

**Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas**

**Facultad de Construcciones**

**Departamento de Ingeniería Hidráulica**



## **TRABAJO DE DIPLOMA**

**Propuesta de rehabilitación para la red de abasto  
de agua potable de la Universidad Central “Marta  
Abreu” de Las Villas**

**Autor: LeidyMartinez García**

**Tutor: Ing. Vitaliy Danilo Suárez Chernov**

**Santa Clara**

**2016**

**"Año 58 de la Revolución"**

**Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas**

**Facultad de Construcciones**

**Departamento de Ingeniería Hidráulica**



## **TRABAJO DE DIPLOMA**

**Propuesta de rehabilitación para la red de abasto  
de agua potable de la Universidad Central “Marta  
Abreu” de Las Villas**

**Autor: LeidyMartinez García**

**Tutor: Ing. Vitaliy Danilo Suárez Chernov**

**Santa Clara**

**2016**

**“Año 58 de la Revolución”**



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

---

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

---

Firma del Tutor

---

Firma del Jefe de Departamento  
donde se defiende el trabajo

---

Firma del Responsable de  
Información Científico-Técnica

## **PENSAMIENTO**

Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la  
voluntad

Albert Einstein

## DEDICATORIA

*A mi mamá, mi papá, hermanos y toda mi familia, porque han sido un motor en momentos de fuente de inspiración.*

*A todos mis amigos y aquellas personas que me han ayudado durante el transcurso de la carrera dándome cariño, comprensión, consejos y dedicación hasta el último momento y en especial en el que dediqué a la elaboración de este trabajo para de manera exitosa llegar a su culminación.*

## AGRADECIMIENTOS

*Agradezco a la base de todo, a mi familia en especial a mis padres quienes con sus consejos fueron el motor de arranque y mi constante motivación, muchas gracias por su paciencia, comprensión y sobre todo por su amor.*

*Muestro mis más sinceros agradecimientos a mi tutor Ing. Vitaliy Danilo Suárez Chernov quien con sus conocimientos y su guía fue una pieza clave para cada etapa de desarrollo del trabajo.*

*Por último quiero agradecer a mis compañeros por convivir todo este tiempo conmigo, por compartir experiencias, alegrías, frustraciones, tristezas, peleas, celebraciones, y a todos los que aportaron su granito de arena a mi formación como profesional.*

*A Todos Gracias*

## TAREA TÉCNICA

Escriba aquí las tareas que debe ejecutar hasta la confección del informe final (Obligatoria)

Esta página debe estar firmada por el estudiante y por el tutor, expresión del compromiso entre ambos.

---

Firma del Autor

---

Firma del Tutor

## RESUMEN

Con los cambios constantes en el medio en el que las tuberías se desempeñan y el desgaste inevitable, debido al tiempo de funcionamiento, en las redes de distribución de agua, se necesita cambio de tuberías que permitan el normal funcionamiento del sistema y garantice la entrega de agua a los usuarios.

Debido a la situación actual del sistema de abastecimiento de agua en la Universidad Central Marta Abreu de las; Villas es necesario la rehabilitación de la red, como solución para su correcta operación definiéndose los escenarios de mallado unitario y sectorizado como alternativas a modelar su comportamiento con las herramientas del software WATERGEMS basado en los parámetros del índice de resiliencia y el coeficiente de uniformidad.

## Abstract

With the constant changes in the environment in which the pipes are played and the inevitable wear due to running time in the distribution networks of water, change of pipes that allow normal system operation is required and ensure delivery water users. Due to the current situation of water supply system in the Central University Marta Abreu of; Villas rehabilitation of the network is necessary, as a solution for proper operation unit defined scenarios meshing and sectorized as alternatives to model their behavior WaterGEMS software tools based on the parameters of the resilience index and the coefficient of uniformity.

## TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO .....	i
DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
TAREA TÉCNICA .....	iv
RESUMEN .....	v
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1. Estado del Arte .....	7
1.1 Generalidades de las redes de distribución .....	7
1.1.1 Principales conceptos y definiciones .....	8
1.1.2 Distribucion de la presión .....	8
1.2 Tipos de proyectos de redes de abastecimiento .....	11
1.2.1 Características de las resdes de distribución .....	11
1.2.2 División de una red de distribución .....	12
1.3 Tipos de redes de abastecimiento.....	15
1.3.1 Ventajas e inconveniente de las rede ramificadas y malladas .....	18
1.3.2 Criterios para la selección del tipo de red.....	20
1.4 Antecedentes en el análisis de sistemas de redes .....	20
1.4.1 Desarrollo de los método empleados en el analisis de redes .....	21

CAPÍTULO 2. Análisis de los Métodos.....	24
2.1 Métodos de cálculo en redes de tuberías.....	24
2.1.1 Coniciones de flujo permanente.....	25
2.1.2 Análisis de redes de tuberías considerando flujo permanente(análisis estático)	26
2.1.3 Metodología para la revisión, rehabilitación y diseño de redes tuberías de	
agua potable .....	27
2.1.4 Teoría fundamenta en el analisis de redes cerradas .....	30
2.1.5 Método del gradiente para el análisis de redes cerradas .....	34
2.2 Factores de comportamiento empleados para la optimización operacional de redes	
de distribución.....	37
2.2.1 Índice de Resiliencia .....	38
2.2.2 Coeficiente de uniformidad de presiones (CU) .....	42
2.2.3 Desviación estándar de presiones (DESV) .....	42
2.3 Características del software de modelación Bentley WaterGEMS.....	43
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN (u otro nombre de capítulo).....	48
3.1 Estado actual del sistema de abasto de la red de la UCLV. ....	48
3.2 Condiciones de operación con sistema de redes secundarias.....	50
3.3 Sectorización de la red de abastecimiento general.....	53
3.4 Análisis del índice de Resiliencia y el coeficiente de uniformidad de presiones...59	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	60
Conclusiones .....	60
Recomendaciones .....	60
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	61
ANEXOS .....	63

Anexo I	Tabla de los métodos existentes.....	63
Anexo II	Tabla de la demanda por cada nodo.....	68

## INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento esencial para la vida, por tal motivo, las antiguas civilizaciones intentaron ubicarse a lo largo de los ríos o de fuentes naturales de agua. Más tarde, los avances técnicos le permitieron al hombre transportar y almacenar el agua, así como extraerla del subsuelo, por lo cual los asentamientos humanos iniciaron su esparcimiento lejos de los ríos y de otras fuentes superficiales de agua. Actualmente, su uso en las poblaciones es diverso, pues sirve para consumo humano, en el aseo personal, y en actividades como la limpieza doméstica y en la cocción de los alimentos. Además, se usa para fines comerciales, públicos e industriales; por otra parte, es un elemento esencial en la irrigación de los cultivos, la generación de energía eléctrica, la navegación e incluso para fines recreativos.

De la misma forma en que ha evolucionado el uso del agua a lo largo del tiempo, lo ha hecho el término "abastecimiento de agua", que en nuestros días conlleva el proveer a las localidades urbanas y rurales de un volumen suficiente de agua, con una calidad requerida y a una presión adecuada para abastecer los depósitos y evitar las sobre-presiones que dañan las instalaciones para su tratamiento y distribución. (Agua 1994)

Para abastecer de agua a una población se requiere de instalaciones que permitan captar, purificar, almacenar y finalmente distribuir el agua en las poblaciones. Las instalaciones que se encargan de distribuir el agua a los usuarios son los sistemas de distribución de agua comúnmente llamados redes de distribución.

Las tuberías de conducción de agua (ya sea agua potable como agua residual) pueden sufrir un deterioro en su servicio, que haga que sus capacidades de transporte hidráulico disminuyan. En largos tiempos de servicio, diferentes factores

pueden provocar potenciales fisuras en las tuberías que generan pérdidas volumétricas de agua irrecuperables, disminución en la capacidad de transporte, contaminación de las aguas, y como principal consecuencia, costos extraordinarios para la posterior reparación de la tubería. Es por ello necesario, en la gestión de las redes de conducción de agua, establecer una estrategia para su mantenimiento, que contrarreste el deterioro producido por el uso en el tiempo.

El servicio de acueducto es primordial en el desarrollo de la sociedad, por eso se hace necesario buscar herramientas que garanticen la buena prestación del servicio a los usuarios finales, reduciendo las posibilidades de falla.

El sistema de abastecimiento de agua de la Universidad Central Marta Abreu de las Villas en su búsqueda de mejorar la prestación del servicio ha implementado diferentes actividades con el fin de optimizar el plano de presiones en la red de distribución, ya que cuando se presentan altas presiones en los nodos con el paso del tiempo se generan daños y deterioros en la tubería que se traducen en un mal uso de los recursos del sistema y altos costos de funcionamiento disminuyendo la confiabilidad en la red.

