental Protection Agency), con el propósito de crear una herramienta que facilitara el diseño de infraestructura usada en la prevención y control de contaminación de recursos importantes como el agua.

Este programa de simulación opera en periodos cortos y largos, durante lo cuales refleja el comportamiento hidráulico en sistemas de conducción a presión.

El sistema se puede componer de tuberías, nudos, intersecciones, bombas, válvulas, reservorios y depósitos de almacenamiento.

EPANET analiza y representa el flujo del agua en cada tramo de tubería, mostrando la presión por nudo, el caudal en las tuberías, la altura en los depósitos de almacenamiento y la concentración de químicos, entre otros. Estas representaciones se pueden realizar por mapas con escalas a color, gráficos y tabulaciones.

## Opciones de análisis

### Ecuación de continuidad y balance de masas

La forma para deducir la velocidad de un flujo en un sistema de conducción cerrado es a través del principio de continuidad.

Este indica que, en un tramo de tubería, el flujo de un líquido que se traslada de un punto 1 a un punto 2 mantiene la rapidez y, si no existen salidas o entradas de líquido, la masa es la misma (Mott, 1996), lo que produce entonces un balance de masas entre dos puntos de un conducto cerrado.

El concepto anterior, en cuanto a la rapidez de un flujo de masa, se representa:

$$M_1 = M_2 \quad \text{ec 4}$$

Donde:

M= masa [M]

Dado que  $M = rAv$ , ec 5

Donde:

M= masa [M]

$r$  = densidad [M/L<sup>3</sup>]

A= área [L<sup>2</sup>]

v= velocidad [L/T]

$$r_1 A_1 v_1 = r_2 A_2 v_2 \quad \text{ec 6}$$

Donde

$r$  = densidad [M/L<sup>3</sup>]

A= área [L<sup>2</sup>]

v= velocidad [L/T]

La ecuación 6 es conocida como la ecuación de la continuidad. Con ellas se pueden relacionar múltiples variables como la densidad de un fluido, el área de flujo, la velocidad entre secciones de un sistema de flujo estable (Mott, 1996).

Esta ecuación determina que, si el fluido es incompresible, los las variables de densidad son iguales, como en el caso de los líquidos, por lo tanto la ecuación se simplifica a:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad \text{ec 7}$$

Donde:

A= área [L<sup>2</sup>]

v= velocidad [L/T]

Puesto que caudal (Q) es área por velocidad la ecuación se puede expresar como:

$$Q_1 = Q_2 \quad \text{ec 8}$$

Donde:

Q= caudal [L<sup>3</sup>/T]

### Ecuación general de la energía

La ecuación general de la energía está basada en la ecuación de Bernoulli. La ecuación de Bernoulli reúne variables que se deben considerar en el estudio de una línea de conducción, estas son las diferentes tipos de energías que se ven involucradas, como lo es la energía potencial (elevación), la cinética (velocidad) y la de flujo (presión).

Es posible expresarlo como la ecuación 9:

$$\frac{p_1}{g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{g} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad \text{ec 9}$$

Donde:

p= presión

$\gamma$ =peso específico [F/L<sup>3</sup>]

z= elevación [L]

v= velocidad [L/T]

A pesar de la importancia, de la ecuación de Bernoulli esta tiene sus limitantes, ya que no considera pérdidas y adiciones de energía que se dan en conducciones.

Una solución a esto es la ecuación general de la energía (ec 10), que es una expansión de la ecuación de Bernoulli, la cual contempla la energía añadida, (la inclusión de una bomba u otro), la energía retirada (un dispositivo mecánico o motor) y la energía perdida debido a fricción en los conductos o por presencia de válvulas y accesorios (Mott, 1996).

$$\frac{p_1}{g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_A - h_R - h_L = \frac{p_2}{g} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad \text{ec 10}$$

Donde:

$p$ = presión

$\gamma$ = peso específico [F/L<sup>3</sup>]

$z$ = elevación [L]

$v$ = velocidad [L/T]

$h_A$ = energía agregada [L]

$h_R$ = energía retirada [L]

$h_L$ = pérdidas de energía [L]

### Pérdidas de energía debido a fricción

La pérdida de energía en una conducción cerrada solo se puede producir por la fricción de líquido, esto debido a que la velocidad debe mantenerse en tanto el área sea la igual, y la energía potencial depende únicamente de la posición. Esta energía se conoce como pérdida de cabeza por fricción y se expresa por la ecuación de Darcy—Weisbach de la siguiente forma (Saldarriaga, 1998):

$$h_f = f \frac{l v^2}{d 2g} \quad \text{ec 11}$$

Donde:

$h_f$ = energía perdida por fricción [L]

$f$ = factor de fricción de Darcy (adimensional)

$l$ = longitud de tubería, en que se pierde  $h_f$  [L]

$v$ = velocidad media [L/T]

$d$ = diámetro de la tubería [L]

$g$ = constante de gravedad [L<sup>2</sup>/T<sup>2</sup>]

# Alcances y limitaciones

El alcance general de este proyecto consiste en la optimización del sistema de distribución de agua potable con la infraestructura involucrada. Sin embargo, para cada etapa, existe un alcance y limitaciones específicos explicados a continuación.

En la etapa de planimetría, se incluye la información del trazo de la actual conducción, incluyendo los ramales sobre carretera. Sin embargo, no se cuenta con la topografía de dos servidumbres que a su vez alimentan ramales ubicados en las zonas altas del sistema.

En cuanto a la etapa de diagnóstico de la infraestructura, se incluyó con detalle cada estructura y su funcionamiento, no así en lo que a la fuente se refiere, ya que si bien existen muestras de análisis bacteriológicos y fisicoquímicos, los estudios del agua no se hicieron a través de un tiempo prolongado, incluso las muestras para los estudios bacteriológicos no se tomaron en la captación directamente, lo que ha creado una incertidumbre con la que se debe trabajar.

Adicionalmente no se realizó el diseño de la captación, esto debido a la limitada información para este fin, en conjunto con la necesidad de los datos de campo, que solo es posible obtenerla al observar claramente las condiciones de sitio (demoliendo la captación actual).

En el estudio de la demanda y consumo, el alcance es un análisis a fondo de la comunidad, con un alto grado de detalle en lo que respecta a la micromedición.

Respecto a la curva de modulación de demanda, asumida para el sistema, donde figuran acometidas de consumo domiciliario y consumos especiales (lecherías, polleras, iglesias y otros), no fue posible desagregar la curva por tipo de acometida, menos aun generar curvas específicas o verificar las asumidas en el campo.

La limitación en la macromedición se produce por la inexistencia de aforos totales, lo que se posee son mediciones de excedentes de la misma. Los datos obtenidos no tienen carácter

histórico, ya que fueron tomados en el transcurso de 3 meses, de modo que no representan un patrón o un panorama completo que incluya la estación seca de la región y otros comportamientos.

El análisis del sistema de distribución actual tiene un alcance importante, pues se pudo simular el comportamiento de la red incluyendo la conducción y los depósitos existentes y en funcionamiento y, de acuerdo con entrevistas realizadas, se pudo confirmar los resultados. Sin embargo, se encontraron limitantes como la falta, tanto del índice de agua no contabilizada, como de la confirmación en campo de presiones y caudales.

El análisis del sistema de distribución ya optimizado presenta cambios concretos, con información real, y con una simulación del comportamiento tanto hidráulico como de calidad que abarca los próximos 20 años con un funcionamiento correcto

Con respecto a la calidad del agua, no se tuvo oportunidad de cuantificar directamente en el campo los coeficientes de reacción de cloro libre en tuberías y en el seno propio del agua, razón por la cual, en el redimensionamiento a futuro, se asumen valores típicos de estos coeficientes, con el propósito de poder simular con cierto grado de confiabilidad el nivel de cloro residual a través de todo el sistema.

El factor limitante del diseño nuevo es la validación de información faltante y asumida, como son los ramales en servidumbre, los que hay que revisar una vez conocida la topografía. Además, no se puede verificar la calidad, ya que el tratamiento requiere de calibración en campo.

En la determinación de los materiales y los costos asociados, el alcance se concentra en la conducción, las válvulas y los accesorios, pues estos son los de mayor peso en este sistema de distribución, incluyendo la mano de obra asociada.

Como limitante en la cuantificación, se encuentra la ausencia de un diseño estructural de los depósitos, pues sobrepasa el alcance del presente proyecto. Lo anterior redundaría en una falta de información para el cálculo de materiales y mano de obra vinculada a los depósitos.



# Metodología

Para alcanzar los objetivos del proyecto se demarcaron etapas de trabajo:

- Planimetría y infraestructura actual
  - Consumo y demanda de agua
  - Análisis hidráulico actual
  - Propuesta de mejoras hidráulicas y de calidad, detalle de materiales y costo asociado.
- Primera etapa: el personal del departamento de topografía del ICE levantó el trazo en planta y la topografía, tanto del sistema de distribución de agua potable como de toda la red de distribución de agua.

Además, se visitó el sitio en varias ocasiones, con el fin de adquirir los detalles en cuanto a todas las estructuras, por ejemplo la captación y la fuente, donde se pudo visualizar claramente el caudal producido.

A la fuente (Apéndice 08, Lámina 01) se le realizaron mediciones de diferentes tipos, en el caudal excedente, desde mediados de junio de 2007. Para evaluar la calidad del agua se le realizaron dos estudios bacteriológicos (Anexo 3) con agua obtenida de distintas ubicaciones. Adicionalmente se le realizaron múltiples análisis fisicoquímicos de potabilidad (Anexo 4), con agua recolectada en diferentes puntos del sistema y en distintas épocas del año.

Posteriormente se delimitaron las líneas de distribución de agua, se obtuvo el detalle de ubicación con las respectivas características: el material, el diámetro y puntos de inicio y final, entre otros.

Igualmente se recolectó la cantidad de depósitos en funcionamiento y, en cada tanque, las válvulas instaladas y el estado físico y funcionamiento, tanto los tanques quiebra gradiente como los depósitos de almacenamiento.

Una vez ubicados los elementos físicos del sistema, se definieron los servicios del sistema de distribución, para lo cual se cuantificó cada acometida entre puntos estratégicos tales como puntos de bifurcación, tanques u otros,

incluyendo detalles como el tipo de prevista, residencial, comercial o mixta.

- Segunda etapa: se realizó un análisis de consumo y demanda (Apéndice 1). Este análisis se realizó con la micromedición provista por la ASADA, lo que involucra únicamente las lecturas del medidor mes a mes, en el lapso de setiembre del año pasado a julio del presente.

Con las lecturas se realizó una cuantificación por mes por cada acometida, además se clasificó a las previstas en residenciales, polleras, lecherías, mixtas y otras, de modo que se obtuvo un promedio de consumo mensual de cada acometida y un promedio de consumo de cada tipo de acometida. Por medio de este estudio se encontraron los patrones de consumo de acuerdo a la clasificación.

Para la realización de una curva de modulación de la demanda se utilizó una curva típica (Haestad, 2006), la cual se modificó en función de las particularidades de la comunidad, y con la colaboración de personal de la ASADA y del ICE.

De acuerdo a la ubicación de nudos de caudal relevante, ubicados a lo largo del trayecto de la red de distribución, se asignaron demandas que corresponden a la mitad de las acometidas aguas arriba y la mitad de aguas abajo del punto. Las acometidas se clasificaron en residenciales, lecherías, polleras y otros. La razón de la clasificación se centró en que, para las demandas residenciales, se tomó un promedio, mientras que para el resto, se localizó a cada una de acuerdo con el consumo específico correspondiente.

- Tercera etapa: analizar el sistema de distribución tal y como opera actualmente.

Para esto se tomaron parámetros, como el índice de agua no contabilizada, y se consideró una curva de modulación de demanda típica que fue modificada ligeramente para amoldar las horas de trabajo de la zona en general. Además se utilizó la ecuación de Darcy –Weisbach para el cálculo de pérdidas de energía por fricción.

Todo lo anterior se introdujo en el programa EPANET, con el cual se simuló el comportamiento hidráulico y de calidad del sistema de distribución y de esta forma se pudo conocer los valores de presión, velocidad y caudal en las diferentes horas del día y trayectos de la conducción.

Con el análisis del sistema actual se tomaron una serie de decisiones de acuerdo a las deficiencias encontradas.

Se modificó entonces el sistema actual introduciendo nuevos parámetros a fin de obtener la calidad y funcionamiento esperado. En EPANET existen opciones que se determinan para que el sistema funcione de cierta forma. Los valores de tiempo introducidos son: 24 y 72 horas es el periodo de estudio, con intervalos de cálculo hidráulico y de calidad de 10 y 5 minutos respectivamente. La hora de inicio de simulación fue a las 12 media noche y se considera conducciones con una rugosidad de 0.09.

Adicionalmente se determina el sistema de unidades que van a ser utilizadas, el cual quedó de la siguiente manera: el caudal, en litros por segundo (l/s), las distancias, en metros (m) y las presiones, en metros columna de agua (m.c.a). En el caso de la curva de modulación utilizada, se incluyó un 10% de índice de agua no contabilizada, con una proyección total de la curva a 20 años.

- Cuarta etapa: los cambios de dimensionamiento de tubería, siempre manteniendo parámetros de velocidad igual o menores a 2.5m/s y un margen de presión entre 10 y 50m.c.a. El material de las conducciones se eligió en polietileno de alta densidad (HDPE).

Para el dimensionamiento de los depósitos se estudiaron tres volúmenes distintos, que al final se suman para alcanzar un volumen óptimo para el sistema. Los tres volúmenes son: volumen de regulación y compensación, volumen contra incendio y volumen de emergencia.

En el volumen de incendio se tomó en cuenta el caudal necesario para los hidrantes normados en el país (Hidrante tipo B), que utilizan un caudal de 32l/s y un tiempo estimado para apagar el incendio de 15 minutos.

En cuanto al volumen de emergencia se consideró un factor de 0.15 del volumen de regulación y compensación.

Para la calidad se fijan valores para de operación en EPANET. El coeficiente de reacción tanto en la pared de la conducción como en el

medio se predeterminó a -0.05, con un orden de reacción en ambos de 1, y la concentración de cloro se debe mantenerse por arriba de 0.5mg/l. Además se asume un modelo de mezcla completa en los depósitos planteados, lo que a su vez influye considerablemente en la predicción de consumo de oxidantes.

De acuerdo a los cambios realizados, se verificó un funcionamiento adecuado de la red en el presente, y para asegurar el correcto funcionamiento en el futuro, se realizó una proyección considerando un factor de crecimiento de la población de 3.5% a un 20 años (Promedio Nacional en Comunidades Rurales).

Una vez establecidos los cambios en el sistema de distribución y verificado su funcionamiento a futuro, se calcularon y cuantificaron los materiales necesarios para poner en funcionamiento el sistema, esto incluye la tubería, cada una de las válvulas y accesorios considerados, una mano de obra asociada a la instalación de los materiales y otros costos que se involucran. Para llevar a cabo esto se consultó diferentes precios en el mercado.

# Resultados y análisis de resultados

## Planimetría e infraestructura

A través de la planimetría realizada por el departamento de Topografía del ICE entre los meses de junio y agosto del presente año, se obtuvo un trazado del sistema de distribución actual, donde se detalla la conducción y la mayoría de los ramales existentes. Ésta es completa y de plena veracidad (Apéndice 08, Lámina 01 y 02).

Sin embargo, no existe la información correspondiente a algunos de los trazos en los que se quiere cambiar la tubería, sobre todo, es muy importante señalar, en cuanto a dos ramales en los que la tubería pasa por propiedades privadas de forma informal y no prevista (Apéndice 08, Lámina 01).

La infraestructura en total se compone de una captación, una red de tuberías, tanques quiebra gradiente y depósitos de almacenamiento.

La captación, a su vez, se compone de un tanque y una galería que colecta el agua de una naciente y una serie de hilos de agua que brotan de una pared de tobas. La estructura se encuentra en condición regular, ya que cuenta con múltiples fugas (Figura 3 y 4).

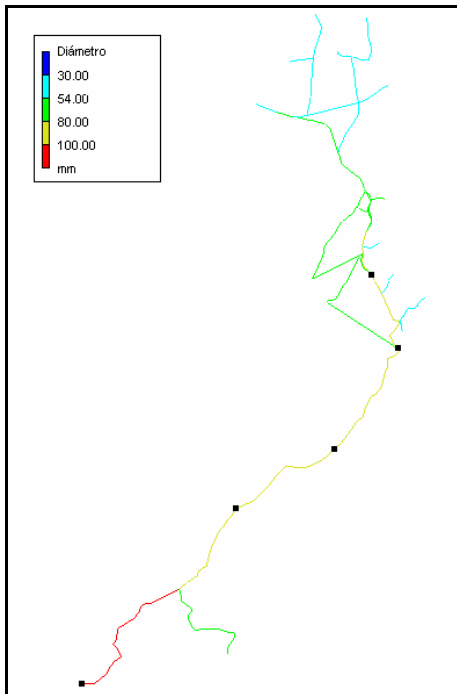


Figura 3. Foto de galería complementaria a captación. (Fuente: La autora)



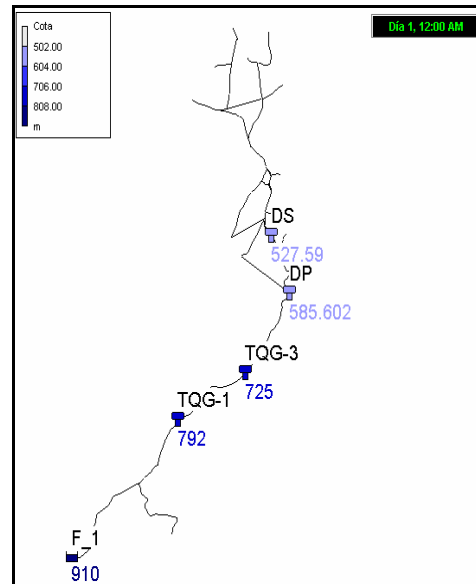
Figura 4. Foto de captación. (Fuente: La autora)

Los tramos de tubería que compone el sistema de distribución de agua potable poseen un estado regular. El material, a todo lo largo, es de tuberías de cloruro de polivinilo (PVC) y se encontró que tiene una amplia variedad de diámetros que varían desde los 150mm nominal en la salida de la captación, hasta 25mm nominal, en algunos de los ramales (la Figura 5). Mayores detalles sobre el estado físico actual de los elementos del sistema, pueden encontrarse en el Apéndice 03.



**Figura 5.** Detalle de variación de diámetros a través del sistema de distribución (Fuente: La autora)

Los depósitos en funcionamiento son en total cuatro, dos de ellos son tanques quebra gradiente (TQG) iguales, tienen un volumen promedio de  $5 \text{ m}^3$ , con válvulas de entrada, salida y de vaciado para su limpieza. Ambos cuentan con rebalse, y se ubican en la parte alta y a lo largo del tendido de conducción principal del sistema de distribución (Figura 6).



**Figura 6.** Ubicación de depósitos y tanques quebra gradiente en el sistema de distribución. (Fuente: La autora)

Los otros dos depósitos son de almacenamiento. El depósito principal (DP) es de  $50 \text{ m}^3$ , tiene válvulas de entrada, salida y de vaciado para su limpieza, también tiene rebalse.

En segundo depósito es el secundario (DS). Posee un volumen de  $18 \text{ m}^3$  y cuenta con las mismas válvulas que los otros tanques, excepto porque este posee boya, de modo que no tiene rebalse (Figura 6).

## Demanda y consumo

La medición de los consumos es de suma importancia para el diseño de un sistema, o su optimización como este caso. Esta medición debe incluir la micromedición (cada usuario), y la macromedición (fuente y sistema completo).

Sin embargo, en el presente proyecto no se cuenta con una macromedición real y confiable, sino únicamente con aforos de los excedentes, medidos en los meses menos críticos. Esto se debió al limitante de tiempo y recurso humano disponible para tal fin.

Las mediciones del excedente de la fuente son 9 y fueron realizadas desde junio hasta agosto del presente año (Apéndice 1). Los resultados tienen una variación importante conforme los meses del año avanzan. En el

Cuadro 4 se puede observar que durante dos meses el rebalse se triplica, lo que indica que la fuente es sensible a través de las estaciones.

Fecha	Caudal (l/s)
21 junio	4.002
22 junio	5.230
28 junio	5.040
06 julio	4.447
12 julio	6.017
19 julio	7.278
24 julio	8.976
09 agosto	13.800
16 agosto	12.976

A pesar de la incertidumbre del caudal real de la fuente, al tener el rebalse y una micromedición se puede realizar un aproximado.

Si se considera el caudal máximo consumido según la micromedición de 6.8 l/s, y a esto se le aplica un 10% de agua no contabilizada (fugas y otros), y se asume 2l/s de rebalse en los meses más secos del año, se puede aproximar el caudal total de la fuente alrededor de 10 l/s, basado en criterios de personal del ICE y la autora.

El análisis de la demanda y patrones de consumo de la comunidad partió de la micromedición de la comunidad. Para lo anterior se realizaron análisis de la demanda total actual, como lo demuestra el Cuadro 5, el cual representa el consumo mensual contabilizado que tiene el sistema, no solo en volumen, sino también en caudal.

Esto indica que el agua que provee actualmente la fuente da abasto para el sistema en la actualidad con cierta holgura.

Es importante analizar los resultados para observar tendencias estacionales, ya que es común que los consumos dependan de la época del año, pero en este caso no se da, pues las dotaciones varían independientemente de la estación. Es posible observar como en los meses más secos del año (de enero a abril) es incluso menor que en la época lluviosa, en especial octubre, uno de los meses más lluviosos, se percibe entonces un desligue de la estación al patrón de consumo.

Mes	Consumo Mensual Total	
	(m <sup>3</sup> )	(l/s)
Octubre	16,429	6.13
Noviembre	14,905	5.8
Diciembre	15,805	5.9
Enero	16,708.	6.2
Febrero	16,482	6.8
Marzo	14,317	5.3
Abril	16,073	6.2
Mayo	16,520	6.2
Junio	16,639	6.4
Julio	15,446	5.8

Con las lecturas de cada prevista con la respondiente clasificación, se realizó un estudio detallado de consumo por cada tipo de acometida, residencial, lecherías, polleras, mixtas y otros.

De acuerdo a la clasificación de acometida, existen tarifas de cobro, éstas consisten en un monto base, que cubre 25m<sup>3</sup>, y un costo por cada metro cúbico adicional. Las tarifas clasificadas se muestran en el Cuadro 6.

Acometida	Base (¢)	Adicional (¢/m <sup>3</sup> )
Residencial	1200	50
Mixta (residencia+lechería)	300	70
Comercial (Lecherías y polleras)	1800	70
Empresarial (Frutas Tropicales)	3500	150

El consumo residencial se determinó a partir de 341 lecturas en el transcurso de los últimos 10 meses, y para cada prevista se consideró un promedio de 5 personas para así obtener una dotación de litros por persona por día (l/p/d).

Las lecturas generaron un promedio por mes como se muestra en el Cuadro 7, que expone dotaciones desde 205 a 250 litros por persona por día, lo que da un promedio de 225l/p/d lo que se encuentra por encima del dato teórico de 200l/p/d según el Acueductos y Alcantarillados, sin embargo, es un dato real y dentro el rango típico en el país. No obstante, se realizó un promedio por la vía alterna: se realizó un

promedio inicial de cada hogar y se promedió este. Esto generó un promedio menor, de 215 l/p/d, por lo tanto, para efectos de diseño, se utilizará el valor de 225l/p/d ya que genera resultados más conservadores.

<b>CUADRO 7. CONSUMO PROMEDIO RESIDENCIAL</b>		
Mes	Consumo Mensual Promedio	
	(m <sup>3</sup> )	(l/p/d)
Octubre	38.82	250
Noviembre	33.18	221
Diciembre	33.70	217
Enero	34.89	225
Febrero	31.19	223
Marzo	31.79	205
Abril	32.31	215
Mayo	37.29	241
Junio	35.27	235
Julio	33.57	217

Para las lecherías se realizó el mismo análisis, y se buscó un patrón de consumo, sin embargo, éste varía considerablemente entre ciertos meses, con consumos relativamente altos. Es por esto que se decidió hacer un análisis individual.

Se estudiaron las 12 lecherías que tienen previstas clasificadas como tal y se notó haciendo entonces la gran diferencia entre los consumos de cada abonado. Existe una relación directa entre el tamaño, los hábitos y el estado de la instalación de cada lechería. Inclusive, si se parte del promedio de 105m<sup>3</sup> por cada una, existen algunas que consumen sobre un 300%. Esto genera datos falsos, que de ser aplicados así, producirían un mal funcionamiento del sistema, ya que son puntos de alto consumo.

<b>CUADRO 8. CONSUMO PROMEDIO EN LECHERÍAS</b>		
Mes	Consumo Mensual Promedio	
	(m <sup>3</sup> )	(l/s)
Octubre	100	0.0373
Noviembre	81	0.0312
Diciembre	89	0.0332
Enero	114	0.0425
Febrero	99	0.0409
Marzo	89	0.0332
Abril	112	0.0432
Mayo	113	0.0422
Junio	109	0.0421
Julio	106	0.0396

<b>CUADRO 9. CONSUMO POR ABONADO LECHERÍAS</b>	
Abonado	Consumo mensual promedio (m <sup>3</sup> )
Ganadera Marsella	33.70
Soc. Hms Méndez	209.60
Calos Alfaro	16.40
Jorge Arce	151.00
Rolando Arce S	108.10
Miguel Molina	23.10
Lucos S.A	71.40
Memo Mejías	73.70
Keneth Rojas	340.60
Asdrúbal Mora M	121.60
Ganadera Nela	75.00
Virgilio Heisy R	38.80

En el caso de las previstas de las polleras, éstas al igual que las lecherías, poseen un alto consumo que igualmente varía en los meses, sin patrón específico. El consumo igualmente depende de cada pollera. Lo anterior crea la necesidad de mantener estas previstas de acuerdo al propietario (Cuadro 10 y 11).

<b>CUADRO 10. CONSUMO PROMEDIO EN POLLERAS</b>		
<b>Mes</b>	<b>Consumo Mensual Promedio</b>	
	<b>(m<sup>3</sup>)</b>	<b>(l/s)</b>
Octubre	108	0.0403
Noviembre	57	0.0220
Diciembre	128	0.0478
Enero	100	0.0373
Febrero	144	0.0595
Marzo	80	0.0299
Abril	159	0.0613
Mayo	118	0.0441
Junio	148	0.0571
Julio	91	0.0340

<b>CUADRO 12. CONSUMO PROMEDIO EN MIXTAS</b>		
<b>Mes</b>	<b>Consumo Mensual Promedio</b>	
	<b>(m<sup>3</sup>)</b>	<b>(l/s)</b>
Octubre	191	0.0713
Noviembre	247	0.0953
Diciembre	195	0.0728
Enero	219	0.0818
Febrero	120	0.0496
Marzo	126	0.0470
Abril	138	0.0532
Mayo	130	0.0485
Junio	177	0.0683
Julio	191	0.0713

<b>CUADRO 11. CONSUMO POR ABONADO POLLERAS</b>	
<b>Abonado</b>	<b>Consumo mensual promedio (m<sup>3</sup>)</b>
Henry Molina	51.17
Henry Molina	115.6
Marvin Salas	192.9
Soc. Hms Méndez	115.5
Calos Alfaro	69.9
La cuna del Pollo	147.2
La cuna del Pollo	67.2
La cuna del Pollo	125.6
Adrián Vargas	84.4
Humberto Molina	66.25
Luis A. Arce	192.4

<b>CUADRO 13. CONSUMO POR ABONADO MIXTAS</b>	
<b>Abonado</b>	<b>Consumo mensual promedio (m<sup>3</sup>)</b>
Heyner Molina	192.20
Seidy Zamora	68.60
Marcos Arce	166.90
Marcos Arce S	101.40
M <sup>a</sup> Carmen Quirós	355.70
Vernal Salas B.	153.00
Israel Zamora G	177.20

Previstas mixtas, lo que significa es que tanto una residencia como una industria son consumidoras, y la industria que típicamente utiliza este tipo es la lechería pues al ser establecimientos pequeños y de manejo familiar en algunos casos se tiene unida a la casa.

Las previstas que están categorizadas así son 7 y mantienen unos consumos semejantes a los de las lecherías, con la misma dependencia de los hábitos del propietario, es decir, varían considerablemente entre una y otra (Ver Cuadro 12).

Existe otra clasificación denominada “otros”, esta se designó para dos establecimientos que no pertenecen a ninguna de las categorías anteriores y que, sin embargo tienen consumos tan altos que es importante ubicarlas en las demandas. Estos establecimiento son la prevista de ICE General la cual pertenece a lo que se conoce como la Colonia de Operadores, y se encuentran ubicadas alrededor de 23 de casas, en donde habitan un aproximado de 69 personas, por lo que su consumo promedio mensual es de 531m<sup>3</sup> por mes.

La otra prevista especial, considerada por la ASADA como empresarial, es la empresa Frutas Tropicales, esta a pesar de poseer agua propia mantiene una prevista con el sistema de distribución de agua potable con una demanda promedio mensual de 413m<sup>3</sup>.

# Análisis hidráulico y de calidad actual

Para hacer un estudio completo y ordenado de un sistema de distribución se realiza un análisis por sectores y, en cada sector, se estudian aspectos de importancia como la calidad del agua, la velocidad, la presión, la concentración de cloro y las pérdidas de energía. En este caso no se entra en detalle en la etapa de cloro, ya que actualmente la red no cuenta con ningún tratamiento.

En el caso de la calidad del agua la fuente (F\_1, Figura 6) ha pasado por un proceso de estudio que confirma su calidad para uso humano. Este estudio del agua contempla múltiples análisis bacteriológicos y fisicoquímicos, tanto en la fuente como en la red de distribución.

Los estudios bacteriológicos (Anexo 3) fueron realizados en el mes de marzo, con muestras de agua obtenidas en la oficina del Proyecto Toro III y en la escuela, y los resultados no fueron satisfactorios para efectos del laboratorio, pues deberían haber presentado un recuento de coliformes fecales de 0 por 100ml, y el resultado fue de 41 y 27 en las respectivas muestras. Sin embargo esto tiene una explicación. Al ser las muestras tomadas en puntos lejanos de la fuente, es posible que se deba a problemas en las tuberías, fugas en las que se permite entrada de material y contactos en general con materia contaminada, así como también es posible que los resultados negativos provengan de posibles zonas de presiones negativas.

Adicional a esto el agua del sistema de distribución no cuenta con ningún sistema de tratamiento, por lo que se requiere de una serie de muestras que se realicen en la naciente directamente, que corroboren lo comentado anteriormente, y con un futuro tratamiento al agua, se podrá dar a la fuente el estatus de "satisfactoria".

Los análisis fisicoquímicos (Apéndice 4) se realizaron durante el presente año, en los meses de enero, marzo, abril y julio. Se tomando 3 muestras en cada estudio y en tres puntos diferentes en cada uno de ellos: la Escuela de Marsella, la fuente directamente y en la oficina del Proyecto de Toro III (Figura 7).

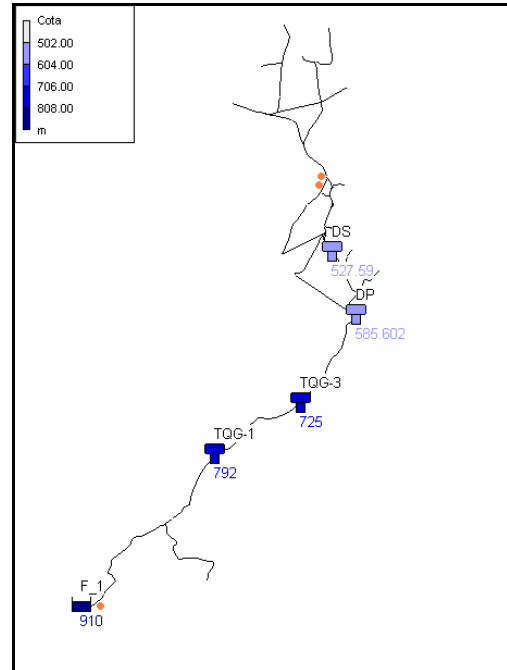


Figura 7. Ubicación de elementos y puntos de muestreo (Fuente: La autora)

Los resultados fueron positivos ya que en todo momento están entre los rangos deseados. En el Cuadro 3 se tabulan los resultados de ph, el cual se debería mantener entre 5 y 9, de modo que se demuestra que cumple, la turbidez es particularmente baja manteniendo por debajo de 2, y el oxido nitroso, (NO-3) es menor a 1, lo ideal se encuentra por debajo de 10, se cumple a cabalidad.

CUADRO 3. RESULTADOS DE ANÁLISIS FISCOQUÍMICOS			
Muestreo	ph	Turbidez	NO-3
1	6.95	1.13	0.45
1	6.75	0.02	0.52
1	6.65	0.47	0.22
2	6.95	1.08	0.28
2	n.r	n.r	n.r
2	7.00	0.45	0.28
3	7.00	0.51	0.5
3	n.r	n.r	n.r
3	7.10	0.2	0.2
4	6.75	0.03	0.47
4	n.r	n.r	n.r
4	6.61	0.32	0.43



Para poder realizar análisis con los factores restantes mencionados al inicio, se debe de estudiar la planimetría del trayecto y puntos extremos.

Para este caso la altura de los puntos extremos es, en el punto más bajo del sistema 410 m.s.n.m. y el de la captación es 910 m.s.n.m., por lo que hay una diferencia de alturas de 500m, lo que produce una presión alta, cuyo manejo debe hacerse con sumo cuidado. La pendiente a través de todo el trayecto es en general constante y de pendiente negativa, como muestran las Figuras 8 y 9.

En la Figura 8 se muestran los puntos del trayecto y con coloración decreciente respecto a la cota, mientras que en la Figura 9 se puede ver el mapa de isolíneas, donde se muestra los cambios de altura por sectores.

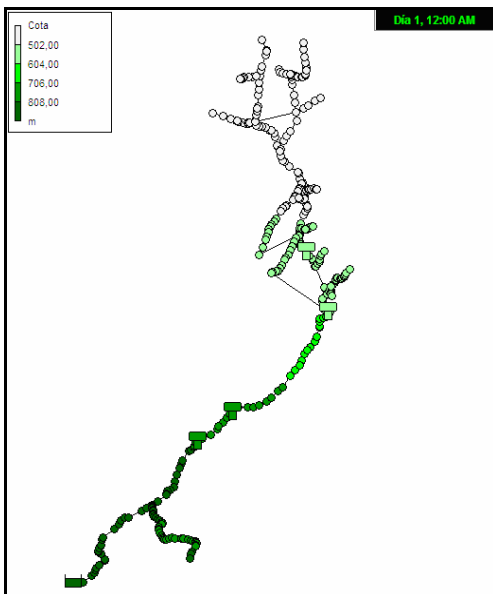


Figura 8. Representación gráfica de altura en el trayecto de la conducción. (Fuente: La autora)

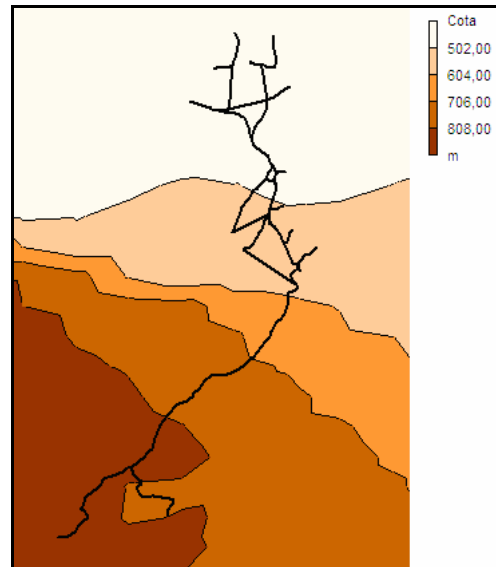


Figura 9. Mapa de isolíneas del terreno (Fuente: La autora).

Debido a la diferencia de alturas se debe trabajar con una sectorización de zonas de presión, para mantener las presiones en rangos aceptables. Este rango de presiones debe mantener presiones mayores a 10 m.c.a y menores de 50 m.c.a, lo cual actualmente no ocurre en Marsella.

Como evidencia de la mala sectorización de las zonas de presión, se muestra la ubicación de los tanques quiebra gradiente (TQG 1 y 3) y los depósitos (DP y DS), Figura 10.

La Figura 10 muestra déficit de estructuras que quiebren la presión y, al existir un tanque quiebra gradiente en la cota 792 m.s.n.m, con 118m de la captación y el segundo tanque quiebra gradiente a 725msnm, existe una diferencia entre tanques de 67m, lo que representa que hay sectores con presiones de 67 y 118 m.c.a, excesivas y dañinas para el correcto funcionamiento. Con respecto al depósito principal a 585m.s.n.m y el segundo tanque quiebra gradiente existen 140m.c.a, luego entre el depósito principal y el secundario existen 58m.c.a, de modo que las presiones sobrepasan el límite de 50m.c.a establecido por el AyA (Reglamento técnico para diseño y construcción de urbanizaciones, condominios y fraccionamientos, 2007).

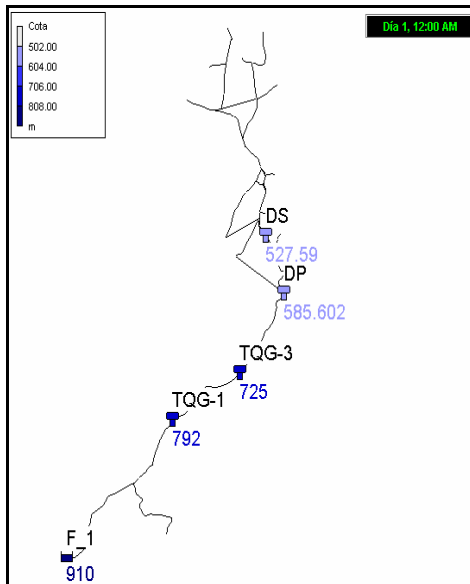


Figura 10. Ubicación de depósitos y tanques quebra gradiente en el sistema de distribución. (Fuente: La autora)

El volumen de almacenamiento total del sistema, tal y como esta operando, es de  $68\text{m}^3$ , ya que los volúmenes del depósitos principal y el secundario son de  $50$  y  $18\text{m}^3$  respectivamente

Al estudiar el consumo, se encontró un caudal medio diario (QMD) del sistema de  $6.314\text{ l/s}$ , lo que es lo mismo que  $545\text{m}^3/\text{día}$ , volumen promedio diario (VPD). Las normas del AyA para el dimensionamiento de depósitos de almacenamiento indican que lo que debe existir es: un 25% del VPD para el volumen de equalización, un 15% para el volumen de emergencia y un volumen contra incendio que cubra el caudal necesario de un hidrante clase B ( $32\text{ l/s}$ ) por 15 minutos, lo que resulta en  $29\text{m}^3$ . La suma de estos volúmenes indica  $247\text{m}^3$ , esto significa que el sistema cuenta con un 28% de lo que debería tener. Esto deja en evidencia que el sistema de distribución cuenta con un serio problema de almacenamiento en la actualidad, sin considerar de ninguna manera su funcionamiento futuro.

El problema se incrementa debido a la ausencia de válvulas de flotación o dispositivo de control (boyas) en los tanques quebra gradiente y el depósito principal, lo que indica que, en horas de menor consumo estos rebalsan (Figura 11)



Figura 11. Foto del rebalse en tanque quebra gradiente (Fuente: La autora)

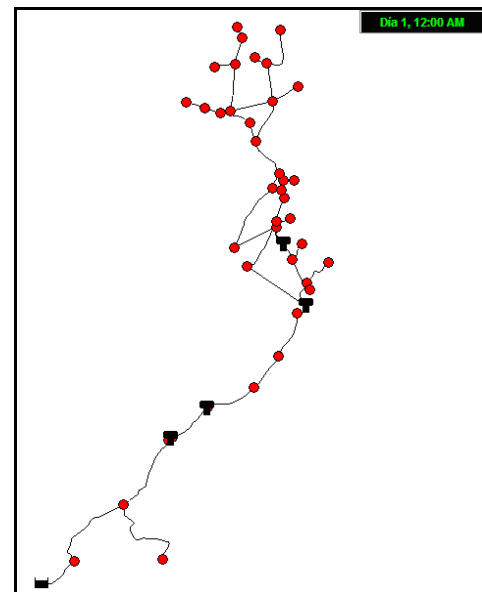


Figura 12. Puntos de consumo en el sistema de distribución (Fuente: La autora).

La situación se agrava al estudiar la ubicación de los puntos de consumo, ya que estos se encuentran concentrados en los sectores más bajos y llanos del sistema de distribución, como se muestra en la Figura 12. Además, la pobre sectorización de zonas de presión (Figura 10) debida a la falta de depósitos quebra gradiente, del limitado tamaño de los existentes y a su mala ubicación, no permite abastecer la energía necesaria en las horas de consumo máximo.