Para la representación de sistemas de simulación es imprescindible el uso de modelos, tanto físicos como los más complejos modelos numéricos de simulación computacional, ya que permiten la representación en forma continua en el espacio y en el tiempo de lo que ocurre en el sistema, y por otro lado, es susceptible de representar escenarios que no han ocurrido todavía, por lo tanto permite indagar en el comportamiento, en este caso, de la red. En este sentido la utilización de modelos como herramienta de representación del funcionamiento de la red de distribución de agua para la correcta gestión del abastecimiento es unapráctica generalizada, especialmente cuando las redes o sistemas hidráulicos a modelar son complejos. (FUERTES, V.S.; GARCÍA-SERRA, J.; IGLESIAS, P.L.; LÓPEZ, G.; MARTÍNEZ, F.J.; PÉREZ 2002)

La rehabilitación en una red de distribución de agua potable constantemente se convierte en un factor que obstaculiza la prestación del servicio a los usuarios finales, debido a la importancia que tiene el suministro de agua potable en la

comunidad es de gran utilidad establecer una metodología que permita priorizar los cambios necesarios en la tubería reduciendo los inconvenientes producidos en este proceso, además de crear un orden y controlar los efectos en el resto de la red.

Al rehabilitar la red, el Índice de Resiliencia del sistema mejora sustancialmente permitiendo la uniformización de las presiones en el distrito evaluado, lo cual se visualiza en una distribución de energía más equitativa.

Actualmente el ingeniero calculista de redes cerradas presurizadas de distribución de agua potable dispone de muchas herramientas poderosas (software) para el análisis y diseño de estos sistemas; sin embargo el ingeniero debe aspirar a ser algo más que un calculista que maneje a nivel de usuario los nuevos programas como una caja negra, donde introduzca los datos por una parte y la computadora les responda lo que debe hacer, por la otra.

La decisión sobre el software a utilizar depende tanto de los alcances deseados del análisis de la red, como de los recursos disponibles, así como de su utilización a futuro. Para un ingeniero que revise o diseñe una red pequeña de tuberías puede ser suficiente un programa de cálculo desarrollado por él mismo, no obstante para un organismo operador de una red en una ciudad, puede ser necesario el uso de un programa que además de calcular su funcionamiento permita el uso simultáneo del software por varios ingenieros para su monitoreo y operación en tiempo real.

Independientemente de la complejidad de la red cerrada presurizada de tuberías, del software disponible como herramienta, y del tipo de análisis, el ingeniero calculista, debe estar familiarizado con los componentes de la red, su rango de operación, así como las bases, alcances y limitaciones del método de cálculo y del software empleado, pues es necesario dicho conocimiento para detectar errores de cálculo, funcionamiento y operación, así como para proponer de manera racional los cambios o adecuaciones necesarias a la red de abastecimiento para lograr un funcionamiento satisfactorio.

Durante varias décadas pasadas se ha estado desarrollando distintos tipos de software con el objetivo de modelar las redes de distribución de agua y así poder estimar los diferentes aspectos que influyen en estos sistemas.((AWWA) 1989)

La modelación de redes de abastecimiento de agua requiere la representación matemática del comportamiento de los elementos que forman parte del sistema de distribución de agua. En la actualidad existen una cantidad notable de modelos de análisis de redes de distribución de agua. Algunos de los más significativos son:

- **EPANET** desarrollado por la Environmental Protection Agency (USA) y cuyos desarrollos pueden seguirse en (IGLESIAS, P.L.; LÓPEZ, P.A.; LÓPEZ, G.; MARTÍNEZ 2004). Probablemente es el modelo de análisis de más amplio uso dado el carácter gratuito de su distribución. Actualmente existen numerosas traducciones del mismo, entre ellas (IGLESIAS, P.L.; LÓPEZ, P.A.; LÓPEZ, G.; MARTÍNEZ 2004). Formula el problema basándose en el método del gradiente desarrollado inicialmente por (King, H. W. 1948) y posteriormente generalizado por (MONTGOMERY WATSON 1996)
- **KYPIPE** desarrollado en la Universidad de Kentucky (IGLESIAS 2001). Se trata de un modelo desarrollado mediante la formulación por mallas y la aplicación de la teoría lineal. Es probablemente de los pocos modelos que continúan aplicando la teoría lineal como alternativa clara al método del gradiente.
- **H2ONET** desarrollado por la empresa MWSoftInc (MONTGOMERY WATSON 1996)
- **WATERCAD**, desarrollado por la empresa Haestad Methods y MIKE NET, desarrollado por el (FUERTES, V.S.; GARCÍA-SERRA, J.; IGLESIAS, P.L.; LÓPEZ, G.; MARTÍNEZ, F.J.; PÉREZ 2002). Son modelos absolutamente similares en cuanto a su formulación aunque distintos en su manejo e interfaces de usuario. Todos ellos basan sus cálculos en los mismos principios que el algoritmo de cálculo desarrollado por la US EPA para su modelo EPANET.
- **SARA** (Software de Análisis de Redes de Agua) desarrollado en la Universidad Politécnica de Valencia (IGLESIAS 2001). Utiliza como punto de partida el modelo

desarrollado por la US EPA para el modelo EPANET, si bien dispone de algunas modificaciones en el cálculo para contemplar aspectos como la gestión de nudos que por operaciones de la red quedan desconectados. Uno de los elementos más característicos de las redes de abastecimiento son los depósitos. Su caracterización es sencilla en régimen permanente, si bien requiere de consideraciones especiales en el caso de abordar una simulación dinámica del problema. Su papel fundamental en los sistemas de distribución de agua es como elemento de regulación (LÓPEZ, G.; FUERTES, V.S.; MARTÍNEZ, F.J.; DÍAZ 2003).

•**WATERGEMS** Es una herramienta de Modelación y Administración Geoespacial para sistemas de agua que permite: construir modelos de datos existentes, integrar modelos con sistemas de información geográfica GIS, evaluar necesidades de capital para el sistema, Plantación Maestra y expansión del sistema. (Pimentel H., Marques S., Oliveira P. 2009).

Existen diferentes técnicas de integración y tratamiento computacional de los depósitos, tal como puede seguirse en (IGLESIAS 2001). No obstante, la mayor parte de los modelos enumerados anteriormente realizan una representación de los depósitos similar a la realizada en el modelo WATERGEMS. Por ello se ha seleccionado este modelo para el estudio de este tipo de elementos.

En este proyecto se implementó la metodología de priorización de rehabilitación en las tuberías en la red de abastecimiento de la UCLV, que busca uniformizar la presión en la red bajo la teoría del Índice de Resiliencia estableciendo un parámetro para la rehabilitación.

### **Problema Científico**

Las operaciones de bombeo en la red de abastecimiento de la Universidad central Marta Abreu de Las Villas cuenta con una deficiente distribución de presiones en los nodos de demanda, provocando un excesivo consumo energético debido a las pérdidas hidráulicas y la ocurrencia de fugas en la conducción.

**Hipótesis**

Si se diseña un sistema de tuberías secundarias acopladas a la red de abastecimiento de la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas a partir de las herramientas de modelación hidráulica WATERGEMS, entonces es posible incrementar el coeficiente de uniformidad de presión y el índice Resiliencia como elementos principales de la rehabilitación Hidráulica

**Objetivo General**

Desarrollar la modelación hidráulica del diseño propuesto para la red de abastecimiento de agua en la Universidad Marta Abreu de Las Villas mediante el software WATERGEMS para determinar el coeficiente de uniformidad de presión y el índice de Resiliencia en los nodos del sistema.

**Objetivos específicos:**

- Establecer las bases teóricas correspondientes a las tipologías de los sistemas de tuberías en redes de abastecimiento de agua potable y los criterios de diseños empleados para su modelación hidráulica.
- Definir los procedimientos y modelos empleados en el cálculo de las redes de abastecimiento así como las características de la herramienta de modelación (WaterGEMS) para el diseño del sistema general.
- Determinar el comportamiento de los parámetros hidráulicos para los distintos escenarios referidos al sistema de abastecimiento de la Universidad Central Marta Abreu de las Villas.

## **CAPÍTULO 1. Estado del Arte**

### **1.1 Generalidades de las redes de distribución**

Un sistema moderno de abastecimiento de agua se compone de instalaciones para la captación, almacenamiento, conducción, bombeo, tratamiento y distribución. Las obras de captación y almacenamiento permiten reunir las aguas aprovechables de ríos, manantiales y agua subterránea.

Incluyen actividades como el desarrollo y cuidado de la cuenca de aportación, pozos y manantiales, así como la construcción de presas y de galerías filtrantes. La conducción trata la construcción de canales y acueductos, así como de instalaciones complementarias de bombeo para transportar el agua desde la fuente hasta el centro de distribución. El tratamiento es la serie de procesos que le dan al agua la calidad requerida y finalmente, la distribución es dotar de agua al usuario para su consumo.

En la figura 1.1 se muestra la configuración típica de un sistema de abastecimiento de agua en localidades urbanas. Es importante mencionar que una vez que el agua ha sido empleada, debe ser desalojada a través de una red de alcantarillado y conducida a una planta de tratamiento para que posteriormente pueda ser reutilizada o reintegrada a la naturaleza sin causar deterioro ambiental.

Este presenta los conceptos pertenecientes al área de redes de distribución de agua, así como la metodología y recomendaciones para su diseño. Las obras restantes (captación, conducción, etc.) se tratan con mayor detalle en otros libros correspondientes a dichos temas.

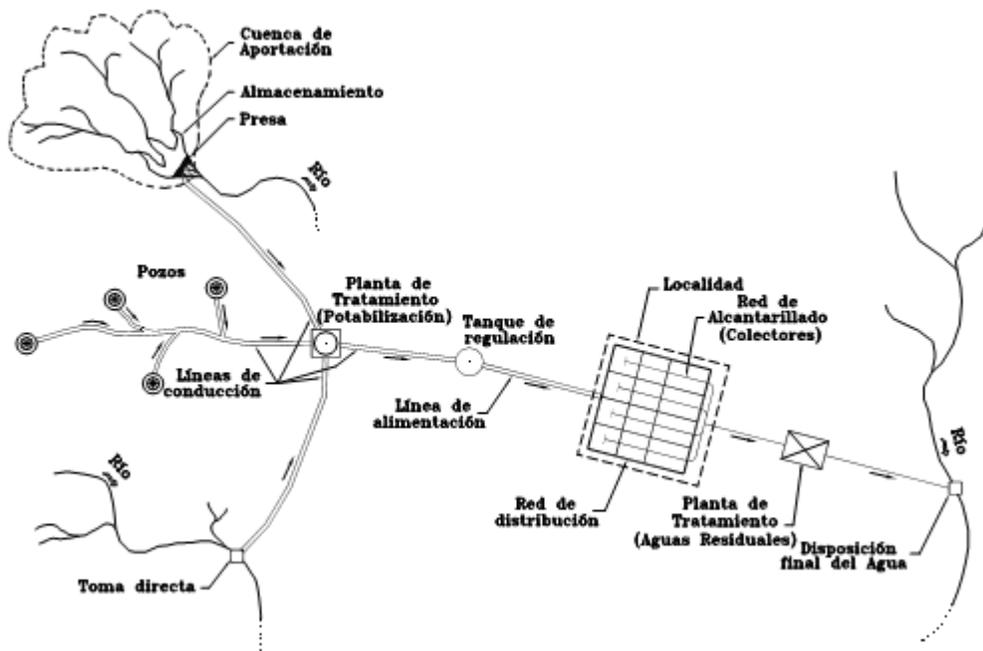


Figura 1.1 Configuración típica de un sistema de abastecimiento de agua en localidades urbanas.

### 1.1.1 Principales conceptos y definiciones

Una red de distribución (que se denominará en lo sucesivo red) es el conjunto de tuberías, accesorios y estructuras que conducen el agua desde tanques de almacenamiento hasta la toma domiciliaria o los hidrantes públicos. Su finalidad es proporcionar agua a los usuarios para consumo doméstico, público, comercial, industrial y para condiciones extraordinarias como el extinguir incendios.

La red debe proporcionar este servicio todo el tiempo, en cantidad suficiente, con la calidad requerida y a una presión adecuada.

### 1.1.2 Distribución de la presión

La presión o carga hidráulica que actúa en un punto de una tubería se define por la diferencia entre la cota piezométrica en este punto y la cota del centro de la tubería.

En redes de distribución es común manejar las presiones con relación al nivel de la calle en vez de referirlas al centro del tubo. En este caso se les llama presiones disponibles o libres y se calculan para los cruceros de las tuberías.

### **Presiones admisibles**

El régimen de presiones en una red depende de dos factores: la necesidad del servicio y las condiciones topográficas de la localidad.

Las necesidades del servicio obligan por una parte a seleccionar una presión mínima capaz de atender dos clases de requerimientos: los de las edificaciones y la demanda contra incendio.

Por otro lado, presiones muy altas en la red requerirán de tuberías y accesorios más resistentes (más costosos) e incrementarán las fugas (en caso de existir). Por lo tanto, en ningún punto de la red la presión debe exceder una presión máxima permisible.

La presión mínima debe verificarse en la red de distribución de tal manera que en todos los puntos se tenga una presión por lo menos igual a ésta en la hora de máxima demanda y, se garantice un suministro mínimo. En cambio, la máxima se presentará cuando exista poca demanda y la red continúe funcionando a presión.

El establecimiento de estas condiciones en una localidad se combina con su topografía. Como resultado de esto, en los puntos más elevados, la presión disponible en las horas de máximo consumo no debe ser inferior a la presión mínima requerida; en cambio, en los más bajos, esta presión no debe ser superior a la presión máxima especificada en las horas de menor consumo.

### **Zonas de presión**

Las zonas de presión son divisiones realizadas en la red de distribución debido a la topografía, el tamaño o las políticas de operación de la localidad.

La zonificación o división en zonas de presión es aconsejable cuando se sobrepasan las presiones admisibles en la red de distribución, es decir, al cumplir con la presión mínima requerida en una parte de la red se sobrepasa la presión máxima permisible en otra parte de la misma. Lo anterior sucede cuando la topografía de la localidad es muy irregular o cuando la localidad es muy grande.

Usualmente las zonas de presión pueden interconectarse entre sí para abastecerse en forma ordinaria cuando se tiene una sola fuente, o extraordinaria

(incendio, falla de la fuente, reparaciones, etc.) cuando se tienen varias fuentes. La interconexión entre las zonas de presión se hace mediante la maniobra de válvulas, descarga directa a tanque o uso de válvulas reductoras de presión en el caso de zonas bajas, o de rebombes a zonas altas.

Las políticas de operación influyen en la zonificación debido a la existencia de límites políticos, mejor control del abastecimiento y su distribución, así como de la operación y mantenimiento de la red de distribución.

Son posibles tres esquemas de suministro a zonas de presión:

- Suministro en serie. Cuando se tiene una red dividida en zonas de presión, generalmente no es posible que cada una tenga su propia fuente de abastecimiento. Así, la zona de presión que recibe el agua deberá abastecerá las colindantes por medio de la descarga directa a tanques, cajas rompedoras de presión o válvulas reductoras de presión, en un terreno descendente; o por rebombes en el caso de un terreno ascendente.

Es recomendable que cada zona tenga su tanque de regulación. En casos excepcionales puede emplearse el bombeo directo a las zonas altas. Si así sucede, las bombas y tuberías de alimentación de la zona se diseñarán para el gasto máximo horario en el día de máxima demanda. Es necesario un estudio técnico-económico para comparar esta variante con la de un tanque de regulación, bombas y tuberías diseñadas con el gasto máximo diario.

- Suministro en paralelo. Se le llama así cuando cada zona de presión se abastece mediante líneas de conducción independientes y que poseen su propio tanque de regulación.
- Suministro combinado. Este esquema se utiliza cuando la red de distribución se abastece mediante varias fuentes. Cada una de ellas lo hace a una parte de la red, y esas partes se unen entre sí tanto en paralelo como en serie.

## **1.2 Tipos de proyectos de redes de abastecimiento**

La mayor parte de las obras que se hacen en las redes de distribución en las ciudades son para mejorar o para ampliar las redes que ya existen, solamente una pequeña proporción son para dar servicio a zonas nuevas o aisladas. Por tanto, se requieren dos tipos de proyectos denominados de rehabilitación y nuevos.

Los proyectos de rehabilitación se hacen cuando se debe modificar una parte de la red para mejorar su funcionamiento hidráulico, o bien, cuando cambios en el uso del suelo o ampliaciones a la zona de servicio obligan a incrementar la capacidad de la red de distribución.

Los proyectos nuevos se requieren cuando se debe dar servicio por primera vez a una zona, o cuando es necesario hacer una ampliación a una red existente que por su magnitud en proyecto ya no puede catalogarse como una rehabilitación.

### **1.2.1 Características de las redes de distribución**

Los esquemas básicos o configuraciones se refieren a la forma en la que se enlazan o trazan las tuberías de la red de distribución para abastecer de agua a la toma domiciliaria. Se tienen tres posibles configuraciones de la red: a) cerrada, b) abierta o c) combinada.

Antes de definir las posibles configuraciones de la red es conveniente definir qué es un circuito. Un circuito es un conjunto de tuberías conectadas en forma de polígono, donde el agua que parte de un punto puede volver al mismo después de fluir por las tuberías que lo componen. Cuando una red es cerrada (o tiene forma de malla), sus tuberías forman al menos un circuito. La ventaja de diseñar redes cerradas es que en caso de falla, el agua puede tomar trayectorias alternas para abastecer una zona de la red. Una desventaja de las mismas es que no es fácil localizar las fugas.