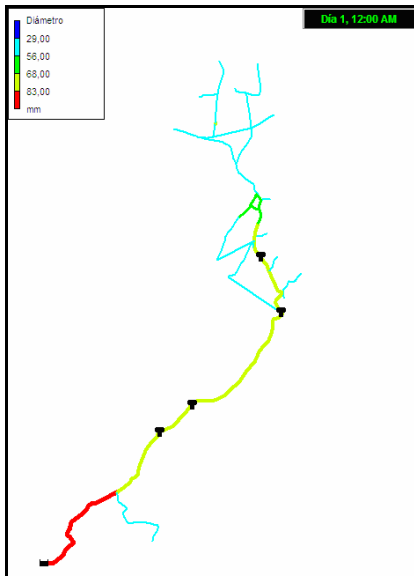


Figura 13. Representación de diámetros y ubicación de los depósitos (Fuente: La autora)

Utilizando los resultados del análisis de consumo y de acuerdo a los criterios de asignación de la demanda indicados en la metodología, se realizó un análisis hidráulico en periodo extendido. Para esto se manejó una curva de modulación de consumo típico, no se realizó una con información de campo debido al limitante de tiempo. La curva utilizada es de 24 horas de duración y se ajustó ligeramente a la comunidad en base a información dada por el fontanero de la ASADA. Es de importancia mencionar nuevamente que no existe macromedición, por lo tanto no es posible el cálculo del índice de agua no contabilizada (IANC), sin embargo se ajustó la curva de modulación con un 10% de éste.

Un factor adicional en los problemas de la red de distribución actual es que, en la zona de mayor concentración de puntos de consumos, (en la parte baja y plana), la conducción es de diámetros de 50mm nominal. Lo anterior se traduce a un alto consumo de la energía disponible en la distribución a las horas de alto consumo. Por el contrario, en las horas de menor consumo el problema cambia, pues se presentan presiones hidrostáticas de hasta 100m.

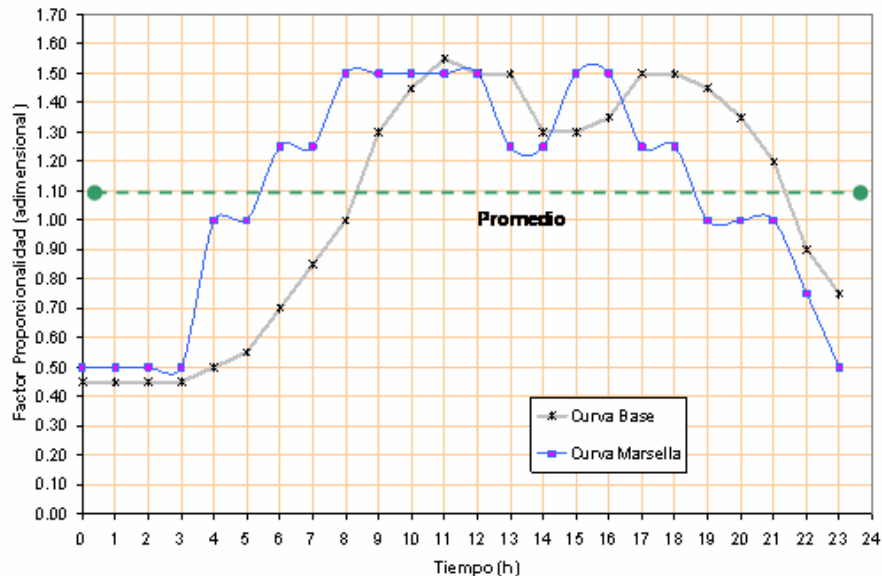


Figura 14. Curva de modulación, típica y de Marsella. Factor proporcional vrs tiempo. (Fuente: La autora)

La Figura 14 grafica la comparación entre la curva de la demanda base actual y la curva de la demanda modulada base. La demanda actual base se realizó a partir de los registros del consumo real de la comunidad. Una vez determinada la curva de modulación, se incluyó un índice de agua no contabilizada de 8.98%.

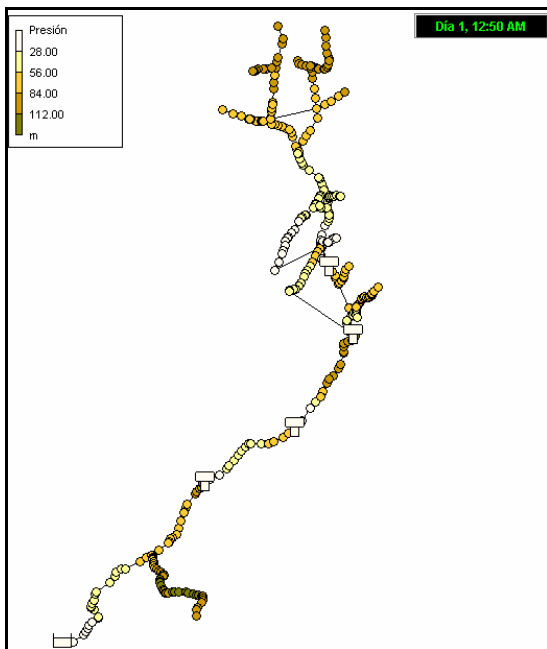
<b>CUADRO 14. ANÁLISIS ACTUAL DE DEMANDAS</b>		
<b>Nudo</b>	<b>ACTUAL</b>	
	<b>Demanda Base (l/s)</b>	<b>Demanda modulada (l/s)</b>
NR_193	0.0195	0.0213
NR_37	0.0240	0.0262
N_71	0.026	0.0283
N_96	0.0305	0.0332
NR_44	0.0456	0.0497
NR_29	0.0470	0.0512
N_90	0.0521	0.0568
N_8	0.0565	0.0616
N_138	0.0586	0.0639
N_75	0.0586	0.0639
NR_161	0.0651	0.0709
NR_178	0.0651	0.0709
N_86	0.0781	0.0851
NR_154	0.0787	0.0858
NR_68	0.0814	0.0887
N_121	0.0911	0.0993
NR_133	0.0911	0.0993
NR_121	0.1032	0.1125
NR_69	0.1107	0.1206
NR_64	0.1154	0.1258
NR_152	0.1243	0.1355
N_106	0.1324	0.1443
N_42	0.1337	0.1457
N_62	0.1375	0.1498
NR_162	0.1659	0.1808
NR_168	0.1663	0.1812
N_103	0.1888	0.2057
N_129	0.2083	0.2270
N_24	0.2118	0.2308
NR_135	0.2214	0.2413
NR_141	0.2214	0.2413
NR_148	0.2279	0.2484
N_82	0.2750	0.2997
NR_22	0.2865	0.3122
N_137	0.2937	0.3201
NR_172	0.3124	0.3406
N_58	0.3139	0.3421
NR_221	0.3149	0.3432
N_109	0.3410	0.3716
N_94	0.3451	0.3761
N_50	0.3933	0.4286
<b>TOTAL</b>	<b>6.3139</b>	<b>6.8806</b>
<b>IANC (%) f (curva de modulación)</b>		<b>8.9760</b>

La curva de modulación escogida se introdujo al programa EPANET y se resolvieron los problemas presentados por la conexión de elementos y otros, para así proceder al cálculo hidráulico del sistema de distribución completo.

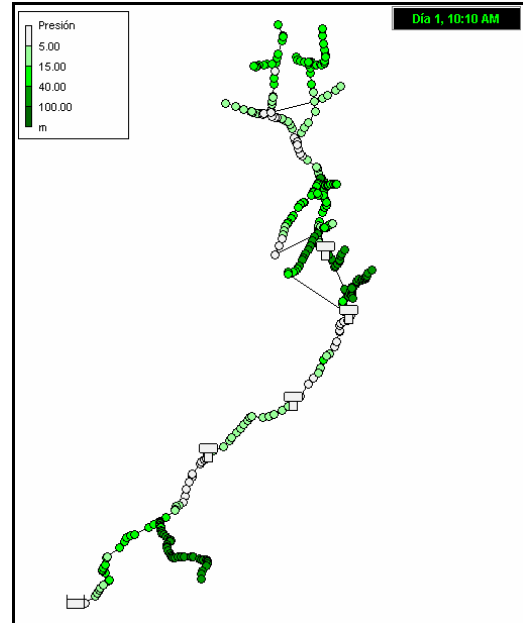
Para esto se determinó una duración total de la simulación de 24 y 72 horas, con intervalos de cálculo hidráulico de 10 minutos (Apéndice 03).

En la Figura 15 se muestra la presión dinámica en toda la extensión del sistema, a las 12:50 a.m., con 50 minutos de iniciada la simulación. A esta hora la demanda es de 40% del caudal medio diario, de acuerdo a la curva de modulación, y la presión en la entrada de los tanques quiebra gradiente ya es mayor a los 100 m.c.a, semejante a las presiones presentes en los sectores más bajos de la red, con presiones de 80 y 100 m.c.a.

Por el contrario en la Figura 16, se representa las presiones dinámicas a las 10:10 a.m., cuando según la curva de modulación, la demanda es de 150% el caudal medio diario. En este caso la mayoría de presiones varían entre 5 y 10 m.c.a en puntos de la red. Esto refleja lo comentado por los usuarios a los encargados de la ASADA.



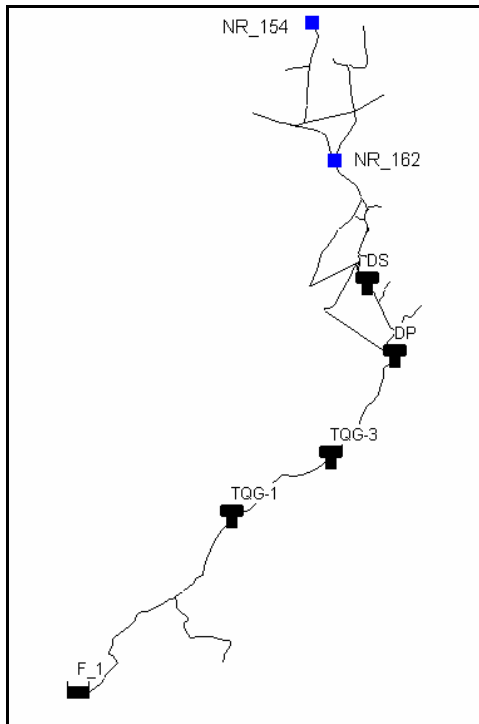
**Figura 15** Representación de las presiones a las 12:50 a.m. (Fuente: La autora)



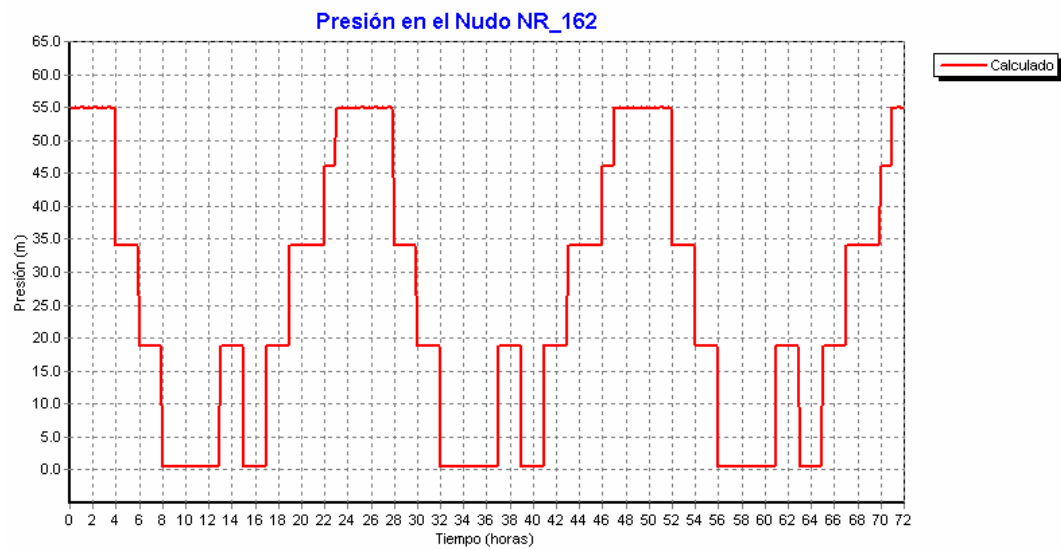
**Figura 16.** Representación de las presiones a las 10:00 a.m. (Fuente: La autora)

Esta variación de las presiones es tan marcada que en los sectores alimentados por el depósito secundario, que pasan de presión excesivamente altas a en la noche, a presiones muy bajas, cercanas a cero en horas de la mañana con el consumo máximo, acorde con lo que comentan los usuarios, de escasez de agua a ciertas horas.

Ejemplo de esto es el nudo NR\_162 (Figura 17), cuya presión varía en más de 55m en 24 horas.

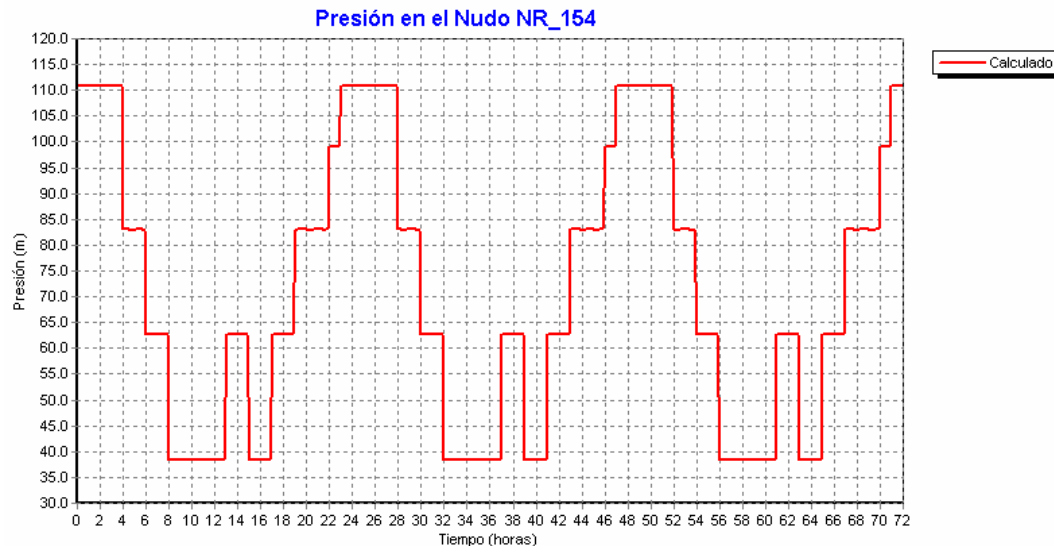


**Figura 17.** Ubicación de los puntos NR\_162 y NR 154.  
(Fuente: La autora)



**Figura 18.** Gráfico de presión en el nudo NR\_162. Presión (m.c.a) vrs tiempo (horas)  
(Fuente: La autora)

Aún más extrema es la situación que se presenta en el nudo NR\_154, cuyas presiones no llegan a valores cercanos a cero, por el contrario, se mantienen altas hasta presiones de sobre 110m.



**Figura 19.** Gráfico de presión en el nudo NR\_154. Presión (m.c.a) vrs tiempo (horas).  
(Fuente: La autora)

El sistema de distribución en general presenta un escenario que, con cada factor se agrava más, esto debido a la unión de deficiencias en aspectos vitales como las sectorización de zonas de presión, la falta de volumen de almacenamiento, ausencia de controles y comandos y más importante aún, una carencia de área hidráulica, ya que las tuberías cuentan con diámetros reducidos, en especial los ramales, cuyos diámetros promedian en 50mm en los de mayor concentración de consumo.

El conjunto de deficientes de área hidráulica señaladas indican un aspecto importante para el funcionamiento de una red de distribución, la velocidad de flujo en la tubería.

En la Figura 20 se muestra como, inclusive en horas de la madrugada con el consumo mínimo, en flujo en las tuberías, en especial aguas arriba de los depósitos donde el diámetro es el mayor (75mm ó 100mm), tiene velocidades por encima de 2m/s, debido a que los depósitos no tienen controles y se rebalsan constantemente, lo que permite la generación de tales velocidades.

Comparando la Figura 20 y la distribución de diámetros en la 21.

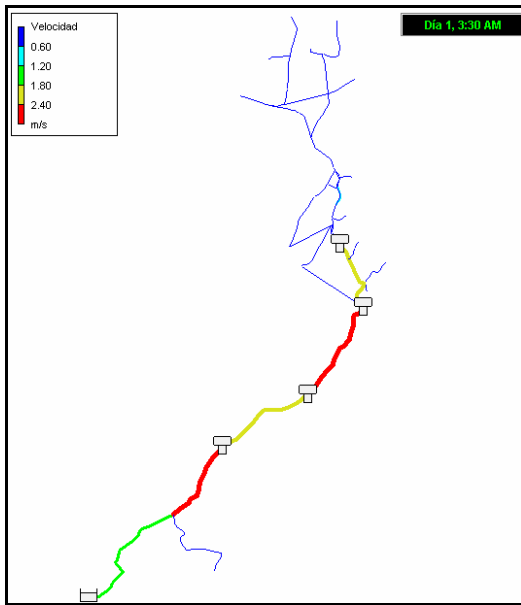


Figura 20. Representación de velocidad de flujo en las tuberías, a las 3:30a.m (Fuente: La autora).

Las velocidades disminuyen a las horas de mayor consumo. Por ejemplo a las 10:10 a.m (Figura 21) ya las velocidades están entre 0.2 y 1.5m/s, pero a pesar de ser bastante más bajas, igual se puede presentar una alta pérdida de energía, debida a la falta de sectorización de zonas de presión ya mencionada. Un ejemplo esta línea T87, ubicada aguas abajo del depósito secundario.

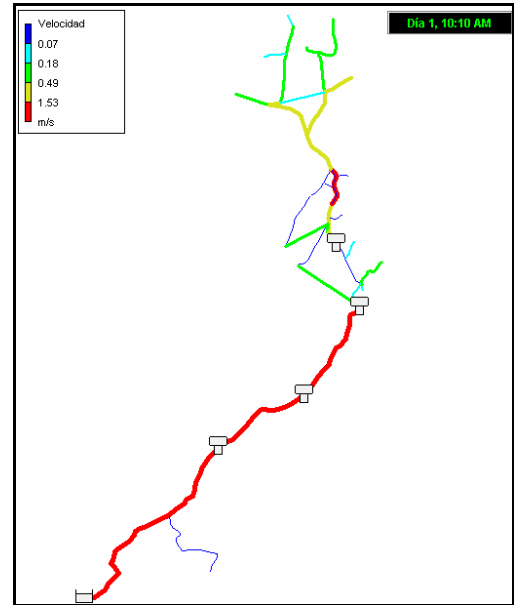


Figura 22. Representación de velocidad de flujo en las tuberías, a las 10:10a.m. (Fuente: La autora)

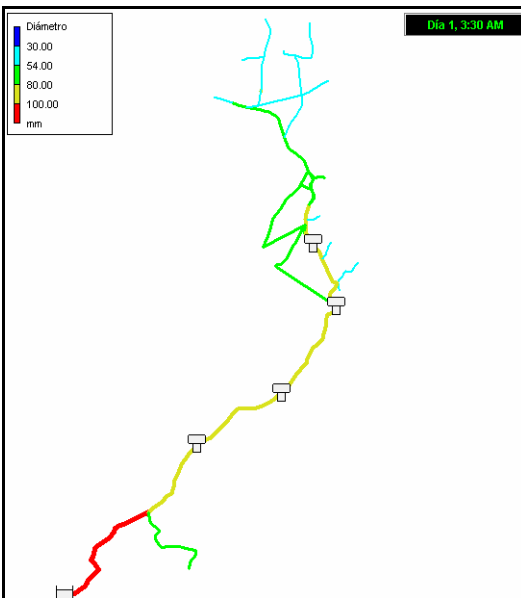
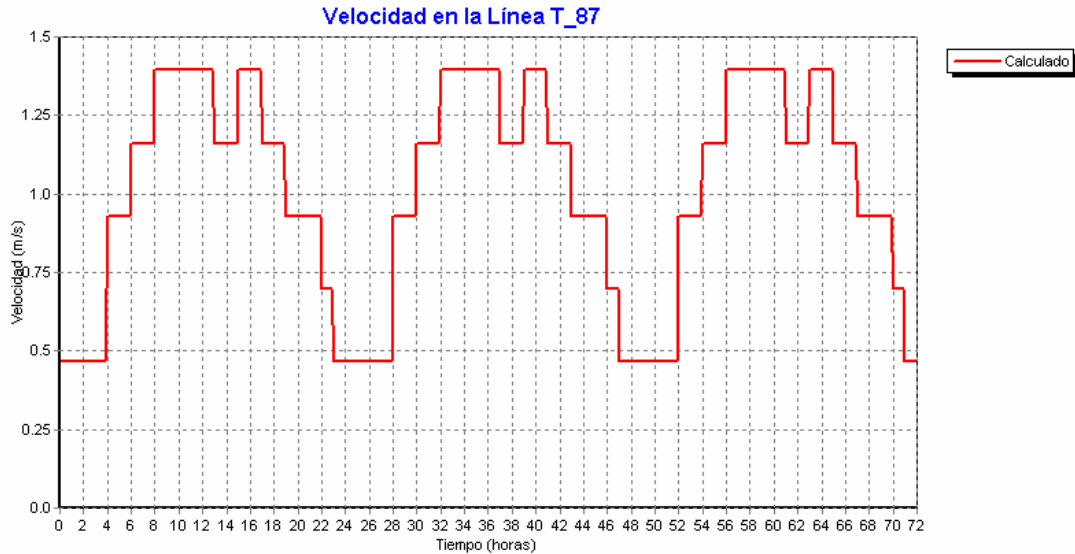