La red abierta se compone de tuberías que se ramifican sin formar circuitos (forma de árbol). Esta configuración de la red se utiliza cuando la planimetría y la topografía son irregulares dificultando la formación de circuitos o cuando el poblado es pequeño o muy disperso. Este tipo de red tiene desventajas debido a

que en los extremos muertos pueden formarse crecimientos bacterianos y sedimentación; además, en caso de reparaciones se interrumpe el servicio más allá del punto de reparación; y en caso de ampliaciones, la presión en los extremos es baja.

En algunos casos es necesario emplear ramificaciones en redes cerradas, es decir, se presentan ambas configuraciones y se le llama red combinada. Cabe destacar que la configuración de la red se refiere a la red primaria que es la que rige el funcionamiento de la red. Pueden darse casos de redes abiertas con tuberías secundarias formando circuitos, sin embargo, la red se considera abierta.

### **1.2.2 División de una red de distribución**

Una red de distribución se divide en dos partes para determinar su funcionamiento hidráulico: la red primaria, que es la que rige el funcionamiento de la red, y la red secundaria o "de relleno". La red primaria permite conducir el agua por medio de líneas troncales o principales y alimentar a las redes secundarias. Se considera que el diámetro mínimo de las tuberías correspondientes a la red primaria es de 100 mm. Sin embargo, en colonias urbanas populares se puede aceptar de 75 mm y en zonas rurales hasta 50 mm, aunque en grandes urbes se puede aceptar a partir de 500 mm. La red secundaria distribuye el agua propiamente hasta la toma domiciliaria. Existen tres tipos de red secundaria:

- a) Red secundaria convencional: En este tipo de red los conductos se unen a la red primaria y funcionan como una red cerrada. Se suelen tener válvulas tanto en las conexiones con la red primaria como en los cruceros de la secundaria. En la figura 1.2 se muestra este tipo de red, así como algunas de sus características.

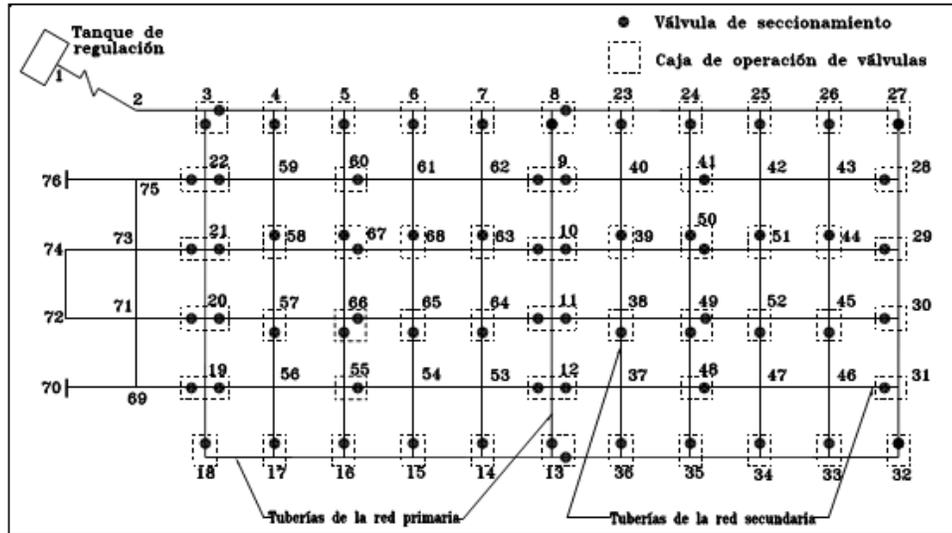


Figura 1.2 Red secundaria convencional.

b) Red secundaria en dos planos: En una red de este tipo, las tuberías se conectan a la red primaria en dos puntos opuestos cuando la red está situada en el interior de los circuitos, o bien en un solo cruce de las tuberías primarias en los casos de líneas exteriores a ellos (funcionando como líneas abiertas). Su longitud varía entre 400 y 600 m, en función al tamaño de la zona a la que se le da el servicio. En este tipo de red las tuberías que se cruzan no necesariamente se unen tal como se muestra en la figura 1.3.

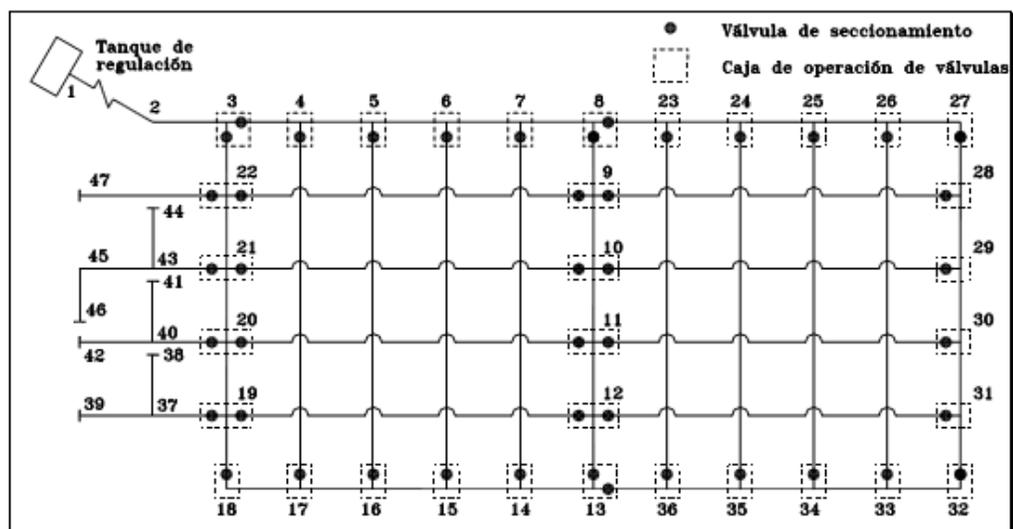


Figura 1.3 Red secundaria en dos planos.

- c) Red secundaria en bloques: En este caso las tuberías secundarias forman bloques que se conectan con la red primaria solamente en dos puntos y la red principal no recibe conexiones domiciliarias. La longitud total de las tuberías secundarias dentro de un bloque normalmente es de 2,000 a 5,000 m. A su vez, la red secundaria dentro de un bloque puede ser convencional (figura 1.4) o en dos planos (figura 1.3).

El tipo de red secundaria comúnmente recomendado es el de bloques y en dos planos dentro del bloque, debido a que tiene las siguientes ventajas:

a) De proyecto:

- El cálculo de revisión de la red es más sencillo.
- La distribución de las demandas para el cálculo hidráulico de la red primaria se simplifica notablemente debido a que la alimentación de los bloques se realiza de manera concentrada en dos puntos de cada uno de los bloques.

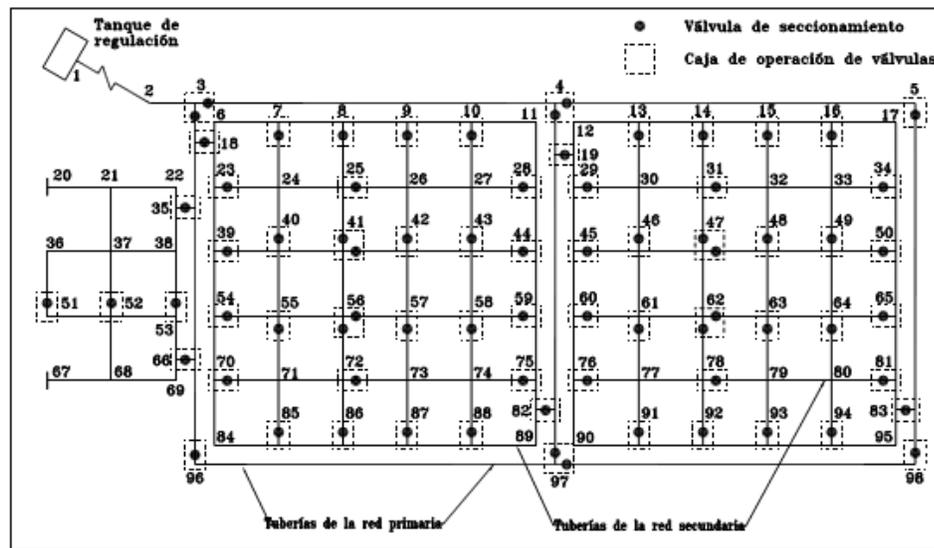


Figura 1.4 Red secundaria convencional en bloques

- El modelo del cálculo hidráulico es más preciso debido a que no hay consumos en ruta en las tuberías principales.
- Economía de tiempo horas-hombre al disminuir el número de cruceos por diseñar, en comparación con una red convencional.

b) De construcción:

- La instalación de las tuberías secundarias se realiza en forma más rápida, puesto que no se tienen cruceros, ni cajas de operación de válvulas dentro de la red secundaria.
- Las pruebas de presión hidrostática se facilitan.

c) De operación, mantenimiento y control de fugas:

- Menor número de válvulas a operar y mantener.
- Como cada tubería secundaria se alimenta mediante uno o dos puntos, se facilita notablemente la operación de la red en las labores de corrección de fugas y en la conexión de tomas nuevas.
- Un establecimiento natural de zonas de presión.
- Facilidades para hacer mediciones del consumo en la red. Éstas son utilizadas para la ejecución de estudios de fugas no visibles.
- Posibilidad de sustituir, reforzar o rehabilitar redes primarias afectando a un menor número de usuarios.

d) En costos de inversión:

- Economía en el suministro e instalación de piezas especiales debido al menor número de válvulas de seccionamiento.
- El número de cajas de operación disminuye y se logra mayor economía por este concepto.