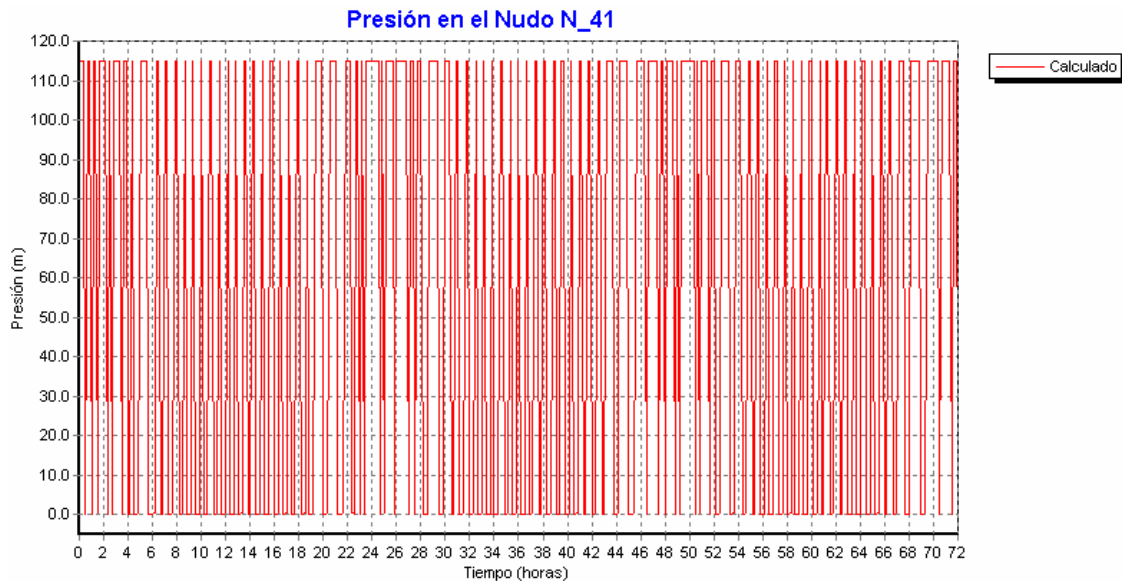
Figura 21. Representación de diámetros en las tuberías. (Fuente: La autora)





**Figura 23.** Gráfico de velocidad en la línea T\_87. Velocidad (m/s) vrs tiempo (horas).  
(Fuente: La autora).

Al estudiar el funcionamiento del sistema de distribución, también se debe analizar la seguridad de la infraestructura presente. La ausencia de controles y comandos que produce un constante cambio de presiones conocido como “transitorios hidráulicos o golpes de ariete” debido al abrir y cerrar de válvulas de manera súbita, genera en un efecto negativo y de alta peligrosidad.



**Figura 24.** Gráfico de presión en el nudo N\_41. Presión (m.c.a) vrs tiempo (horas).  
(Fuente: La autora)

La Figura 24, muestra las variaciones de presión mencionadas en el nudo N\_41 (aguas arriba del primer tanque quebra gradiente, TQG1), variaciones desde de casi cero hasta alrededor de 120m.c.a, esto en cuestión de segundos. Esto no solo afecta por los cambios constantes de presión, sino también porque llega a presiones no deseadas en ningún lapso (demasiado altas y bajas), pues a parte de los problemas de funcionamiento que esto produce en el servicio de agua como tal, afecta el estado físico de las tuberías. Eventualmente daña las líneas, produciendo fugas subterráneas.

Los Cuadros 01 y 02 del Apéndice 03, muestran un resumen de los parámetros dinámicos en todo el sistema (incluyendo nudos y línea) para las condiciones críticas de máximas presiones y mínimo consumo (1:00 AM) y para la hora de máximo consumo (11:00 AM). Además se incluyen valores promedio para las 72 horas.

Una vez completado el análisis de todo el sistema de distribución de agua actual de Marsella, se pueden identificar las deficiencias del sistema:

- Poca sectorización de las zonas de presión.
- Poca capacidad de crecimiento en las demandas
- Diámetros insuficientes en tuberías, tanto de conducción como de distribución.
- Escaso volumen de almacenamiento
- Rebalse, sobrepresiones y transitorios debido a falta de controles.
- Ausencia de macromedición.
- Ausencia de tratamiento del agua.

# Análisis hidráulico y de calidad de sistema optimizado

## Sectorización de presiones

La primera acción que se debe tomar para el correcto funcionamiento del sistema de distribución es la sectorización a cada 50m de elevación, aplicado a las líneas de conducción, distribución y ramales. Para esto se utilizarán válvulas reductoras de presión junto con válvulas de alivio, de modo que prevengan daños a la tubería por sobrepresiones.

Con este cambio anterior, los rangos de presión, se mantienen entre el valor de consigna (10 a 20m) hasta 60m como máximo.

Un ejemplo de esto es la válvula VZPP-2 (válvula de zona de presión principal 2, conectada entre los puntos CN\_10 y N40), la cual se ubicará en la conducción principal. En la Figura 26, se muestra el comportamiento de presión de ambos puntos, en donde es visible el punto (CN\_40, aguas arriba) la variación de apenas 7m en periodos de 24h, ésta variación es en el rango máximo permisible de presiones hidrostáticas. En la misma gráfica se aprecia el punto aguas debajo de la válvula, cuya presión se mantiene constante en el valor de consigna, de 10m.

De la misma forma ocurrirá en la siguiente zona de presión, establecida por VZPP-3, (válvula de zona de presión principal 3, Figura 25), entre puntos CN\_49 y N\_49, cuyas presiones se mantiene en los mismos rangos, tanto aguas arriba como aguas abajo (Figura 27).

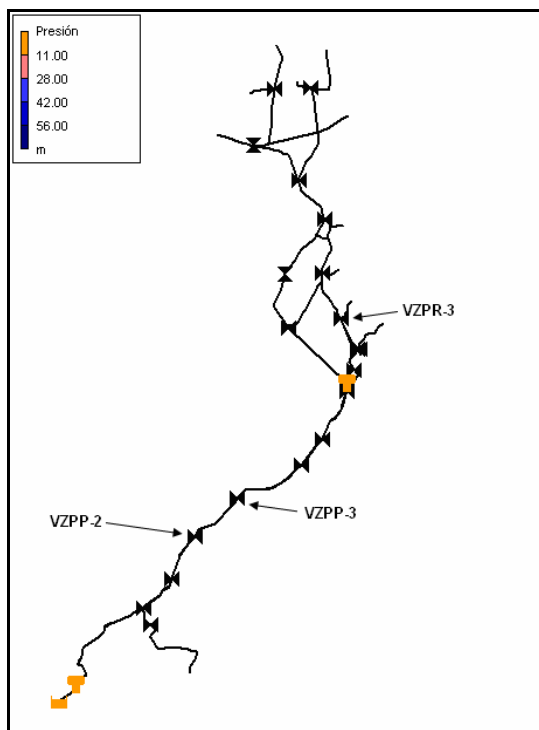

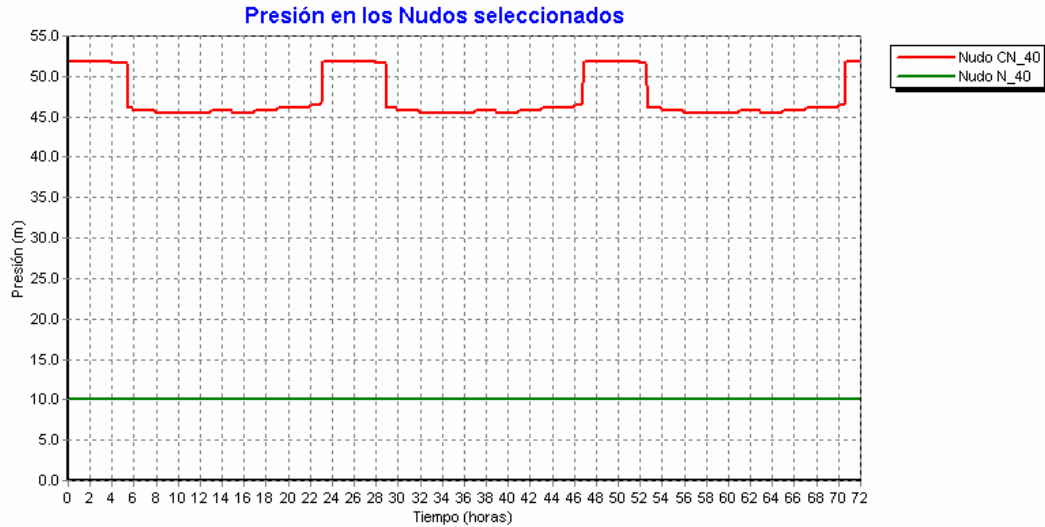
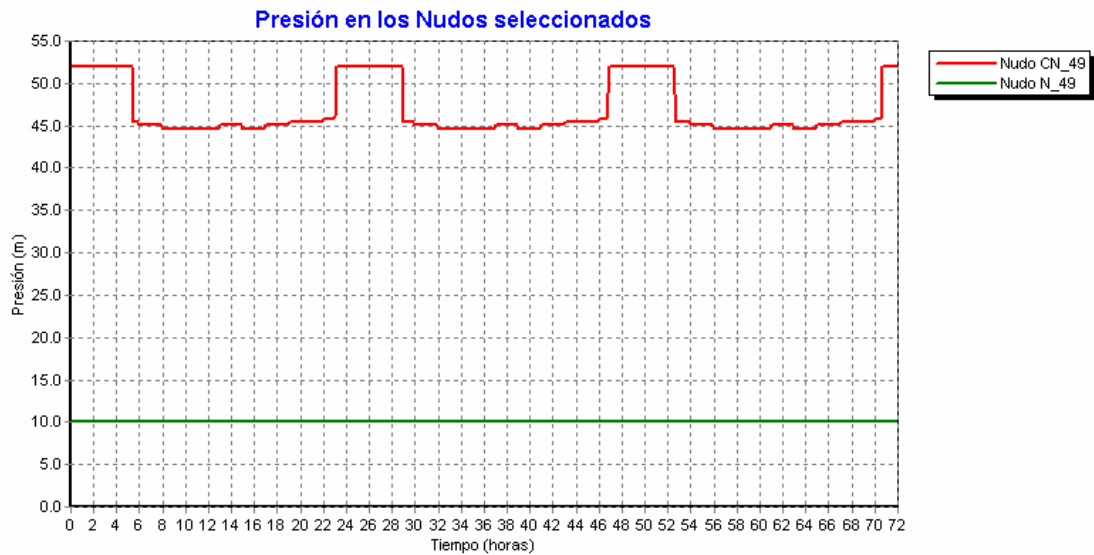


Figura 25. Representación de conjuntos de válvulas.  
(Fuente: La autora)

En la Figura 25 se muestran la distribución de válvulas (representadas por el siguiente símbolo ) , éstas establecen las zonas de presión.



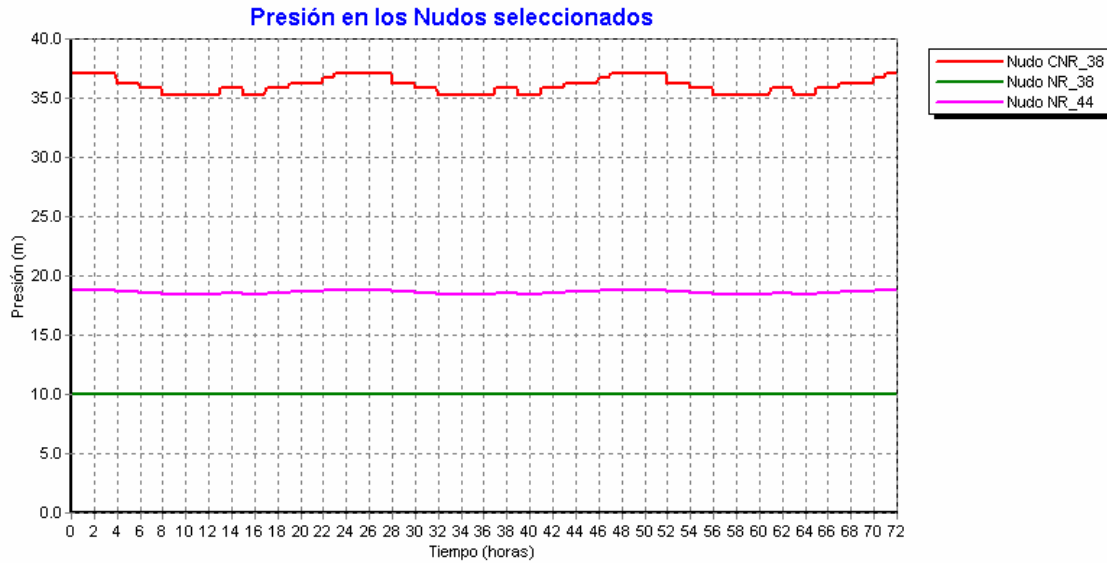
**Figura 26.** Gráfico de presión en los nudos CN\_40 y N\_40. Presión (m.c.a) vrs tiempo (horas).  
(Fuente: La autora)



**Figura 27.** Gráfico de presión en los nudos CN\_49 y N\_49. Presión (m.c.a) vrs tiempo (horas).  
(Fuente: La autora)

En la Figura 28 se muestra la zona de presión limitada por la válvula VZPR-3 (válvula de zona de presión en ramal 3, Figura 24), conectada entre los nudos CNR\_38 y NR\_38. Esta válvula enlaza la línea de la conducción principal con la del Ramal 2 Subestación (Apéndice 08, Lámina 03). Al igual que las anteriores se mantienen un valor de consigna de 10m en la entrada de la tubería del ramal. En la Figura 28 se observan 3

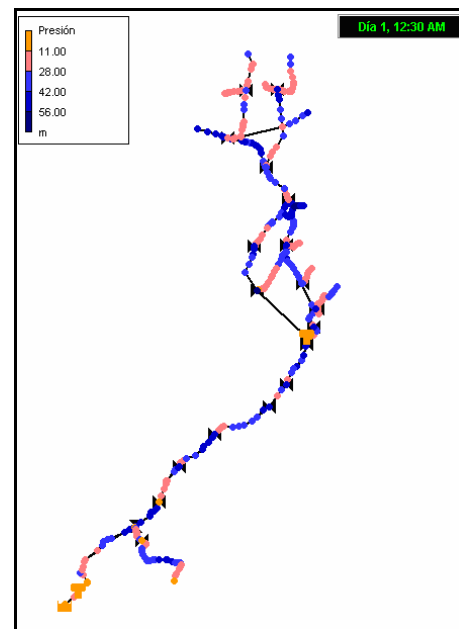
puntos, el nudo aguas arriba de la válvula (perteneciente a la conducción principal), aguas debajo de la válvula y en el final del ramal. La carga aguas arriba de la válvula se mantiene variando entre 35 y 37m.c.a, mientras que en el último nudo de consumo, la presión se mantiene prácticamente estable en 18m.c.a, durante las 72 horas simuladas.



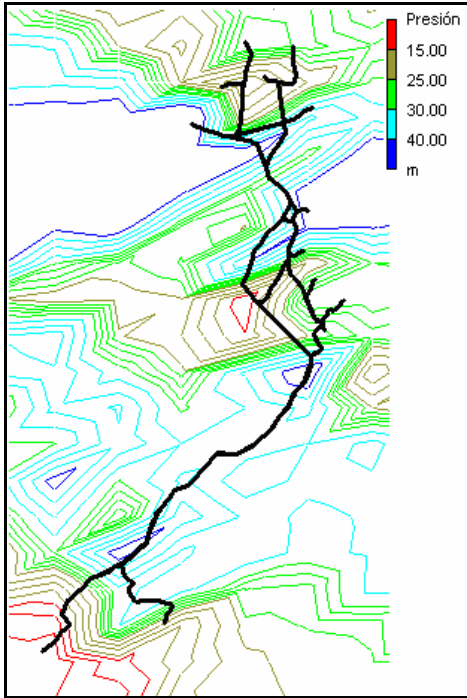
**Figura 28.** Gráfico de presión en los nudos CNR\_38, NR\_38 y NR44. Presión (m.c.a) vrs tiempo (horas).  
(Fuente: La autora)

Como muestra de la distribución de presiones en todo el sistema, de acuerdo a las zonas de presión establecidas por los controles, se muestra la Figura 29 y el contorno de presiones en la Figura 30.

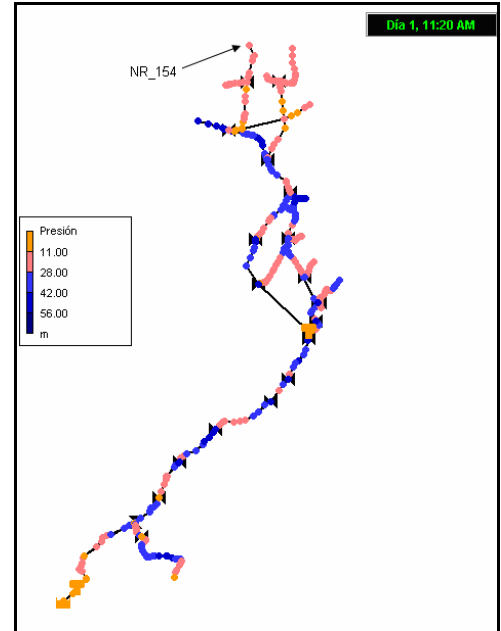
En las figuras mencionadas se muestran las presiones en el sistema a las 12:30a.m del primer día de análisis. En estas se aprecia que, aguas debajo de cada válvula reguladora de presión, las cargas piezométricas son cercanos a 10m (tonos claros), el valor de consigna. De la misma manera se muestra como, conforme avanza el trazo y las cotas disminuyen, se gana presión (tonos azules), hasta llegar a valores máximos permisibles de alrededor de 50m.



**Figura 29.** Representación de las zonas de presión establecidas por controles a las 12:30.  
(Fuente: La autora)



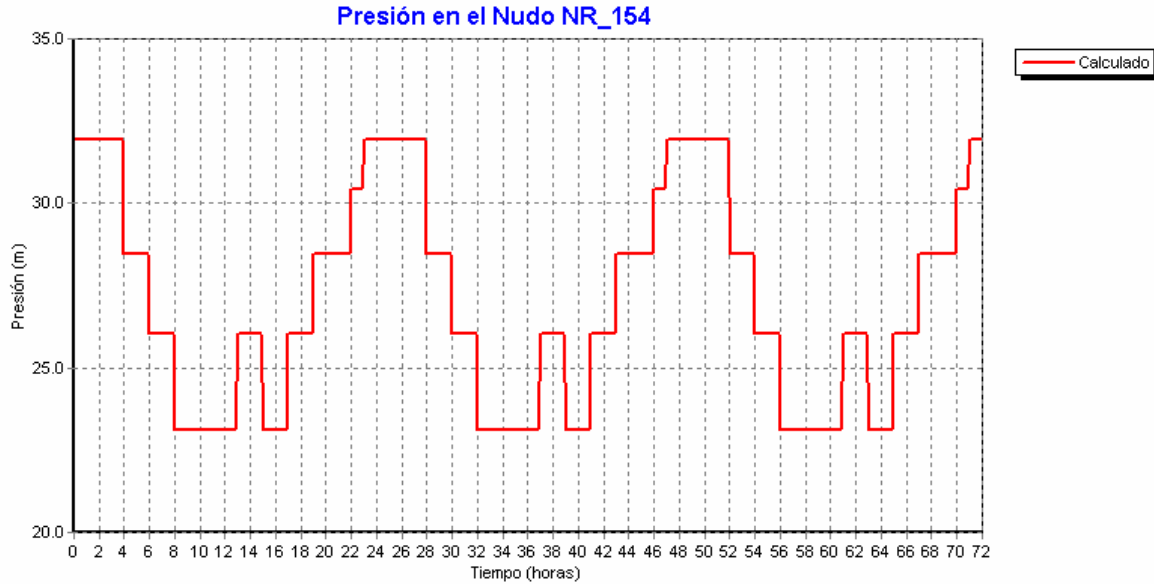
**Figura 30.** Contorno de distribución de presiones a lo largo de todo el sistema de distribución. (Fuente: La autora)



**Figura 31.** Representación de las zonas de presión establecidas por controles a las 11:20a.m. (Fuente: La autora)

De forma similar, la Figura 31 refleja la operación del sistema a las 11:20a.m. del primer día de simulación. Se nota aquí el declive de presiones en todo el sistema, esto debido al aumento horario de la demanda. No obstante, a diferencia del sistema en operación actual, las presiones no descienden por debajo de 10m.