### 1.3 Tipos de redes de abastecimiento

Entre los diversos criterios en los que pueden clasificarse las redes, exponemos la siguiente:

- En cuanto a su funcionamiento se encuentran: la red ramificada, la red reticulada o mallada y la red mixta.
- Por la diferenciación de presiones: redes en piso.
- Por el distinto uso en la calidad de agua: redes dobles

**La red ramificada:** El sistema ramificado consiste en una tubería principal o arteria maestra de la que se derivan arterias secundarias, de las que a su vez parten otras de tercero o cuarto órdenes cada vez menores y en forma análoga a los nervios de una hoja (fig.1.5).

En este tipo de red cada punto recibe el agua sólo por un camino, siendo en consecuencia los diámetros cada vez más reducidos, a medida que las tuberías se alejan de las arterias principales. Este tipo de red presenta el problema de que una avería, en un punto de la misma, deja en seco toda la red a continuación del punto averiado.

Por eso, actualmente teniendo en cuenta las garantías de servicio exigidas en las instalaciones urbanas, no es aconsejable este sistema más que en caso de poblados rurales con caseríos muy diseminados, poblaciones muy pequeñas o con un desarrollo de la población prácticamente lineal.

En caso de emplearse este tipo de red, debe considerarse que el estancamiento del agua en los extremos de los ramales (testeros puede alterar sus cualidades. No hay que olvidar que, aun habiendo un tratamiento previo del agua, ésta puede arrastrar partículas sólidas que se sedimentan dentro de la red y que se acumulan donde la velocidad es baja, es el caso de los testeros. La solución para evitar casos como éste es incluir en el diseño de la red llaves de desagüe, para hacer limpiezas frecuentes o instalar fuentes para mantener una circulación continua en la conducción terminal.

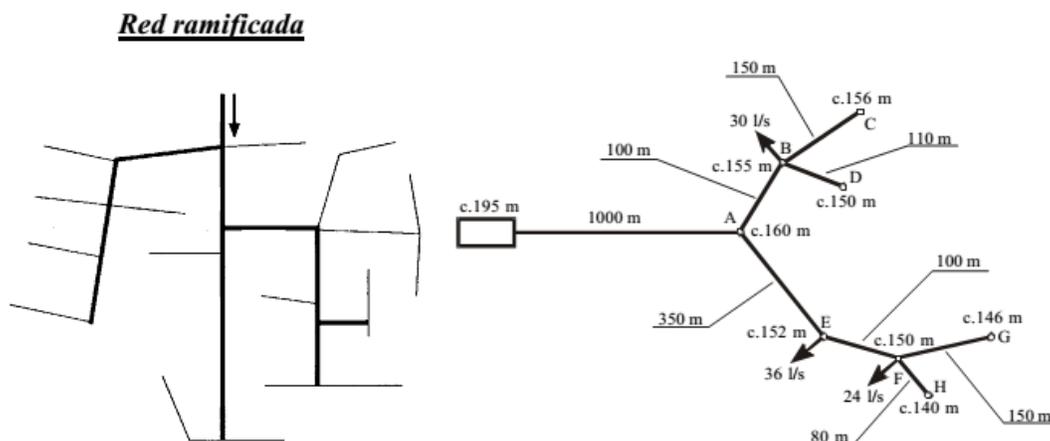


Figura 1.5 En la figura se observa el depósito, la tubería de alimentación y la red ramificada

**La red reticulada o mallada:** En el sistema de red reticulada, los ramales de la red anterior se unen formando mallas o retículos, el agua puede llegar a un punto determinado por varios caminos. En este tipo de redes existe un problema de indeterminación del sentido de circulación del agua, pero tienen la ventaja de que en caso de avería el agua llega al resto de la red por otras tuberías, no faltando más que en el tramo averiado que se puede aislar por medio de válvulas, emplazadas de modo que formen pequeños polígonos cerrados independientes. Las dimensiones de los tramos aislados dependen de la importancia de la población y de los efectos de la carencia de suministro en los mismos. (fig. 1.6).

**Red mallada o reticulada**

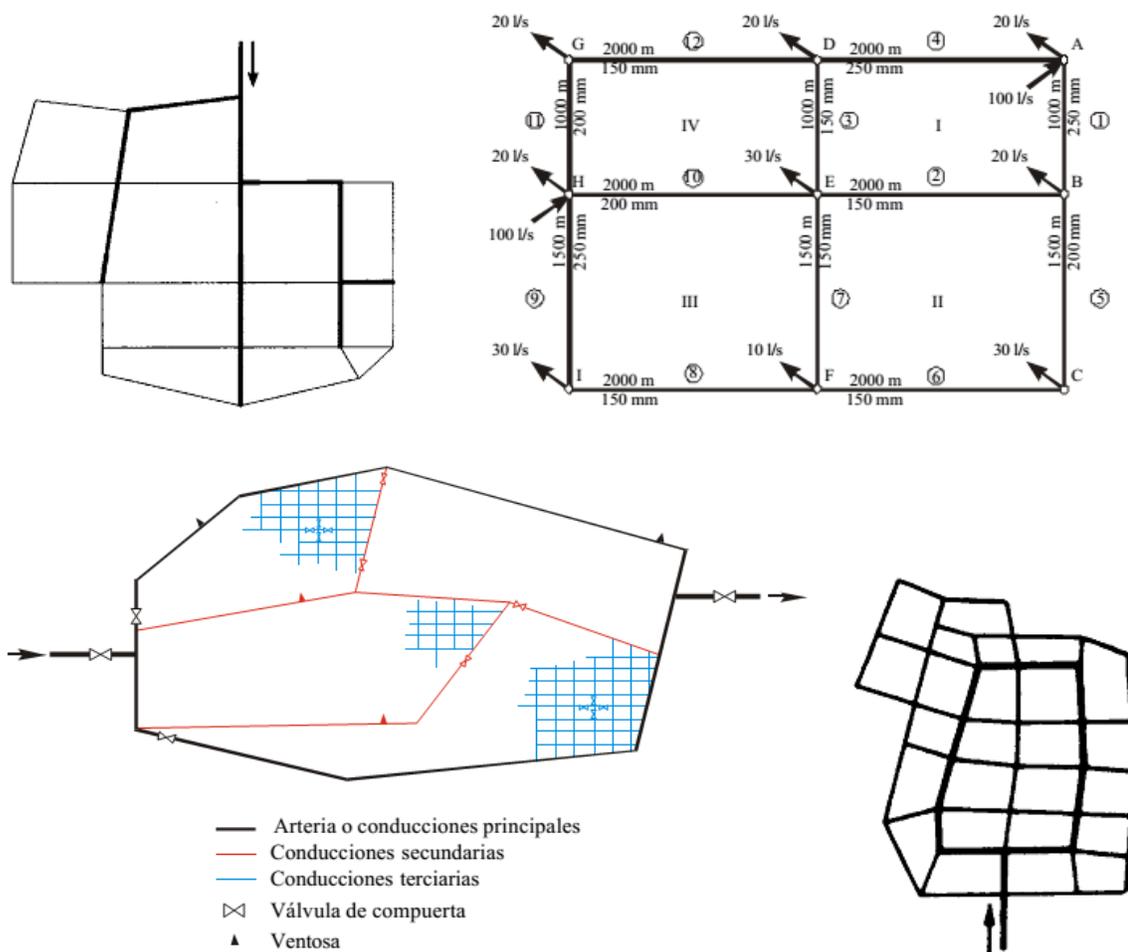


Figura 1.6 Ejemplos de redes malladas o reticuladas, en el primer dibujo no se han dibujado las conducciones terciarias que aparecen en el dibujo inferior

Por otra parte puede ocurrir que las puntas de consumo no coincidan en el tiempo en toda la población, si esto ocurre, la red mallada permite que en cada momento el agua siga los mejores caminos para abastecer la zona sobrecargada, reajustándose automáticamente la distribución de caudales, con lo que se mejora notablemente el suministro con relación a la red ramificada, en la que cada tramo tiene que conducir sus caudales máximos sin ayuda de los demás. Evidentemente, lo mismo ocurre con las presiones de servicio, existe una mejor distribución de presiones.