En la Figura 31 se puede observar con más detalle la variación del nudo NR\_154 (Figura 31), ubicado en la cota 407.234m, el punto más bajo de la red, y donde se presenta variación de presión entre 24 y 32m en todo el periodo de análisis.



**Figura 32.** Gráfico de presión en el nudo NR\_154. Presión (m.c.a) vrs tiempo (horas).  
(Fuente: La autora)

## Proyección de demanda

Para cubrir el crecimiento anual de la población se utilizó un periodo de 20 años. La proyección de crecimiento de la población para la comunidad de Marsella, de acuerdo al Análisis Situacional de Salud, de la Caja Costarricense de Seguro Social en Venecia del 2005, es de 1.7%. Sin embargo se decidió utilizar 3.5%, valor más conservador utilizado por el AyA. Esto se refleja en la curva de modulación introducida a EPANET para 20 años.

En esta curva de modulación de la demanda horaria (Figura 33) se aprecia claramente la misma variación, con valores mayores del factor proporcional, con un aumento de 185%, equivalente a un aumento de 170% del aumento multiplicado por 9.1% para el índice de agua no contabilizado, concluyendo así en una demanda modulada de 11.71l/s.

CUADRO 15. PROYECCIÓN DE DEMANDA A 20 AÑOS				
Tiempo (años)	Demanda (l/s)	Factor de crecimiento	Compensación IANC	Demanda modulada (l/s)
1	6.5349	1.0350	1.1279	7.1293
2	6.7559	1.0700	1.1660	7.3704
3	6.9769	1.1050	1.2042	7.6115
4	7.1978	1.1400	1.2423	7.8526
5	7.4188	1.1750	1.2805	8.0937
6	7.6398	1.2100	1.3186	8.3348
7	7.8608	1.2450	1.3568	8.5759
8	8.0818	1.2800	1.3949	8.8169
9	8.3028	1.3150	1.4330	9.0580
10	8.5238	1.3500	1.4712	9.2991
11	8.7448	1.3850	1.5093	9.5402
12	8.9657	1.4200	1.5475	9.7813
13	9.1867	1.4550	1.5856	10.0224
14	9.4077	1.4900	1.6237	10.2635
15	9.6287	1.5250	1.6619	10.5046
16	9.8497	1.5600	1.7000	10.7457
17	10.0707	1.5950	1.7382	10.9867
18	10.2917	1.6300	1.7763	11.2278
19	10.5126	1.6650	1.8145	11.4689
20	10.7336	1.7000	1.8526	11.7100

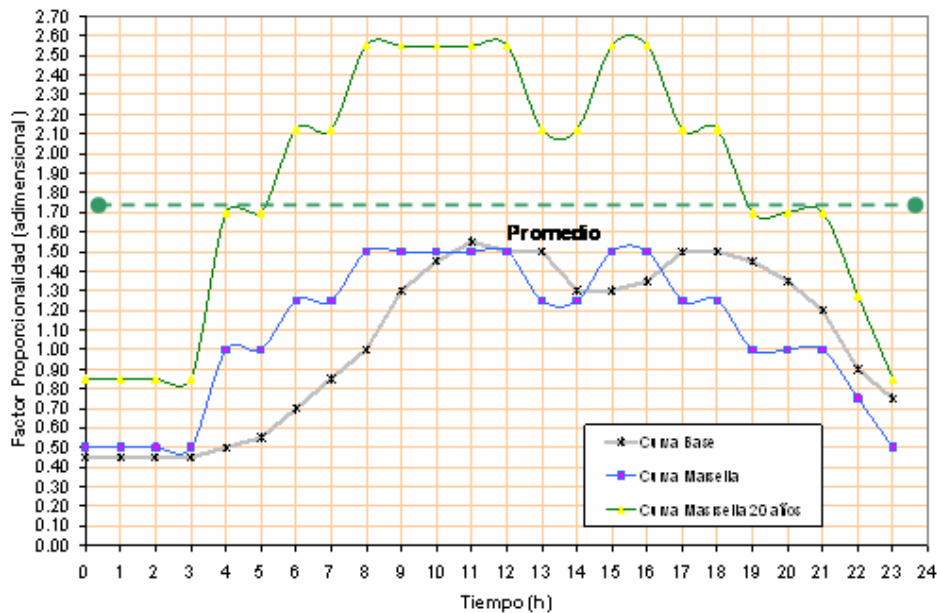


Figura 33. Curva de modulación, típica y de Marsella en tiempo actual y a 20 años. Factor proporcional vrs tiempo. (Fuente: La autora)



En el Cuadro 16 se muestra un balance de masa formulado por EPANET de acuerdo con las demandas introducidas, por lo que se mantiene consistencia en las demandas moduladas previstas con las que el modelo proyecta, en ambos casos la demanda es de 11.71 l/s, incluyendo un 9.1% de índice de agua no

contabilizada. Este valor indica, que si las estimaciones realizadas de la capacidad de la naciente son correctas, la naciente es incapaz de suministrar el caudal completo que requiere la comunidad a los 20 años proyectados, presentando un déficit de 3 l/s.

<b>CUADRO 16. ANÁLISIS DE LA DEMANDA A 20 AÑOS</b>			
<b>Nudo</b>	<b>Demanda Base (l/s)</b>	<b>Demanda Proyectada(l/s)</b>	<b>Demanda modulada (l/s)</b>
NR_193	0.0195	0.0332	0.04
NR_37	0.024	0.0408	0.04
N_71	0.026	0.0442	0.05
NR_226	0.0293	0.0498	0.05
N_94	0.0293	0.0498	0.05
N_96	0.0305	0.0519	0.06
NR_44	0.0456	0.0775	0.08
NR_29	0.047	0.0799	0.09
NR_122	0.0521	0.0886	0.1
N_9	0.0565	0.0961	0.1
N_138	0.0586	0.0996	0.11
NR_161	0.0651	0.1107	0.12
NR_178	0.0651	0.1107	0.12
N_41	0.0669	0.1136	0.12
N_42	0.0669	0.1136	0.12
N_86	0.0781	0.1328	0.15
NR_154	0.0787	0.1338	0.15
NR_68	0.0814	0.1384	0.15
N_121	0.0911	0.1549	0.17
NR_133	0.0911	0.1549	0.17
NR_121	0.1032	0.1754	0.19
NR_69	0.1107	0.1882	0.21
NR_64	0.1154	0.1962	0.21
NR_152	0.1243	0.2113	0.23
N_106	0.1324	0.2251	0.25
N_62	0.1375	0.2338	0.26
NR_200	0.1575	0.2677	0.29
NR_221	0.1575	0.2677	0.29
NR_192	0.1659	0.282	0.31
NR_168	0.1663	0.2827	0.31
NR_141	0.1693	0.2878	0.31
N_103	0.1888	0.321	0.35
N_129	0.2083	0.3541	0.39
N_24	0.2118	0.3601	0.39
NR_135	0.2214	0.3764	0.41
NR_148	0.2279	0.3874	0.42
N_82	0.275	0.4675	0.51
NR_22	0.2865	0.4871	0.53
NR_8	0.2865	0.4871	0.53
N_137	0.2937	0.4993	0.55
NR_172	0.3125	0.5313	0.58
N_58	0.3139	0.5336	0.58
N_50	0.3933	0.6686	0.73
N_109	0.4517	0.7679	0.84
TOTAL	0.3139	10.7336	11.71
IANC (%) f (curva de modulación)			9.0964

## Dimensionamiento de tuberías

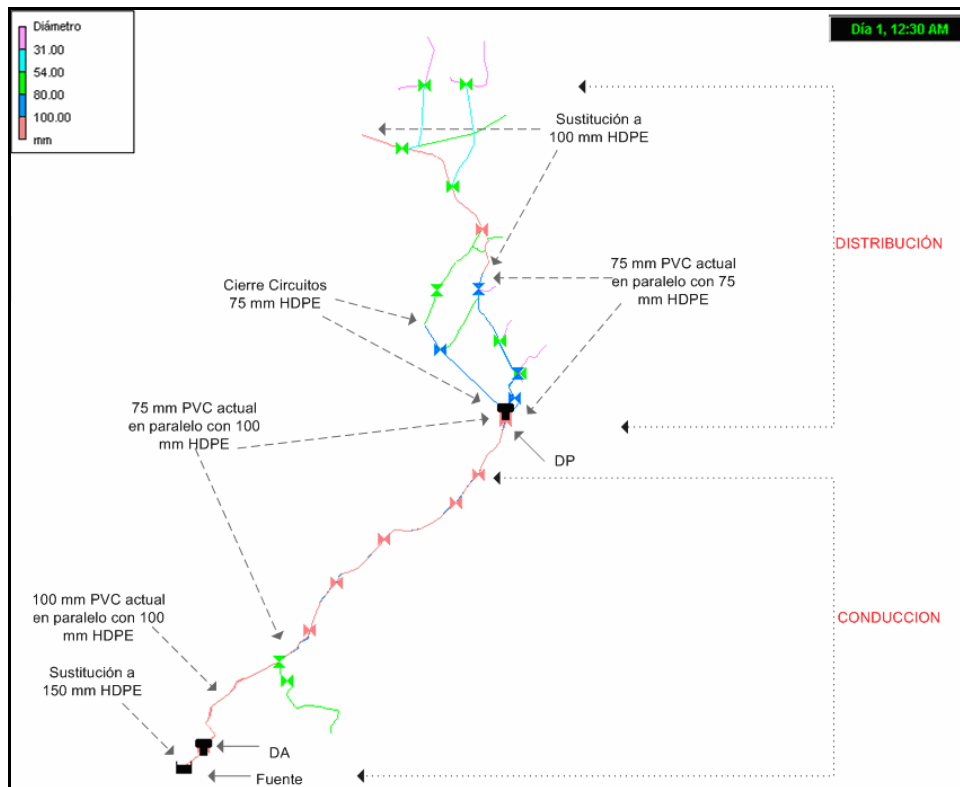
Los cambios específicos requeridos en los tramos de tubería para afrontar el crecimiento a 20 años se muestran en la Figura 34.

Debido a que el estado actual del tramo de tubería que inicia en la fuente y se extiende hasta el depósito auxiliar es malo, deberá ser remplazado, y se deberá sustituir en tubería de 150mm de diámetro nominal en polietileno de alta densidad.

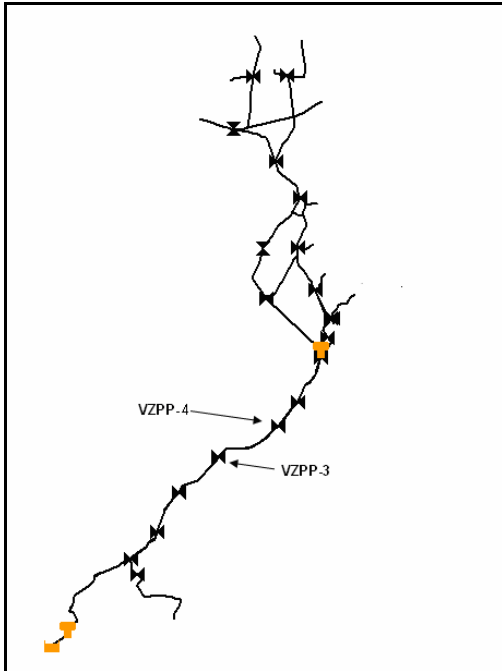
Si se toma en cuenta que la mayoría de la conducción tiene un diámetro nominal actual de 75mm en PVC, se calcula que este diámetro implica velocidades superiores a 3.0 m/s con la demanda a 20 años aplicada, lo cual sobrepasa el valor máximo deseable establecido. Por lo

tanto, se decide instalar una tubería de conducción paralela a la actual en 100mm diámetro nominal, en polietileno de alta densidad (HDPE) entre zonas de presión desde el depósito auxiliar (DS) hasta el depósito principal (DP), significando esto en una distancia de 4422m.

Al mantener esta conducción paralela, los servicios se podrán mantener conectados a la línea de 75mm de diámetro nominal PVC, mientras que la línea nueva de 100mm diámetro nominal de HDPE conduce la mayor parte del consumo global. De este modo la tubería nueva será exclusiva para conducción, por lo que no llevará conexiones y llegará virgen hasta el depósito principal.



**Figura 34.** Demarcación de mejoras a lo largo del sistema de distribución.  
(Fuente: La autora)

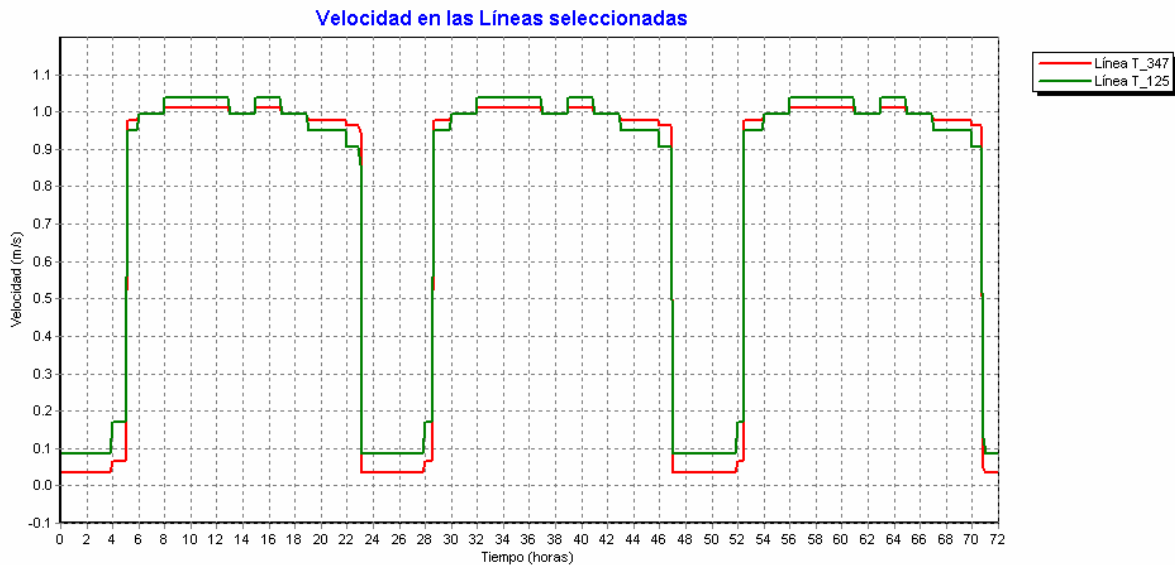


**Figura 35.** Ubicación de Válvulas de Zonas de Presión Principal (VZPP) 3 y 4. (Fuente: La autora)

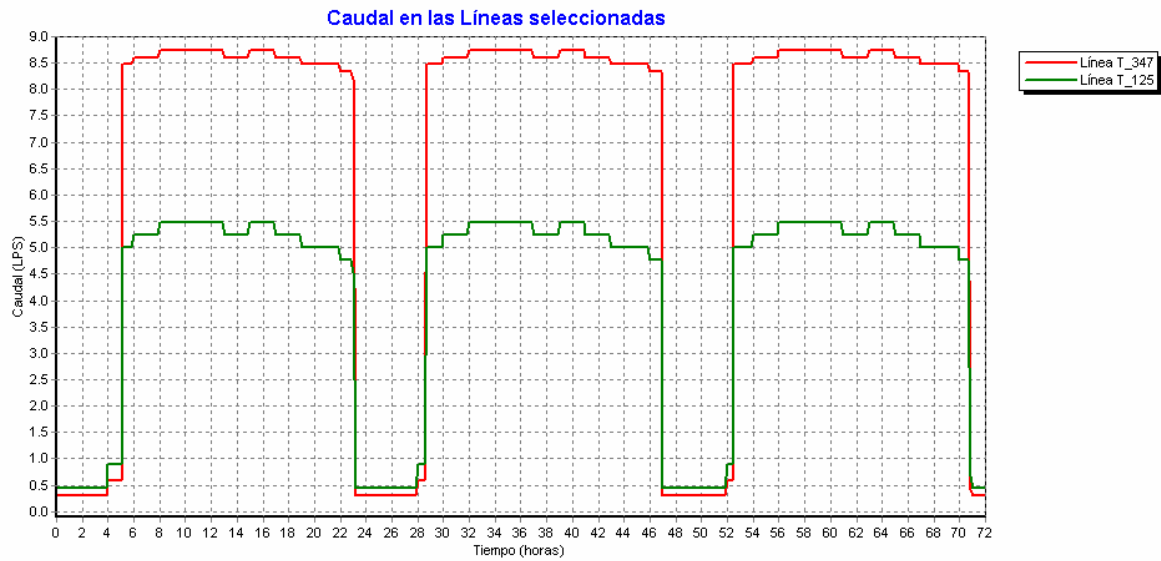
Entre las válvulas de zona de presión principal (VZPP) 3 y 4 (Figura 35), se encuentran un tramo de tubería actual en 75mm de diámetro nominal (PVC), y paralela a ésta la línea T\_347, de 100mm diámetro nominal (HDPE), que pertenece a la conducción nueva. Como muestra la Figura 36, la velocidad de ambas líneas se mantiene en el orden de 1.0m/s en las 72 horas de simulación. La razón de esto es la cantidad de consumo conectado actualmente a esta línea, ya que es poco y se espera que se mantenga de tal forma.

Las líneas presentan pérdidas de energía muy similares, esto de acuerdo a lo mencionado en el marco teórico, dado que son tuberías paralelas se deben presentar velocidades semejantes.

A pesar de esto al ser las líneas de diámetros distintos, el caudal conducido es distinto, de 8.6l/s y de 5.3l/s para la línea de 75mm y de 100mm diámetro nominal respectivamente (Figura 37). Inclusive se puede apreciar en los gráficos de velocidad y caudal, como la línea representa la apertura de y cierre de la válvula de control de flujo instalada en la entrada del depósito principal, aguas abajo.



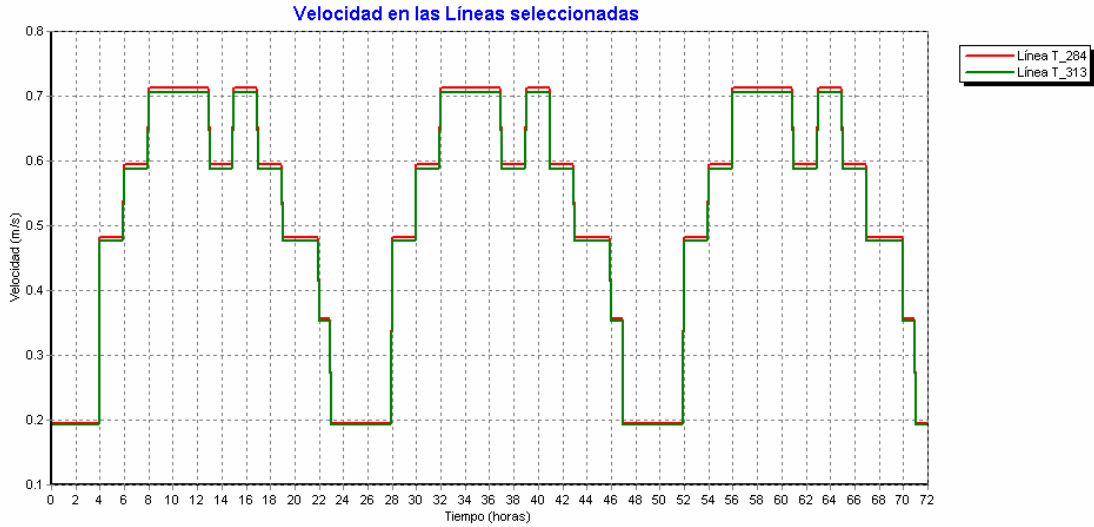
**Figura 36.** Gráfico de velocidad sobre las líneas T\_347 y T\_125. Velocidad (m/s) vrs tiempo (horas). (Fuente: La autora)



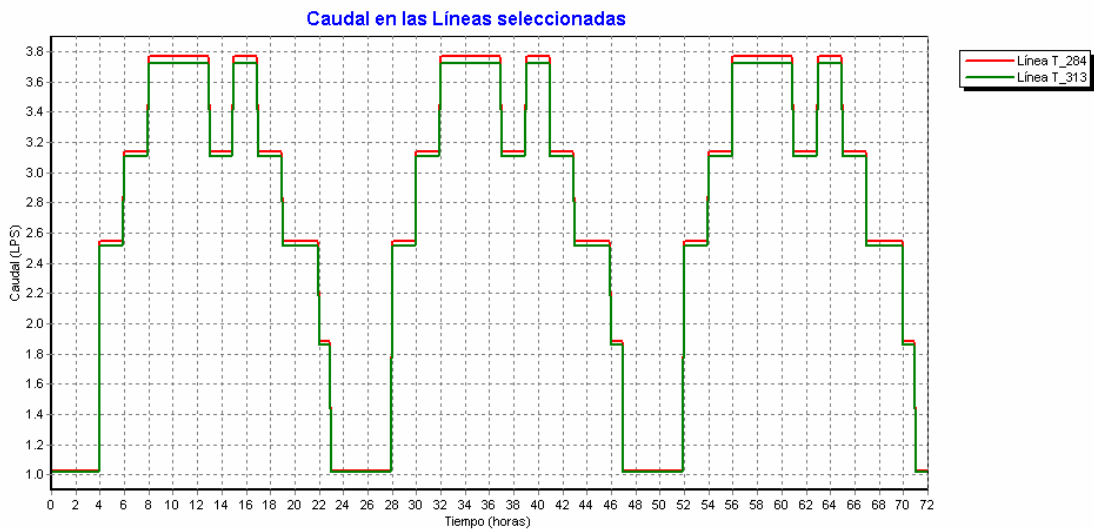
**Figura 37.** Gráfico de caudal sobre las líneas T\_347 y T\_125. Caudal (l/s) vrs tiempo (horas).  
(Fuente: La autora)

De forma semejante es la situación en las líneas T\_284 y T\_313, entre el depósito principal (DP) y la válvula de zona de presión principal 9 (VZPP-9), ubicadas donde muestra la Figura 34. En este caso gráfico la velocidad (Figura 38), está directamente en función de la demanda, con una velocidad promedio de 0.5m/s. A pesar de ser valores bajos, este incremento de área hidráulica mediante líneas paralelas, previene un aumento de pérdidas de energía en horas de mayor demanda.

De la misma forma, se mantiene un equilibrio en los caudales (Figura 39) entre la línea de polietileno de alta densidad a instalar con la existente de cloruro de polivinilo, pues se pretende mantener las acometidas conectadas a la línea existente y dejar así, a la línea de conducción futura, libre de conexiones domiciliarias.



**Figura 38.** Gráfico de velocidad sobre las líneas T\_287 y T\_313. Velocidad (m/s) vrs tiempo (horas).  
(Fuente: La autora)



**Figura 39.** Gráfico de caudal sobre las líneas T\_284 y T\_313. Caudal (l/s) vrs tiempo (horas).  
(Fuente: La autora)

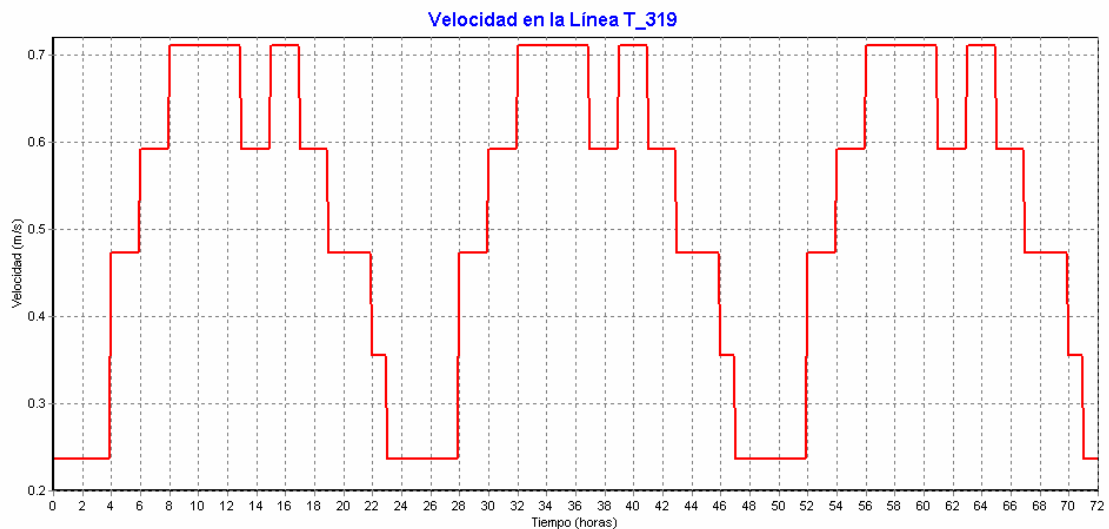
Un factor importante para el presente diseño es que no se contemplaron cambios en los ramales, tanto de material como de área hidráulica, estos se mantienen en diámetros de 55mm (50mm nominal) a 30mm (25mm nominal) en PVC, debido a que el compromiso del ICE radica únicamente a la conducción principal y los

elementos necesarios para el correcto funcionamiento, tales como depósitos, y controles. Lo único que se consideró es la instalación de una serie de válvulas reguladoras de presión en la entrada de cada ramal, con el fin de eliminar sobrepresiones inevitables por la topografía y minimizar fugas. A pesar de la

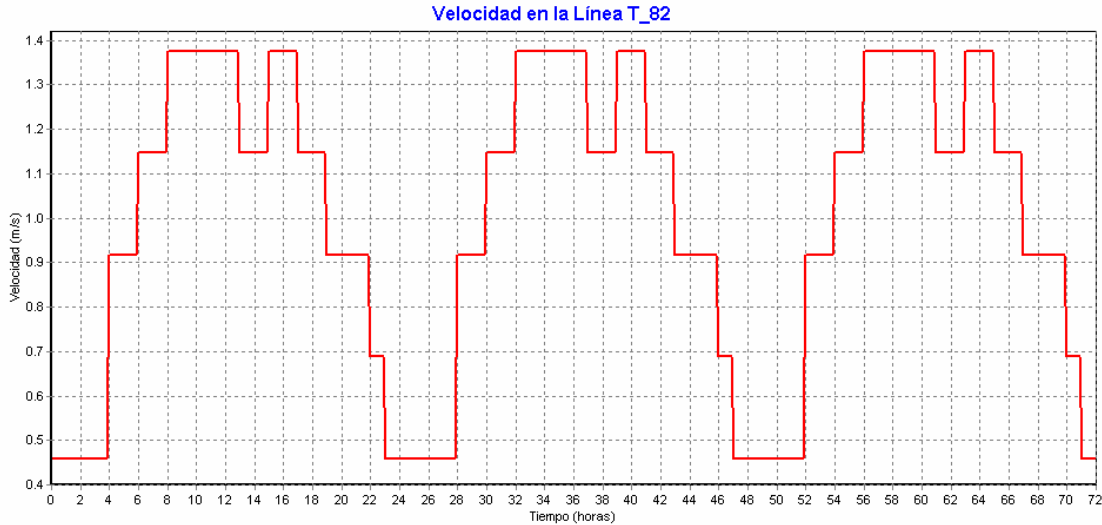
limitación en la participación del ICE, se decidió evaluar la velocidad de los ramales, pues la capacidad de crecimiento longitudinal de estos es corta (debido a topografía).

Para analizar las velocidades en los ramales se tomó como ejemplo el Ramal Recreo Verde (Apéndice 08, Lámina 03), representado por la línea T\_319, con un diámetro de 25mm diámetro nominal. En este caso, a pesar de ser un diámetro reducido, las demandas no generan velocidades mayores de 0.7m/s (Figura 40).

Otro caso similar es mostrado en la Figura 41, donde se representa la velocidad máxima de 1.4m/s para el tramo de tubería T\_82, ubicado en el Ramal 7 (Apéndice, Lámina 03). El único inconveniente de tales diámetros, para el funcionamiento del sistema de distribución, es la limitada capacidad de alimentar, un caudal mínimo, un hidrante en caso de un incendio. Por lo que se contemplaron hidrantes solo sobre la línea de conducción principal.



**Figura 40.** Gráfico de velocidad sobre la línea T\_319. Velocidad (m/s) vrs tiempo (horas).  
(Fuente: La autora)



**Figura 41.** Gráfico de velocidad sobre la línea T\_82. Velocidad (m/s) vrs tiempo (horas).  
(Fuente: La autora)

Un aspecto importante en la consideración de los ramales, es la conexión de estos en circuito cerrado en cuanto sea posible, lo que se maneja a favor del funcionamiento del sistema. Esto porque los circuitos cerrados son beneficiosos para la distribución de demanda y presiones, además de hacer posible un funcionamiento parcial de los ramales en caso de reparaciones o mantenimiento de la red de distribución.

Los casos importantes y complejos para los que se aplicó esto es para dos ramales, el Ramal Mesén y el Ramal Barrio San Juan (Figura 42). En los dos, las cotas al final del ramal tienen alturas de 529.648m y 554.738m respectivamente. Estas elevaciones generan una diferencia de 40m para el Ramal Barrio San Juan por lo que, de pretender abastecerlo completamente desde la conexión a la red (ubicada sobre la cota 514.894m), se necesitaría llegar a presiones muy superiores a 70m y se saldría completamente del rango permisible de entre 10 y 50m. La situación se genera al tener que superar una carga dinámica compuesta por la suma de:

- Diferentes elevaciones
- Pérdidas de carga
- Necesidad de alcanzar una presión mínima de operación de 10m en el extremo superior (a 554.738)

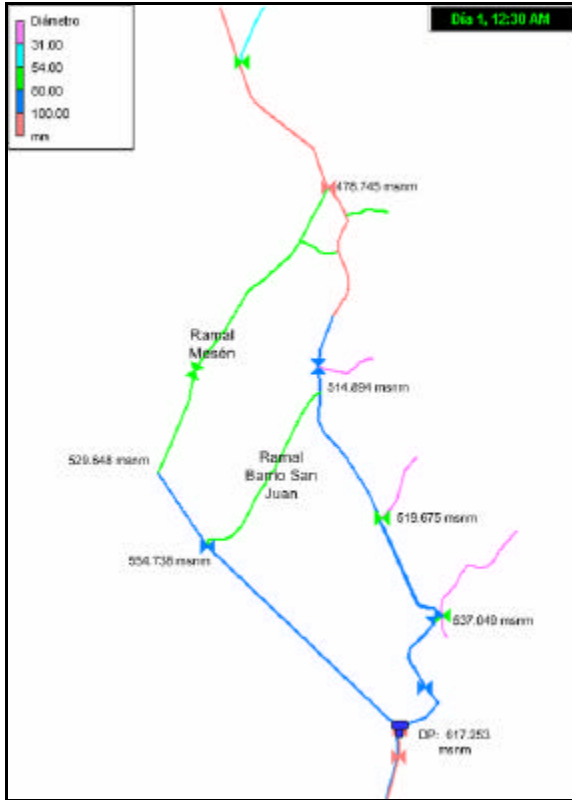
Al llegar a esto implicaría cambiar las zonas de presión establecidas por las válvulas

reguladoras de presión agua abajo del depósito principal y aumentar considerablemente las presiones en la línea de distribución, y hacer todo esto resulta poco factible.

Para abordar el problema se manejaron dos opciones: instalar un sistema de reimpulsión en los puntos extremos de cada ramal, o forzar las cargas de presión, esto utilizando una línea de conducción adicional, mediante la conducción del depósito principal al extremo superior de cada uno de los ramales problemáticos.

Las opciones se discutieron con el personal de ICE, y se decidió eliminar la primera. Esta decisión se tomó a causa del alto costo capital y sobretodo de operación, pues implica un mayor costo y complejidad del sistema, tanto por el equipo y controles necesarios, como por los depósitos de compensación requeridos en la parte alta de cada ramal.

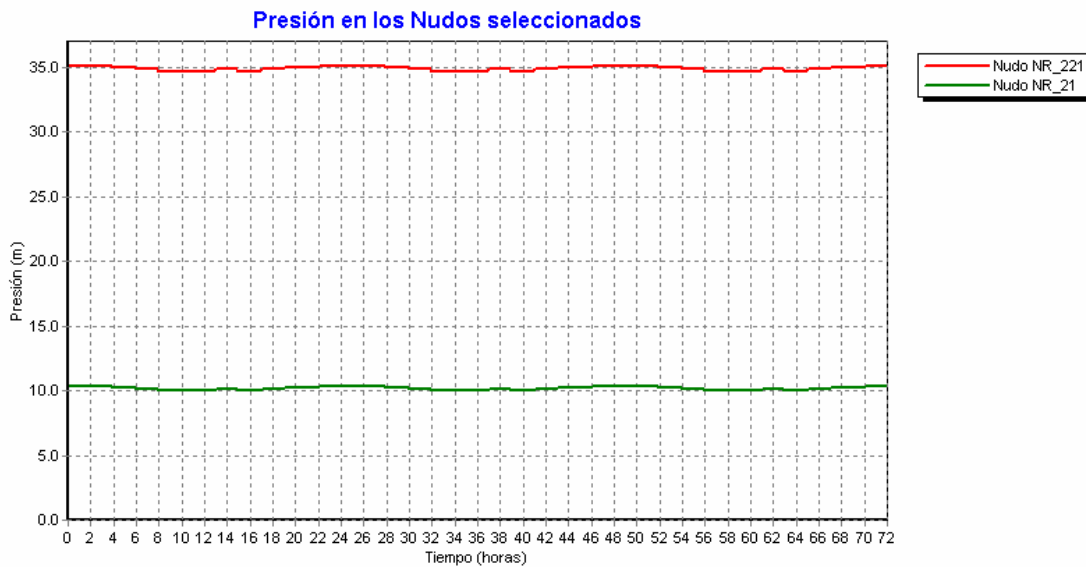
De tal forma que la opción más sencilla y económica es la adición de la línea auxiliar, la cual incluso es capaz de alimentar ambos ramales. Esta implica igualmente una dificultad, ya que no se tiene servidumbres legales para ésta, ni se cuenta con mucha información del estado de estos tramos, por lo que es conveniente sustituir estas líneas completamente, con tuberías nuevas y con una servidumbre definida y marcada correctamente.



**Figura 42.** Representación de condición especial de los Ramales Mesén y Barrio San Juan. (Fuente: La autora)

Al considerar las anteriores condiciones existentes, se decidió unirlos ramales por el extremo superior de cada uno directamente al depósito principal y crear así un circuito cerrado.

Al unir el extremo del Ramal Mesén (NR\_21) y del Ramal Barrio San Juan (NR\_221), como muestra la Figura 42, se generan dos presiones distintas (Figura 43). Estas varían en alrededor de 25m.c.a debido a las cotas en que se encuentra el punto, sin embargo cada uno posee una presión dinámica en el rango permisible.



**Figura 43.** Gráfico de presión los nudos NR\_221 y NR\_21. Presión (m.c.a) vrs tiempo (horas). (Fuente: La autora)



Con el fin de mantener las zonas de presión contempladas en la modelación para el funcionamiento de este sistema de distribución de agua potable, se debe asegurar la calibración de cada una de las válvulas, ya sean válvulas reguladoras de presión, o controladoras de caudal. Esta calibración debe hacerse con los valores de consigna establecidos en el presente trabajo para cada una, como muestra el Cuadro 17.

CUADRO 17. CARACTERÍSTICAS DE VÁLVULAS			
Válvula	Diámetro (mm)	Tipo	Consigna (m o l/s)
VZPP-0	105	FCV	15
VZPP-1	105	PRV	10
VZPP-2	105	PRV	10
VZPP-3	105	PRV	10
VZPP-4	105	PRV	10
VZPP-5	105	PRV	10
VZPP-6	105	PRV	10
VZPP-7	105	FCV	12
VZPP-8	82	PRV	10
VZPP-9	82	PRV	20
VZPP-10	82	PRV	20
VZPP-11	105	PRV	20
VZPR-0	55	PRV	15
VZPR-1	55	PRV	10
VZPR-2	55	PRV	10
VZPR-3	55	PRV	10
VZPR-4	82	PRV	10
VZPR-5	55	PRV	10
VZPR-6	55	PRV	15
VZPR-7	55	PRV	15
VZPR-8	55	PRV	15
VZPR-9	55	PRV	20

## Hidrantes

En relación a los hidrantes que se deben colocar en todo sistema de distribución de agua potable, estos se consideraron, sin embargo no cumple la norma completamente (Apéndice 06). Esto por las distancias entre cada uno y por la presión en que debe operar.

El criterio establecido para ubicar los hidrantes fue la concentración de servicios, como muestra la Figura 43 y no cada 100m como dicta el

departamento de Ingeniería de Bomberos del Instituto Nacional de Seguros (Anexo 06).

Aparte se consideró un volumen contra incendio en el dimensionamiento del volumen de almacenamiento, esto para que en caso de entrar en operación un hidrante, no se comprometa todo el sistema en operación normal.

En total se consideraron 7 hidrantes en la red de distribución, los que demandan potencialmente un caudal de 32 l/s por 15 minutos, a una presión de 15m.c.a.

Además, se considera como un hidrante cada depósito, ya que se acató la recomendación del departamento de Ingeniería de Bomberos. Este sugirió la instalación de dos bocas de salida en bronce de 2 ½" y una central de 4 ½", permitiendo así al depósito operar como un hidrante, con la única limitante de presión, pues los depósitos cuentan con niveles máximos de 3m, sin embargo esta propuesta, como una solución alterna, cumple su propósito.

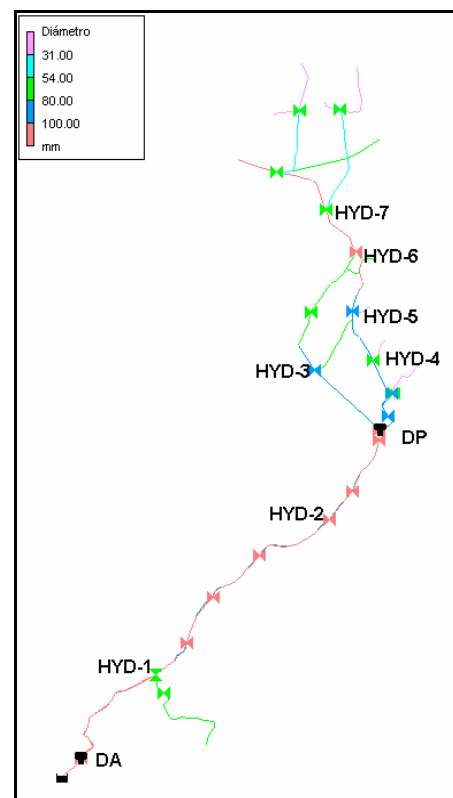


Figura 44. Ubicación de hidrantes en la red de distribución de agua potable. (Fuente: La autora)

## Depósito de almacenamiento

El dimensionamiento del nuevo depósito se fundamenta en el caudal medio diario proyectado a 20 años, sin considerar el índice agua no contabilizada (de ser considerada, sería mayor y no causa una diferencia en calidad de operación)

Para esto se consideran tres volúmenes, como se mencionó en el marco teórico: el volumen de regulación y compensación (conocido también por volumen de ecualización), el volumen contra incendio y el de emergencias.

En el caso del volumen de ecualización (Cuadro18), basado en el caudal promedio diario se calcula el volumen total que el sistema utiliza en un día, de este se reconsideró un 25% para el almacenamiento. Esto determina un volumen de cerca de 230m<sup>3</sup>.

<b>CUADRO 18 CALCULO DE VOLUMEN DE ECUALIZACIÓN*</b>		
<b>Caudal medio diario proyectado</b>	10.73	l/s
	927072	l/día
	927.07	m <sup>3</sup> /día
<b>Volumen promedio diario (VPD)</b>	927.07	m <sup>3</sup>
<b>Volumen de regulación y compensación</b>	0.25	de VPD
	231.77	m <sup>3</sup>

Para el cálculo del volumen contra incendio se consideró un hidrante clase B, el cual requiere con un caudal de 32 l/s y se consideró un tiempo estándar de operación de 15 minutos, lo que concluye en un volumen de alrededor de 29m<sup>3</sup> (Cuadro 19).