Un caso particular de la redes malladas, es la red circular que consiste en completar la arteria maestra central con otras arterias circulares o constituyendo un perímetro poligonal. Alude su nombre a su forma geométrica.

**Red mixta:** En las redes malladas pueden derivarse subsistemas ramificados, como el de la figura 1.7, este tipo de red, participa de las ventajas e inconvenientes de ambos sistemas.

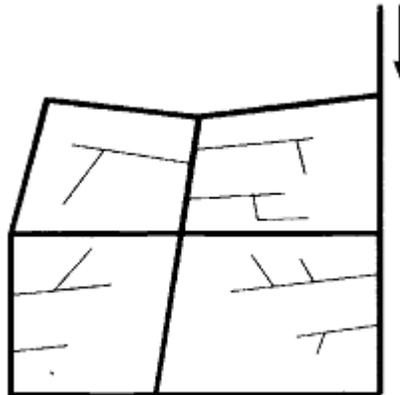


Figura 1.7

### 1.3.1 Ventajas e inconveniente de las rede ramificadas y malladas

**Las ventajas de una red ramificada son:**

- Tanto el diseño como el cálculo son más fáciles que en la redes malladas, por el hecho de estar determinadas las direcciones de circulación de los caudales.
- La longitud de conducción es inferior a la red mallada, los accesorios a instalar son menores, como válvulas, la obra civil es también menor.
- El coste de implantación es inferior.

**Los inconvenientes:**

- Cualquier rotura en una conducción deja aguas abajo sin servicio a los usuarios.
- Las presiones y los caudales disminuyen a lo largo del recorrido de los tramos.
- Los puntos terminales, testeros, al quedar el agua estancada acumula sedimentos pudiendo originar problemas de calidad en el agua.
- Las ampliaciones de la red, prolongando los ramales y los incrementos de consumo da lugar a presiones insuficientes, si no se tuvo en cuenta inicialmente en el proyecto.

**Las ventajas de una red mallada son las siguientes:**

- En el caso de rotura o corte en el servicio, el suministro puede continuar en toda la red, salvo en el tramo averiado, que quedará aislado mediante válvulas.
- Una mejor distribución de las presiones y menores pérdidas de carga en la red. No existen diferencias de presiones tan acusadas entre distintos usuarios, como en la red ramificada.
- La sedimentación y el estancamiento prácticamente inexistente al circular el agua en todas las direcciones.

**Los inconvenientes son:**

- El coste de ejecución es muy superior a las redes ramificadas, el sistema de valvulería a instalar para el correcto funcionamiento de la red así como otros accesorios, repercuten considerablemente en la instalación.

- El cálculo de la red es más complejo que en las ramificadas, en la actualidad la diversidad de programas de cálculo por ordenador, la hacen muy abordable.

### **1.3.2 Criterios para la selección del tipo de red**

Los criterios para decidir implantar una red ramificada o mallada no obedecen a normas fijas y concretas, pues ello depende prioritariamente del presupuesto existente para la ejecución de la obra, además, el tipo, tamaño y disposición urbanística de la población son determinantes, por que condicionan el trazado de la red. Teniendo en cuenta lo anterior y considerando las ventajas e inconvenientes de cada una de las redes podremos tomar la decisión más adecuada.

Atendiendo a las ventajas de una y otra red, nos inclinamos por la recomendación de implantar la red mallada, siempre que sea posible, la garantía de suministro es mucho mayor en éste tipo de red. La red ramificada es recomendable para pequeñas poblaciones inferior a 1000 habitantes, con trazado irregular o población diseminada, como ocurre en zonas rurales, también en poblaciones pequeñas con un desarrollo lineal.

### **1.4 Antecedentes en el análisis de sistemas de redes**

Adelantos científicos como los de Pitot (medición de la velocidad del flujo en 1732), Bernoulli (publicación de los principios de las leyes de energía aplicados a sistemas hidráulicos en 1738) y Euler (desarrollo la ecuación de energía en 1752) sientan las bases de la hidráulica que aún perdura en nuestros tiempos. En 1754 se construye el primer sistema de acueducto en Estados Unidos (Pensilvania). Los trabajos desarrollados por numerosos investigadores, como St. Venant, 8ecuacionesde cantidad de movimiento en 1843), Darcy –Weibash (primer desarrollo de la ecuación de pérdida de energía en 1845) y Hazen Williams (fórmula empírica para el cálculo de pérdidas de energía en 1906), son base para la modelación matemática del flujo en tuberías. Hardy Cross formula las primeras ecuaciones para el análisis de sistemas de redes en 1936.

La segunda mitad del siglo XX es de particular importancia, debido al desarrollo de los primeros computadores en la década de los años 50. Los primeros modelos digitales para la solución de redes de tuberías aparecen en las décadas de los sesenta y setenta. Surgen muchos métodos de análisis de redes numéricamente complejos, pero de relativa facilidad de solución debido al alto grado de desarrollo en la capacidad de cálculo en los computadores modernos.; uno de los últimos métodos es el del gradiente, publicado en 1988 por E. Todini y S. Polati. Hoy en día existen numerosos programas comerciales para la modelación hidráulica y de calidad de agua en redes de distribución de los sistemas de acueductos. Cabe anotar que los resultados obtenidos por dichos modelos jamás serán superiores a la calidad de los datos de entrada y no remplazaran el análisis juicioso del ingeniero, que debe aplicar dichos resultados en condiciones técnicas, económicas y sociales de muy diversa naturaleza.

En el caso de mallas cerradas, el equilibrio hidráulico de la red puede hacerse por cualquier método que permita el cierre o diferencia de presiones entre la entrada y la salida de la malla menor a 0.1 metros de columna de agua. Los métodos tradicionales de cálculo manual son Hardy Cross y Longitudes Equivalentes. Otros métodos, como por ejemplo el método del gradiente, pueden consultarse en otros textos de referencia.

A la fecha, existen varios programas comerciales que permiten la modelación y optimización de redes combinadas (abiertas y cerradas): Kypipe, WaterCAD, Epanet, Cybernet y Redes, entre otros.

#### **1.4.1 Desarrollo de los métodos empleados en el análisis de redes**

En los últimos 70 años, diferentes métodos numéricos han sido usados (y siguen empleándose) para estimar los caudales y presiones en redes de distribución de agua. Estos métodos van desde aproximaciones gráficas basadas en analogías físicas, métodos numéricos iterativos simples hasta complejas organizaciones matriciales para la resolución numérica de sistemas de ecuaciones no lineales. Es importante destacar que todos los métodos numéricos de análisis de régimen permanente en redes de distribución se basan en dos principios tan básicos como

antiguos que se cumplen independientemente de la configuración y elementos que componen el sistema, estos son:

- Ecuación de Conservación de Masa en Nodos
- Ecuación de Conservación de Energía aplicadas a un flujo incompresible a través de un sistema a Presión.

Las variables del modelo (algunas conocidas) son entonces:

- Los Caudales internos que circulan por las líneas.
- Los Caudales  $Q_D$  externos demandados por los nodos.
- La altura piezométrica  $H$  y Presión  $P$  en los nodos del sistema.
- Las pérdidas de carga  $h$  en cada línea.

Si bien los principios básicos conocidos también como Leyes de Kirchoff, son compartidos por todos los métodos y las formulaciones constituyen un sistema de ecuaciones resultantes de naturaleza no lineal que no tiene una resolución directa y requiere de procesos iterativos; las diferentes aproximaciones numéricas para la determinación de incógnitas (comprobación de diseño) en redes de distribución se pueden agrupar en dos grandes familias:

- Metodologías basadas en técnicas iterativas de Gauss-Seidely Jacobi (resolución del problema efectuando en cada iteración una resolución secuencial de cada una de las ecuaciones). Ejemplo: Métodos de Cross y Cornish.
- Metodologías de Equilibrio Simultáneo de las Variables (resolución basada en técnicas de linealización de las ecuaciones). Ejemplo: Métodos de Newton – Rapshon, Teoría Lineal y del gradiente hidráulico.

Es importante anotar que los métodos de Newton –Rapshon, Teoría Lineal y del gradiente hidráulico emplean formulaciones matriciales aprovechando el gran poder de procesamiento numérico de los computadores modernos.

Podemos establecer una breve síntesis histórica clasificando en 5 diferentes periodos los avances que nos han conllevado al estado actual de la tecnología. El

resumen (sujeto a diversas discusiones) se puede apreciar en la Tabla 1.1. (Anexo 1)

- Periodo I: Desarrollo fundamentos teóricos.
- Periodo II: Era pre-informática.
- Periodo III: Inicio de la era computacional.
- Periodo IV: Surgimiento de método de análisis avanzados en la era computacional moderna.
- Periodo V: La industria del software comercial para análisis de sistemas de distribución.