<b>CUADRO 19. CALCULO DE VOLUMEN CONTRA INCENDIO*</b>		
<b>Caudal para el hidrante clase B</b>	32	l/s
<b>Tiempo para apagar incendio</b>	15	min
<b>Volumen contra incendio</b>	28.8	m <sup>3</sup>

A pesar de los volúmenes anteriores, siempre es necesario considerar un volumen de emergencia. Para este se consideró un 15% del volumen promedio diario. Este porcentaje lo que depende de la vulnerabilidad del sistema como un todo, de la fuente, del estado y otros y se traduce en un volumen de casi 140m<sup>3</sup> (Cuadro 20).

<b>CUADRO 20. CALCULO DE VOLUMEN DE EMERGENCIA*</b>		
<b>Factor de volumen de emergencia</b>	0.15	de VPD
<b>Volumen de emergencia</b>	139.06	m <sup>3</sup>

\* (Signatura Biblioteca AYA 343. Dirección de Desarrollo "Estudio de Consumos, Demandas y Criterios de Diseño y Costos Base para Proyectos en el Área Urbana de Costa Rica. 1983)

La dimensión del depósito depende de la sumatoria de los tres volúmenes anteriores, concluye en un volumen de 400m<sup>3</sup>. Este depósito será ubicado en la cota 617.253m.s.n.m (Apéndice 07, Lámina 03), con unas dimensiones de: 3m de profundidad, un ancho de 9.5m, largo 14.25, medidas que permiten una relación de ancho:largo de 1:1.5.

En el depósito se decide instalar una válvula reguladora de caudal, con un valor de consigna de 12l/s, para evitar caudales excesivos y dañinos. Complementariamente se piensa introducir una válvula de flotación controlada por un sensor de nivel, con el fin de evitar la variación de nivel constante y súbita, aguas arriba del depósitos, conocido como transitorios hidráulicos, los que es causado por el abrir y cerrar de la válvula de flotación. El valor de consigna de esta válvula esta entre 2.25m y 3m del nivel del tanque (Apéndice 05), pues éste también controla la entrada de flujo hacia en depósito principal.

Para visualizar el comportamiento de esta válvula se observa la Figura 44, en donde la línea T\_342 representa los lapsos donde la válvula reguladora de caudal esta abierta y permite el paso de 12l/s constantes. Cuando se cierra es evidente no se generan transitorios, como ocurre en el depósito actual, incluso se tiene períodos de 18 horas, los que son de sobremanera estables, lo que asegura una mejor compensación de

presiones en la porción del sistema conectado a este depósito.

Ahora bien, en el sector aguas abajo representado por la línea T\_356, se refleja la curva de modulación de demanda, con caudales variando desde los 4l/s hasta 12.7l/s.

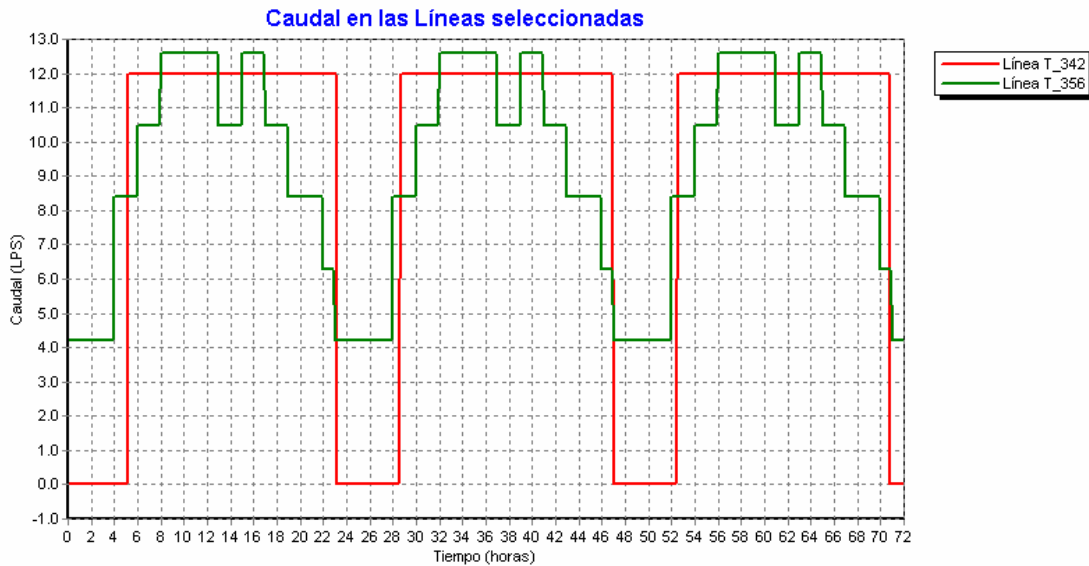
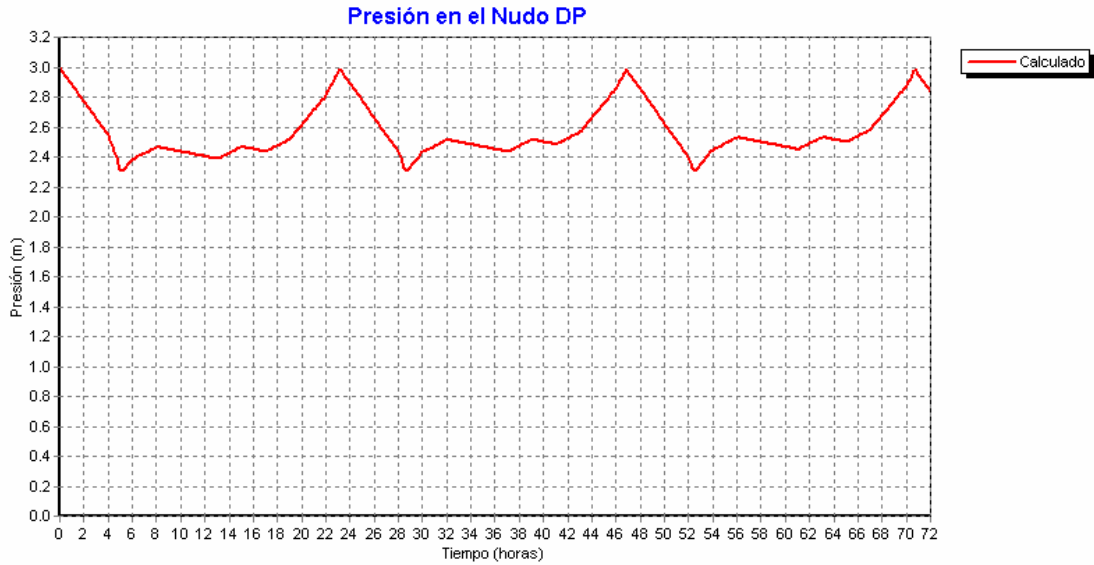


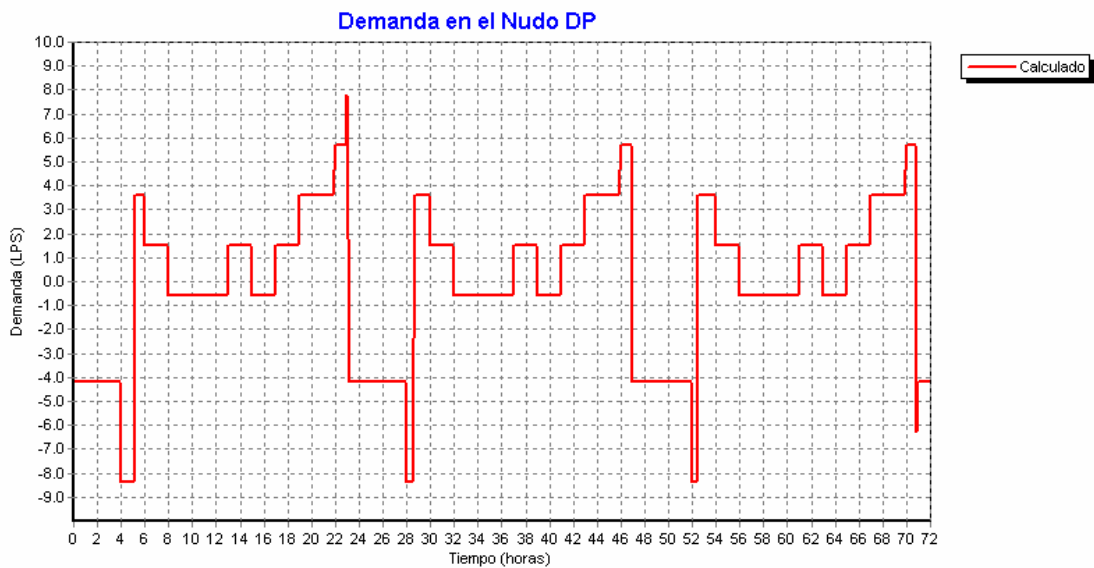
Figura 45. Gráfico de caudal en las líneas T\_356 y T\_342. Caudal (l/s) vrs tiempo (horas).  
(Fuente: La autora)

Para representar el comportamiento del nivel del depósito, debido a la una válvula de flotación, con los valores de consigna asignados se muestra la Figura 46. En esta se observa la variación entre los valores de consigna y como, cada 24 horas, vuelve a valores semejantes a los iniciales en la modelación. Se aprecia además como los volúmenes de emergencia no se comprometen con la demanda normal del sistema.



**Figura 46.** Gráfico de presión en el depósito principal (DP). Presión (l/s) vrs tiempo (horas).  
(Fuente: La autora)

De forma complementaria, se encuentra en la Figura 16, el comportamiento en la demanda, los caudales de entrada y salida del depósito en las 72 horas de simulación. Como puede notarse existe equilibrio entre la entrada (positivos) y salida (negativos) de caudales. Entre estos el valor promedio es de 9.09l/s en las 72 horas estudiadas.



**Figura 47.** Gráfico de demanda en el depósito principal (DP). Demanda (l/s) vrs tiempo (horas).  
(Fuente: La autora)

La anterior figura, también implica un volumen de almacenamiento diario de  $785.38\text{m}^3$ , en 24 horas, lo que representa una tasa de renovación total de 1.963 para el mismo período, si se considera el volumen total propuesto de  $400\text{m}^3$ . Esto es beneficioso en aspectos de la permanencia del agua en los depósitos, ya que se reduce significativamente.

A pesar del buen funcionamiento de este depósito, se decidió adicionar un depósito, depósito auxiliar (DA). Este cumplirá varios propósitos: será el punto principal de inicio de tratamiento del agua (inyección de cloro), operará como el primer tanque quera gradiente, creando la primera zona de presión.

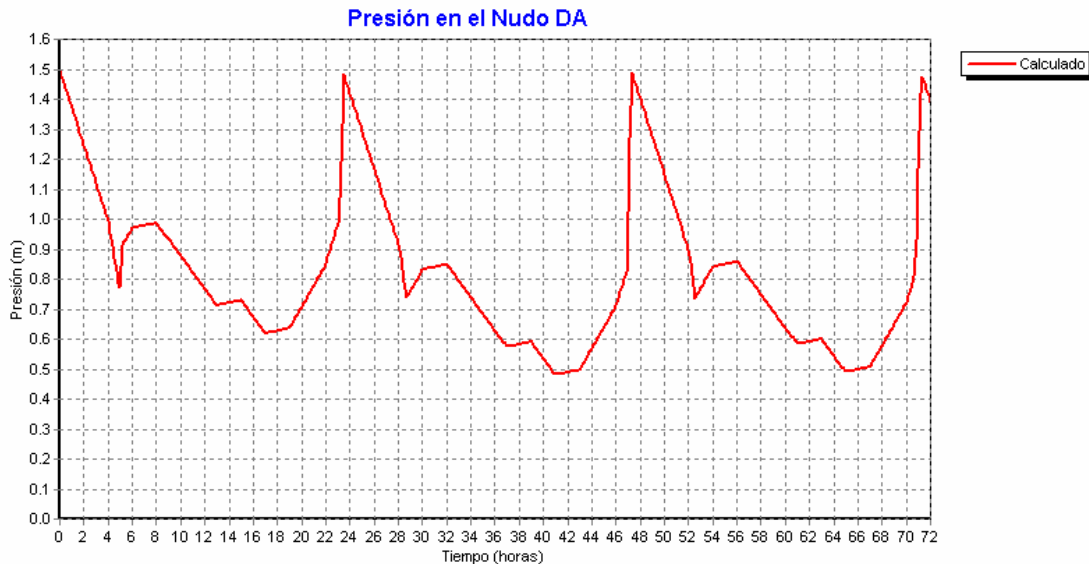
Adicionalmente por medio de este depósito se está anticipando un crecimiento de la población en la parte alta del sistema, ya que actualmente es poca, sin embargo existen varias industrias, lo que produciría un cambio de funcionamiento importante con pocas acometidas. Este sector comprende el ramal que se dirige hacia Casa de Maquinas Toro II, que en la actualidad cuenta con 5 polleras, que como se mencionó poseen un consumo elevado y, un crecimiento adicional de éstas tendría un gran impacto. Tal crecimiento es factible por la ubicación y capacidad espacial en

el lugar para este tipo de instalaciones de gran tamaño.

Por lo tanto, se resolvió ubicar un depósito de  $50\text{m}^3$  de volumen sobre la cota  $890\text{m.s.n.m}$  (Apéndice 07, Lámina 03). Contará con dimensiones de  $1.50\text{m}$  de profundidad,  $4.75\text{m}$  de ancho, y  $7.10\text{m}$  de largo, para tener una relación ancho: largo de 1:1.5.

Al igual que en el depósito principal se colocará una válvula limitadora de caudal en la entrada del depósito, con un valor de consigna de  $15\text{l/s}$ . Igualmente se considera la instalación de una válvula de flotación controlada por un sensor de nivel, con el mismo fin de minimizar transitorios hidráulicos, con un valor de consigna de  $1.5\text{m}$  a  $0.75\text{m}$  respecto al nivel del fondo del depósito en cuestión. Este dimensionamiento está más en función de criterios prácticos, que de un análisis de demanda en su zona de influencia, esto por la incertidumbre del panorama a futuro.

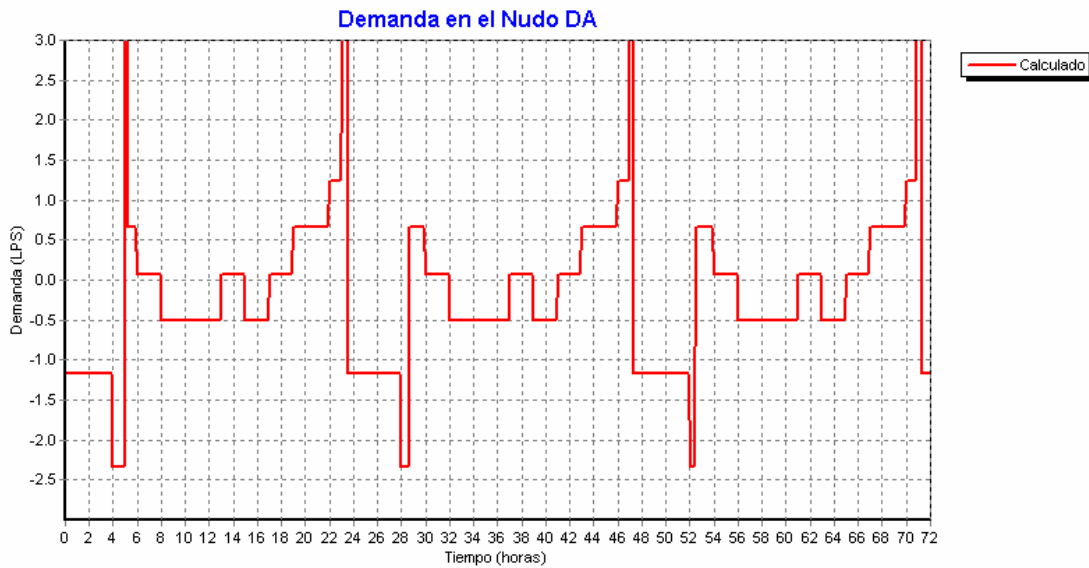
En la Figura 48 se muestra la variación de nivel en el depósito auxiliar. Se representan las 72 horas de modelación, en las que se nota que, al cabo de 24 horas, el depósito vuelve a las circunstancias iniciales de funcionamiento.



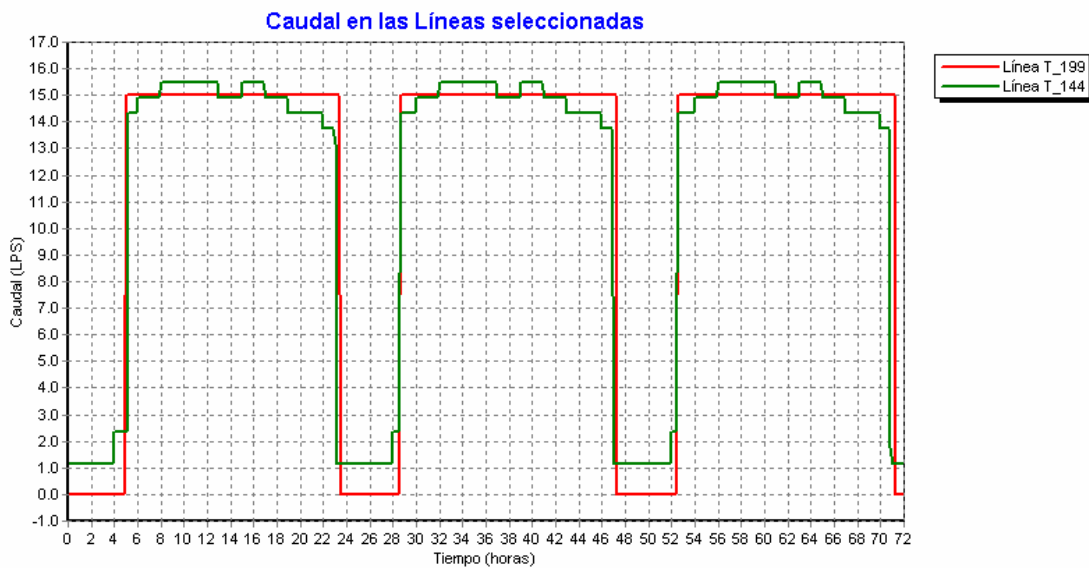
**Figura 48.** Gráfico de presión en el depósito auxiliar (DA). Presión (m.c.a) vs tiempo (horas).  
(Fuente: La autora)

En la Figura 49 se grafica la relación de la entrada y salida de caudales del depósito, en donde se muestra un comportamiento controlado y equilibrado entre ellas. Corroboración de esto es la Figura 49, en la que se observa la estable tasa de cambio entre la línea entrando (Línea T\_199) al depósito y la saliente (T\_144), la cual presenta una relación de cambio semejante a 1:1, lo que indica un

caudal entrante de 15l/s por uno saliente de 15l/s.



**Figura 49.** Gráfico de demanda en el depósito auxiliar (DA). Demanda (l/s) vrs tiempo (horas).  
(Fuente: La autora)



**Figura 50.** Gráfico de caudal en las líneas T\_199 y T\_144. Caudal (l/s) vrs tiempo (horas).  
(Fuente: La autora)

## Calidad de Agua

Para asegurar la calidad del agua en toda la red, se ubicará una estación de cloro en el depósito de almacenamiento auxiliar, como se mencionó.

Para la estación se contempla un sistema de cloración, preferiblemente a cloro gas, por la factibilidad de compensación en la aplicación de éste en horas pico y por la independencia que este presenta en la carga del producto, se hace por cilindros.

La concentración de cloro establecida es de 2.0mg/l de cloro libre a partir del depósito auxiliar. Para esto se consideran valores típicos de coeficiente global de reacción en el medio (seno del agua), de -0.05l/d, y un coeficiente global de reacción en paredes (de tubería y depósitos) de un -0.05l/d. Estos coeficientes, si bien pueden ser calibrados en el campo, requieren de tiempo y equipo, por lo que se decidió utilizar los valores típicos.

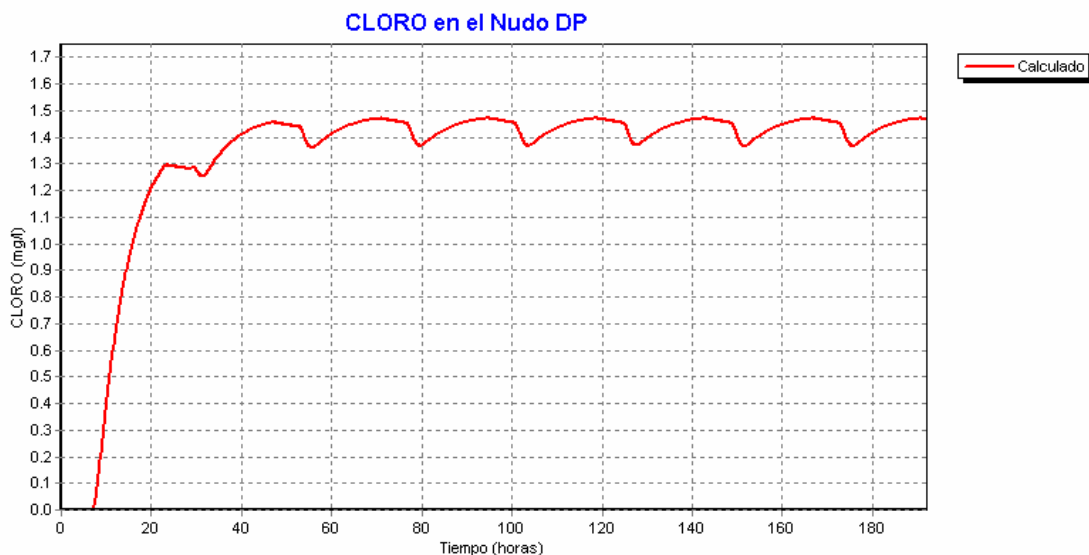
De igual forma se considera correcto el sistema en cuanto no se presenten concentraciones de cloro libre menores de 0.5mg/l en cualquier momento y punto de la red de distribución, una vez alcanzado el equilibrio.

Para lo anterior se asumió un modelo de mezcla completa en ambos depósitos, esto por la distribución de entrada y salida, las cuales están opuestas, como muestra el Apéndice 07 en la Lámina 03. Este modelo de muestra es de los más deseados para este fin, debido a la minimización de estratificación y cortos circuitos hidráulicos en el interior de los depósitos.

La simulación de este tratamiento tarda más de las 72 horas establecidas de estudio, por lo que para este fin se amplió a 192 horas.

Muestra de esto es la Figura 51, la cual presenta el comportamiento de la concentración en el sistema a lo largo del tiempo. Aquí se nota que, a partir de las 60 horas, la concentración (en teoría) se estabiliza en un rango de 1.35 a 1.45mg/l, con puntos máximos y mínimos en los picos de consumo horario en periodos de 24 horas.

De forma lógica, en las primeras 8 horas, el depósito principal presenta una concentración nula, para luego empezar a ganar concentración de cloro en el volumen de agua contenido.

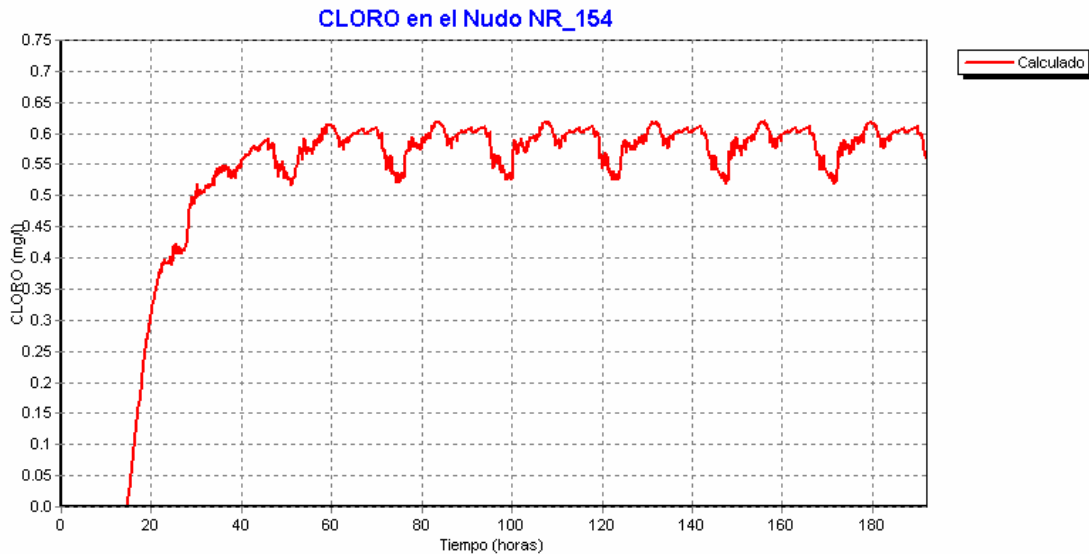


**Figura 51.** Gráfico de concentración de cloro en el depósito principal (DP). Cloro (mg/l) vrs tiempo (horas).  
(Fuente: La autora)

La estabilización de la concentración de cloro de los nudos no es inmediata, y tarda de acuerdo a su ubicación. Tal es el caso del nudo más lejano y en la cota más baja (407.234m.s.n.m), el nudo NR\_154. Éste requiere de 60 horas para estabilizarse entre 0.65mg/l y 0.55mg/l. Esta variación está en función de los consumos indicados por la curva de modulación horaria.

A pesar de esto, a partir de las 25 horas, la concentración de cloro en el nudo empieza a ser significativa, lo que implica que, luego de las 8 horas que requiere el depósito principal para estabilizarse, al punto más lejano le toma 17 horas más para llegar a tener una concentración, aun cuando es inestable. Este tiempo entre la estabilización del depósito y de los nudos más alejados, es debido a que los nudos cercanos al depósito y con mayor demanda deben estabilizarse primero para así permitir que el cloro llegue a los puntos bajos y alejados.

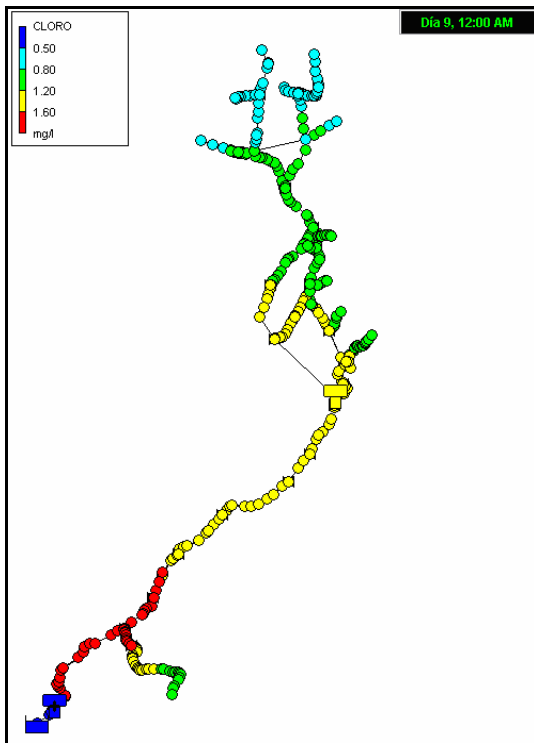
Sin embargo una vez estabilizada la concentración en el sistema, el nudo NR\_154, el cual es el más crítico, alcanza a estabilizarse con concentración de siempre superiores a 0.5mg/l, como muestra la Figura 52.



**Figura 52.** Gráfico de concentración de cloro en el nudo NR\_154. Cloro (mg/l) vrs tiempo (horas).  
(Fuente: La autora)



Como representación de la concentración de cloro libre a las 192 horas de estudio en el sistema de distribución de agua, se muestra la Figura 53. Se aprecia aquí como en ningún punto la concentración de cloro baja de 0.5mg/l, excepto en la fuente, dado que la estación de cloración se ubicará aguas debajo de ésta.



**Figura 53.** Representación de concentración de cloro libre en el sistema de distribución de agua a las 192 horas. (Fuente: La autora)

## Presupuesto

Se calculó el presupuesto de acuerdo al alcance del proyecto, esto quiere decir que dentro de él se toman en cuenta únicamente las tuberías y los controles considerados en el diseño hidráulico y se excluye la obra gris de la infraestructura (debido a que no se realizó un diseño estructural).

Es necesario recalcar a su vez que el presupuesto abarca únicamente la parte que el ICE tiene por compromiso, o sea, la conducción principal, lo correspondiente a los depósitos (dado el alcance antes mencionado) y los controles en el trayecto de tubería principal. Todo lo correspondiente a los ramales, tanto en tubería como en controles no se considera, a pesar de haber sido diseñado, debido a que esta sección le corresponde a la ASADA. Adicionalmente existen otros parámetros (explicados más adelante) que debemos considerar y excluir del presupuesto.

Dentro del presupuesto se encuentran entonces incluidos el costo directo de los materiales (tubería, válvulas, y accesorios), la excavación y mano de obra necesaria para la colocación de la tubería.

La reposición de la carpeta asfáltica de la carretera no se considera, ya que como parte de los compromisos del ICE hacia la comunidad, se encuentra la colocación completa de una carpeta asfáltica en toda la longitud de la misma. Por lo anterior se pretende realizar primero las mejoras al sistema de distribución de agua y posteriormente realizar dicha obra.

En la optimización diseñada se intentó salvar todo lo posible de la tubería existente, sin embargo, es un factor completamente desconocido y de comprobación en campo, por ello se plantearon 3 posibles presupuestos (Apéndice 07).

En los tres, tanto las válvulas como los accesorios son análogos, en cuyo caso lo que cambia únicamente es la longitud y tipo de tubería dependiendo de cada caso en particular. Es por esto que, la lista de materiales es válida para los tres casos, si no se consideran cantidades de tubería.

<b>CUADRO 21. LISTA DE MATERIALES</b>
<b>TUBERÍA</b>
Tubo PVC 75mm SDR-26 de 6m
Tubo PVC 100mm SDR-26 de 6m
Tubo HDPE 150mm DR-11 de 6m
Tubo HDPE 100mm DR-11 de 6m
Tubo HDPE 75mm DR-11 de 6m
<b>VÁLVULAS</b>
Válvula compuerta brida cobre 75mm
Válvula compuerta brida cobre 100mm
Válvula compuerta brida cobre 50mm
Válvula compuerta brida HF 150mm
Válvulas Schcradder 1/4"
Válvula limitadora de caudal brida cobre 100mm
Válvula de flotación comando hidráulico control nivel brida cobre 100mm
Válvula retención check brida HF 100mm
Válvula reguladora presión hidráulica de cobre brida 100mm
Válvula reguladora presión hidráulica de cobre brida 75mm
Válvula ARI Doble propósito 25mm NPT
<b>ACCESORIOS</b>
Adaptador hembra 25mm
Brida PVC 50mm
Brida PVC 75mm
Brida PVC 100mm
Brida PVC 150mm
Unión lisa PVC 50mm
Unión lisa PVC 75mm
Unión lisa PVC 100mm
Unión "dresser" 100mm
Unión "dresser" 150mm
Codo de 90 PVC 75mm
Codo de 90 PVC 50mm
Codo de 90 PVC 100mm
Codo brida-brida de 90 HF 100mm
Tee HF 150mm
Tee PVC 100mm
Tee PVC 75mm
Tee PVC 50mm
Niple HF, brida-brida 150mm
Reducción 100mm a 75mm HF
Reducción 100mm a 75mm PVC
Reducción 150mm a 100mm PVC
Reducción 100mm a 50mm PVC
Reducción 100mm a 25mm PVC
Tornillería +empaques 50mm
Tornillería +empaques 75mm
Tornillería +empaques 100mm
Tornillería +empaques 150mm

El primer escenario es considerado el más crítico. Se estima que toda la extensión de la tubería de la conducción actual, se encuentra en mal estado y, por ende requiere ser sustituida, lo que implica una mayor inversión capital (Cuadro 22, Apéndice 7). En este caso se consideró toda la tubería en polietileno de alta densidad (HDPE), dado que si se va a remplazar toda, se facilita trabajar con un solo material, además del ahorro que representa, no incluir grandes cantidades de uniones entre materiales PVC y HDPE (uniones “dresser”), debido al alto costo de éstas.

<b>CUADRO 22. PRIMER ESCENARIO</b>	
<b>Materiales</b>	<b>Costo (¢)</b>
Total de Tuberías	132,490,854
Total de Válvulas	13,561,058
Total de Accesorios	6,961,579
<b>Equipo y Mano De Obra</b>	
Excavación	19,450,000
Mano de Obra	1,249,541
<b>Valor Total Del Proyecto</b>	<b>173,713,032</b>

El segundo escenario, los diámetros de la tubería de conducción propuesta coincide con los existentes y, suponiendo que se encuentran en buen estado, pueden ser reutilizados. Éste, por lo tanto, es el presupuesto de menor costo (Cuadro 23 y Apéndice 7), pues al realizarse la suposición de que la tubería paralela es completamente salvable, se reduce de forma importante la cantidad de tubos necesarios para ésta y, claro está, se reduce el costo. Aquí no se considera el material PVC, pues es el que se tiene en campo.

<b>CUADRO 23. SEGUNDO ESCENARIO</b>	
<b>Materiales</b>	<b>Costo (¢)</b>
Total de Tuberías	73,959,465
Total de Válvulas	13,561,058
Total de Accesorios	6,961,579
<b>Equipo y Mano De Obra</b>	
Excavación	19,450,000
Mano de Obra	568,378
<b>Valor Total Del Proyecto</b>	<b>114,500,480</b>

Finalmente, como tercer escenario se tiene un caso intermedio, en el cual se estima salvable la mitad de la longitud de cada diámetro pues, al ser un factor de comprobación en campo únicamente, no se puede realizar un cálculo aproximado totalmente confiable y por ello se tomó en cuenta la mitad de la longitud para tener un panorama más realista en cuanto a costo.

Sin embargo, lo anterior se fundamentó en las fugas y tramos muy expuestos observados en sitio, lo que permite suponer que no toda la tubería es salvable.

Dado las consideraciones mencionadas, y como se mencionó anteriormente, en este caso se tiene un costo medio (Cuadro 24, Apéndice 7). La parte que complementa la tubería existente se sustituirá en PVC para ahorrar las ya mencionadas uniones y facilitar la caracterización y se mantendrá la línea de conducción principal en HDPE y la línea paralela auxiliar a ésta en PVC, sin combinaciones de materiales en las líneas.

<b>CUADRO 24. TERCER ESCENARIO</b>	
<b>Materiales</b>	<b>Costo (¢)</b>
Total de Tuberías	93,976,067
Total de Válvulas	13,561,058
Total de Accesorios	6,961,579
<b>Equipo y Mano De Obra</b>	
Excavación	19450000
Mano de Obra	1,868,700
<b>Valor Total Del Proyecto</b>	<b>135,817,404</b>

# Conclusiones

Durante el desarrollo de este proyecto se analizó el sistema distribución de agua potable actual, en el cual se encontraron tanto fortalezas como deficiencias. Las observaciones más importantes, durante cada etapa del proyecto, se pueden resumir como sigue:

## • Planimetría e infraestructura

- El sistema de distribución de agua potable actual de la comunidad de Marsella presenta problemas de funcionamiento y calidad.
- La diferencia de elevaciones entre la naciente y los puntos de consumo causa una situación problemática en el manejo de presiones del sistema.

## • Demanda y consumo

- La micromedición con que cuenta la comunidad es una excelente práctica, base fundamental de un análisis de la red de distribución.
- Un estudio real y profundo de las demandas y patrones de consumo de la comunidad en cuestión, es esencial para un diseño confiable.
- La cantidad estimada del agua de la naciente es incapaz de abastecer a la comunidad con el crecimiento proyectado de 20 años, con un déficit de 3 l/s.

## • Sistema de distribución de agua potable actual

- La sectorización de zonas de presión es ineficiente e insuficiente, pues esto causa presiones excesivamente altas o bajas dependiendo del horario.
- La operación de los tanques quiebra gradiente y depósitos con rebalse genera

escasez de agua en los usuarios aguas abajo de estos y desperdicio del recurso.

- El volumen de almacenamiento es incapaz de suplir de agua a todo el sistema en operación durante el horario de mayor demanda, lo anterior sin siquiera considerar en un eventual incendio o emergencia del sistema como tal.
- La insuficiencia de área hidráulica induce a un exceso en la pérdida de energía por fricción.
- Los cambios en la infraestructura del sistema de distribución realizados de forma imprevista han afectado la operación de la red de distribución.

Una vez recaudados los datos y hechas las observaciones anteriores, se propusieron cambios importantes para una optimización del sistema:

## • Sistema de distribución de agua potable propuesto

- Se logró proyectar una operación continua y de calidad satisfactoria para los usuarios en los próximos de 20 años con una serie de mejoras en el sistema de distribución de agua potable actual que incluyen tanto el diámetro de tuberías y la cantidad de éstas, como el cambio y reubicación de los depósitos.
- Se propone una nueva y correcta sectorización de zonas de presión, de manera que se pueda mantener la presión en rangos adecuados para los usuarios, independientemente de su ubicación.
- Se incluyeron de controles en los depósitos y en general, lo que permite estabilidad en el funcionamiento del sistema de distribución.

- Se aumentó la capacidad de almacenamiento debido al nuevo depósito principal el cual, al contar con una ubicación piezométrica más adecuada, logrando alimentar el sistema en operación normal y considerando eventos de incendio y emergencia.
- Se incluyó una tubería paralela que facilita la conexión de nuevas acometidas al sistema, además de aumentar considerablemente el área hidráulica y reducir así velocidades problemáticas.
- Se consideró la instalación de un sistema de cloración que mantenga condiciones aceptables de calidad de agua en toda la extensión de la red.

# Recomendaciones

## • Planimetría e infraestructura

- Completar la topografía mediante la adición de los ramales que atraviesan propiedad privada.
- Establecer servidumbres legales y correctamente demarcadas en los tramos mencionados, donde es necesario que pase la tubería en propiedad privada.
- Garantizar la construcción de una nueva captación que permita no solo captar el agua de una forma más eficiente, sino que también garantice la no intrusión de aguas de escorrentía o sedimentos.

## • Demanda y consumo

- Realizar mediciones de aforos totales de la naciente, por el mayor tiempo posible.
- Realizar 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.
- Brindar asistencia técnica a los grandes consumidores en busca de un uso más racional del recurso hídrico.
- Actualización de las tarifas.

## • Sistema de distribución de agua potable propuesto

- Realizar las mediciones de campo necesarias para validar el diseño, una vez que las mejoras propuestas hayan sido implementadas.
- Comprobar la ubicación escogida para los nuevos depósitos y realizar los estudios de factibilidad correspondientes, además de

las expropiaciones y servidumbres necesarias.

- Instalar los hidrantes indicados.
- Capacitar al encargado por parte de la ASADA en cuanto a las mejoras propuestas, con el fin de que le dé mantenimiento al sistema en general, en especial en las válvulas y el sistema de tratamiento con cloro.
- Informar a la ASADA de las mejoras propuestas en la conducción principal y, especialmente, en los ramales, de modo que se realicen de acuerdo con el diseño propuesto y pueda funcionar a cabalidad.

# Apéndice

Se cuenta con 8 apéndices:

1. Análisis de micromedición.
2. Asignación de demanda por nudos.
3. Reporte de EPANET del sistema de distribución de agua potable actual.
4. Reporte de EPANET del sistema de distribución de agua potable propuesto.
5. Leyes de control utilizadas en EPANET.
6. Modelación de hidrantes.
7. Presupuesto.
8. Planos (Lámina 01, 02 y 03).



# Anexos

Se presentan a continuación 6 anexos.

1. Extractos de Declaratoria de Impacto Ambiental Proyecto Hidroeléctrico Toro 3. julio 2005.
2. Mediciones de Caudales. Centro de Servicio Exploración Subterránea, 2007.
3. Estudios bacteriológicos, Laboratorios Clínicos Echando, marzo, 2007.
4. Análisis Físicoquímicos de potabilidad P.H Toro 3. Laboratorio Microtec, 2007.
5. Parámetros de calidad del Agua. Norma CAPRE, marzo 1994.
6. Disposiciones de instalación de hidrantes del departamento de Ingeniería de Bomberos del Instituto Nacional de Seguros.

# Referencias

## Libros

Mays, Larry W. 2000. **WATER DISTRIBUTION SYSTEMS HANDBOOK.** Estados Unidos: Editorial McGraw-Hill.

Babbitt, H & Doland, J. 1931. **WATER SUPPLY ENGINEERING.** 2nd ed. Estados Unidos: McGraw-Hill Book Company, Inc.

Douglas, A, Spurr, R & Lathrop C. 1916. **WATERWORKS HANDBOOK.** Estados Unidos. McGraw-Hill Book Company.

Beckwith, E Cattran, S, Chase, D. 2005. **ADVANCED WATER DISTRIBUTION MODELING AND MANAGEMENT.** Estados Unidos. Haestad Method Inc

U.S Army Corps of Engineers (USACE). 1999. **DESIGN OF SMALL WATER SYSTEMS.** Estados Unidos.

Saldarriaga, Juan G. 1998. **HIDRÁULICA DE TUBERÍAS.** Colombia. McGraw-Hill Interamericana.

Mott, Robert L. 1996. **MECÁNICA DE FLUIDOS APLICADA.** 4ta ed. Estados Unidos. Prentice Hall Inc.