En los últimos 10 años (después de 2002), el desarrollo y avance de los paquetes comerciales ha sido tal que a pesar de compartir muchos la misma base del algoritmo de cálculo (Gradiente Hidráulico) existe una marcada diferenciación entre los diferentes software especialmente en conceptos de interoperabilidad, facilidad de uso, herramientas de productividad, procesos de consulta multi-criterio, operaciones de análisis espacial, posibilidades gráficas, integración con Sistemas de Información Geográfica (GIS), etc.

No obstante, lo anterior no elimina la necesidad de contar en los proyectos de modelación con la participación de ingenieros y técnicos experimentados, dado que sigue siendo responsabilidad del usuario de los modelos el entendimiento del sistema real y del modelo, y la toma de decisiones operativas de diseño y/o administrativas basadas en el buen juicio de ingeniería.

## **CAPÍTULO 2. Análisis de los Métodos**

### **2.1 Métodos de cálculo en redes de tuberías**

Las redes cerradas se caracterizan por tener al menos un circuito cerrado, garantizándose así que cualquier zona cubierta por la red sea alcanzada simultáneamente por más de una tubería, con el objetivo de aumentar la confiabilidad del abastecimiento. Las ecuaciones que gobiernan el flujo uniforme en tuberías se conocen con el nombre de ecuaciones de fricción, ya que por lo general relacionan la energía que se pierde en el proceso del movimiento del fluido a causa de la fricción entre la pared del ducto y el fluido. Todas las ecuaciones que describen el flujo uniforme en tuberías son de naturales similar: se basan en un equilibrio de fuerzas muy sencillo. Las diferencias entre estas ecuaciones, más de forma que de fondo, obedecen a los procesos empíricos utilizados en la deducción.

Son deducidas en forma clara y didáctica las ecuaciones de distribución de velocidad y de esfuerzo cortante en tuberías, las ecuaciones que describen la interacción fluido – paredes sólidas y las ecuaciones de fricción, utilizadas para el diseño de tuberías.

En orden cronológico se presentan los métodos más utilizados en el análisis y diseño de redes cerradas:

- 1936: Método de Hardy Cross con corrección de caudales en tuberías.
- 1938: Método de Cornish con corrección de cargas de presión en tuberías.
- 1970: Método de Newton – Rapshon.
- 1972: Método de la teoría lineal

- 1988: Método del gradiente hidráulico.

La presentación de los métodos más utilizados en el análisis y diseño de redes cerradas, obedece a dos hechos importantes. En primer lugar, los métodos más importantes están basados en los más antiguos, los cuales en términos matemáticos son más sencillos pero requieren un mayor número de iteraciones para llegar a un resultado final. La necesidad de disminuir los tiempos de análisis en computador, aspecto importante en las décadas de 1970 y 1980, impuso el desarrollo de nuevos métodos. En segundo lugar, en el mercado existen programas comerciales basados en diferentes métodos de análisis. Por consiguiente, es importante que los ingenieros encargados del diseño, construcción y operación de redes de acueductos conozcan la base matemática de los programas a su alcance.

En el análisis de redes cerradas se determinan los caudales en cada una de las tuberías y las cargas de presión en cada uno de los nudos de la red dadas unas condiciones de topografía, de caudales demandados en los nudos y de cargas de presión fijas en los nudos de entrada a la red. Se presenta una corta descripción de los diferentes programas comerciales para el análisis de redes de acueductos. Finalmente se introducen a dos tópicos avanzados relacionados con este tipo de redes de tuberías: el diseño optimizado de redes nuevas y el diseño optimizado de redes existentes.

### **2.1.1 Condiciones de flujo permanente**

Cuando se tiene una red de distribución de agua potable, ya sea existente o de proyecto, y se requiere determinar el nivel de servicio de la misma, es necesario llevar a cabo una revisión de su funcionamiento.

La revisión de la red tiene por objetivo el verificar que la red dispone de la capacidad necesaria para conducir por sus tuberías el gasto suficiente para satisfacer las demandas (residenciales, comerciales, industriales, etc.) de agua potable en cada punto de extracción.

Para llevar a cabo la revisión se analiza la red considerando flujo permanente, donde los gastos conducidos por todas las tuberías de la red no varían con el

tiempo (también se le suele llamar “red estática”). Una red de distribución real no trabaja con flujo permanente, dado que las demandas de agua por parte de los usuarios varían dependiendo de diversos factores entre los que predominan: el número de usuarios, la hora del día, la época del año y el clima de la localidad.

Aunque existe incertidumbre en el volumen de agua demandado en un cierto instante, se pueden utilizar ciertos criterios para determinar el gasto que pudiera demandarse en la hora y en el día de mayor demanda para una localidad específica en un punto particular de la red. A dicho gasto se le llama “gasto máximo horario”, aunque se acepta que es en el día de máxima demanda.

La revisión de la red considerando flujo permanente con el gasto máximo horario representa el analizar la red durante un período crítico de funcionamiento, y se considera que si la red opera satisfactoriamente durante dicho período, es decir, abasteciendo a los usuarios en cantidad y presión suficientes, operará correctamente en general. Para análisis más completos, suelen determinarse los gastos que se requiere conducir por las tuberías bajo condiciones de emergencia (falla de una tubería, incendios, etc.) u otros períodos críticos.

### **2.1.2 Análisis de redes de tuberías considerando flujo permanente(análisis estático)**

El funcionamiento de una red de distribución de agua potable considerando flujo permanente, depende de los siguientes factores:

- a) Las relaciones carga hidráulica - gasto en cada tubería.
- b) Las ecuaciones gobernantes del flujo en la red.
- c) Las condiciones de frontera del sistema de tuberías.

Para fines de análisis un nudo es: la unión de dos o más tuberías, ya sea de diferente diámetro o material (para poder incluir el efecto del cambio de la rugosidad interna de la tubería), el extremo de una tubería que no se conecta con alguna otra (en el caso de redes abiertas), los puntos de alimentación y de extracción de agua en la red, y en general cualquier punto de la red de tuberías donde interese calcular tanto el gasto que circula por la tubería como la presión disponible.

Es importante resaltar que a pesar de que las demandas de agua se ubican a intervalos irregulares a lo largo de cada tubería que compone la red, para el análisis se les concentra en los puntos extremos de cada tramo de tubería, es decir, en los nudos. Las demandas nodales o puntuales se determinan de acuerdo a diversos criterios entre los que figuran: el área que sirven, la densidad de población, el consumo per cápita, el consumo según el tipo de usuario, etc.

El análisis del funcionamiento de una red de distribución de agua involucra la determinación de ciertos parámetros desconocidos, los cuales se determinan con base en parámetros conocidos y condiciones de frontera. Por ejemplo, si se conocen los niveles piezométricos de las fuentes de abastecimiento de la red (niveles de la superficie libre en el caso de los tanques o presión suministrada a la red por las bombas ubicadas en los pozos), los niveles de terreno en cada nudo y los gastos máximos horarios en los nudos de demanda, pueden establecerse una serie de ecuaciones que permiten calcular los gastos que circulan en cada tubería, así como la presión disponible en cada nudo de la red (expresada como carga hidráulica en metros de columna de agua, (mca) o simplemente (m). Para ello, se numeran los nudos y las tuberías. De esta forma, la red puede ser codificada para ser analizada por computadora, pues solo en el caso de redes abiertas o de pocos tubos, es sencillo y poco laborioso el realizar el cálculo de forma manual.

### **2.1.3 Metodología para la revisión, rehabilitación y diseño de redes tuberías de agua potable**

La revisión hidráulica consiste en determinar los gastos que circulan en las tuberías y los niveles piezométricos (cargas de presión) en varios puntos de la red. Para ello se requiere de la información siguiente: características físicas de las tuberías, conexiones entre tuberías, gastos de demanda, elevaciones de los tanques reguladores, etc.

El diseño hidráulico de una red consiste en seleccionar los diámetros de sus tuberías, de tal modo que conduzcan el agua hasta los usuarios, con servicio continuo, en cantidad suficiente y con la presión requerida en toda la zona por abastecer. Sin embargo, para que el diseño de la red de tuberías de agua potable

sea el óptimo, se debe considerar no solo que el sistema propuesto sea eficiente desde el punto de vista hidráulico, sino que además sea una opción económica.

El proceso de selección de los diámetros de las tuberías de la red no es simple, ya que para llevar agua a los sitios de consumo, existen numerosas posibilidades, cada una con un costo determinado, que satisfacen las condiciones de operación hidráulica eficiente.

Para determinar una solución bajo la condición de diseño óptimo de una red de agua potable, es necesario contar con cierto número de soluciones, para elegir la que satisfaga las condiciones hidráulicas del sistema y que además sea una opción accesible considerando el aspecto económico.

Es importante señalar, que la solución óptima de una red de tuberías es única, y que el método propuesto no garantiza en todos los casos llegar a dicha solución; sin embargo, sí reporta una solución sub-óptima, es decir, muy cercana a la solución óptima.

Para la aplicación del método propuesto, se requiere hacer el análisis hidráulico de la red de tuberías tantas veces como sea necesario, en función del número de arreglos que se proponga.

El planteamiento que se lleva a cabo del método de diseño de redes desde un punto de vista óptimo, no requiere fijar una distribución inicial de los gastos en las tuberías de la red, lo cual es una ventaja con respecto a la mayoría de los métodos existentes y además, los diámetros propuestos para formar la red son diámetros comerciales.

Considerando que en un proyecto de diseño se cuenta con los gastos de demanda y las características de la zona por abastecer, se procede a realizar el trazo, el cual consiste en la unión de los puntos de demanda por medio de líneas, de modo tal que sigan la configuración urbana y la topografía de la zona. Por lo general, el trazo se define formando circuitos.

Será necesario asignar un mismo diámetro inicial para todas las tuberías de la red, será el diámetro mínimo, para definir con el cual se habrá de iniciar la

aplicación de la metodología propuesta, se evitaran cálculos innecesarios; por otro lado, influye de manera positiva y la experiencia del técnico encargado del estudio, ya que ese diámetro será el menor del arreglo de la solución final a la que se llegara.

En los primeros métodos se trataba que la suma de las longitudes de los conductos que unen los puntos de demanda de la red fuera mínima; sin embargo, ella se determinaba una vez que se habían escogido los diámetros de las tuberías de acuerdo con la experiencia del diseñador (Smith 1975). En (Dandy G., Simpson A. 1996) propusieron modificar el método anterior condicionando que en los circuitos, la longitud mínima de tubería se encontrara cuando se cumpliera que en un circuito la suma de las longitudes entre el gasto fuera nula. Con este método tampoco se encontraba propiamente un diseño económico.

(Burden 1979) planteó minimizar los diámetros utilizados por medio de una ecuación de pérdida de energía junto con una función lineal del costo de la tubería. Como esta función no está relacionada con los diámetros comerciales, al ajustarlos cambia su valor mínimo.

Con base en los primeros modelos se propusieron otros en los que se establece una función objetivo sujeta a varias restricciones; las cuales estaban basadas en el trazo de la red, en las condiciones de operación hidráulica y en los diámetros comerciales. Uno de los métodos de optimación de redes más conocidos es el de (Westlake 1968), en él se plantea como función objetivo a la suma de los costos de cada tubería. El costo de la tubería se obtiene al sumar los productos del costo por metro lineal asociado a un cierto diámetro por la longitud del tramo, para los tramos en que se divide la longitud de cada tubería. En el método se busca minimizarla. En las restricciones se establece que la suma algebraica de las pérdidas de carga en un circuito sea igual a cero. Las incógnitas a determinar corresponden a las longitudes de los tramos de cierto diámetro que se consideran en cada tubería de la red. Este método tiene la desventaja de que en cada tubería deben existir más de dos tramos con diámetros diferentes, lo cual no es práctico.

También requiere establecer de antemano la dirección y la magnitud de los gastos a conducir en cada tubería, lo que no asegura una solución óptima.

**2.1.4 Teoría fundamenta en el analisis de redes cerradas**

Si se considera la red cerrada mostrada en la figura 1.1. y se tiene en cuenta que  $Q_{D1}, Q_{D2}, Q_{D3}, Q_{D4}, Q_{Dn}$ , son los caudales consumidos en cada uno de los nodos, algunos de los cuales podrían tener un valor nulo en un momento dado, y que  $Q_{e1}, Q_{e2}, Q_{e3}, Q_{en}$ , son los caudales que alimentan la red de distribución, se puede establecer la siguiente ecuación

$$\sum_{i=1}^m Q_e = \sum_{i=1}^{N_u} Q_D \tag{2.1}$$

Donde:  $N_u$  es el número de uniones (nodos) que existe en la red.

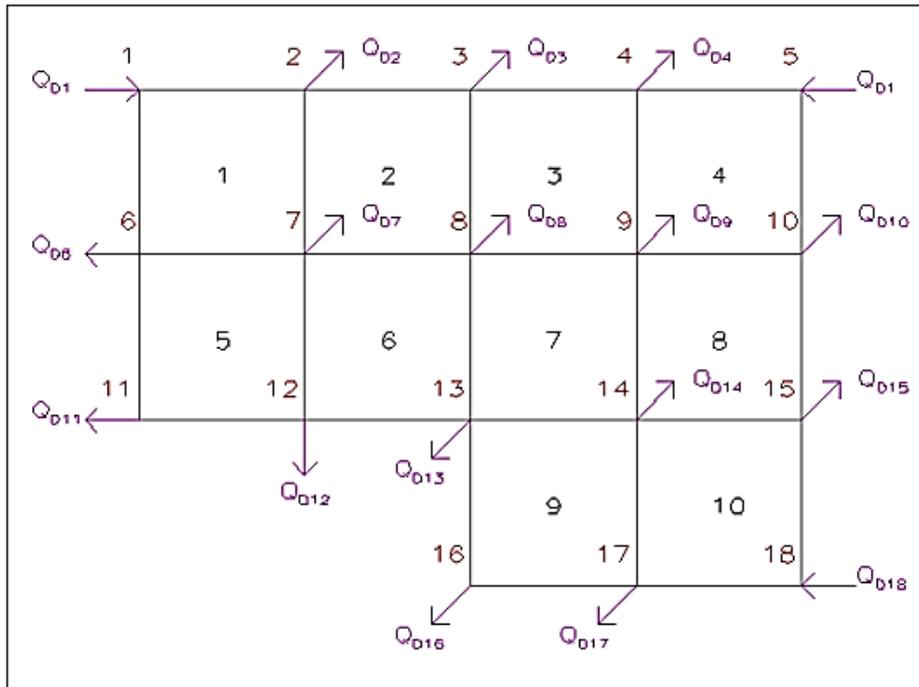


Figura 2.1. Caudales consumidos en los nudos y Caudales de Alimentación.

La ecuación (2.1) es una ecuación de conservación de la masa. Por otro lado, para cada uno de los nodos se puede establecer una ecuación similar, debido a que localmente se debe cumplir el que la masa se conserve, dicha ecuación es:

$$\sum_{j=1}^{NT_i} Q_{ij} + Q_{Dj} = 0 \quad (2.2)$$

Donde  $NT_i$  es el número de tubos que llegan al nodo  $i$  y  $Q_{ij}$  representa el caudal que pasa por la tubería  $ij$  hacia el nodo  $i$  desde el nodo  $j$ . Puede ser positivo (va hacia el nodo  $i$ ) o negativo (sale de dicho nodo).

Para cada uno de los caudales  $Q_{ij}$  de la ecuación (2.2) se puede plantear la siguiente ecuación de conservación de la energía entre los nodos  $i$  y  $j$ , incluyendo las pérdidas por fricción y las pérdidas menores:

$$H_j - H_i = \sum K_{mij} \frac{V_{ij}^2}{2g} + h_f \quad (2.2a)$$

$$H_j - H_i = \frac{V_{ij}^2}{2g} \left( \sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right) \quad (2.2b)$$

$$H_j - H_i = \frac{Q_{ij}^2}{2g} \left( \sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right) \quad (2.2c)$$

Si se despeja  $Q_{ij}$  de esta última ecuación se obtiene la siguiente expresión, la cual relaciona el caudal que por la tubería  $ij$  con las cabezas en los nodos  $i$  y  $j$ .

$$Q_{ij} = \left( \frac{H_j - H_i}{\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{i_{ij}}{d_{ij}}} \right)^{1/2} \sqrt{2g} A_{ij} \quad (2.3)$$

Si se reemplaza este último resultado en la ecuación (2.2) se obtiene:

$$\sum_{j=1}^{NT_i} \left( \frac{H_j - H_i}{\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{i_{ij}}{d_{ij}}} \right)^{1/2} \sqrt{2g} A_{ij} + Q_{Dj} = 0 \quad (2.4)$$

Donde NT<sub>i</sub> representa el número de tuberías que llega a la unión (nodo) i. A fin de tener en cuenta en forma automática el signo del caudal ij en la ecuación (2.3) se puede cambiar por la siguiente expresión:

$$Q_{ij} = \sqrt{2g} A_{ij} \left( \frac{1}{\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{i_{ij}}{d_{ij}}} \right)^{1/2} (H_j - H_i) (H_j - H_i)^{-1/2} \quad (2.5)$$

Este tipo de ecuaciones para el diseño y análisis de redes cerradas de tuberías se conocen como las ecuaciones de cargas de presión. En la red se tienen en total (UN-1) ecuaciones de este tipo, debiéndose conocer H, o cualquier otra cabeza en la red para poder solucionar dichas ecuaciones.

En caso contrario se puede suponer alguna de las cargas de presión, ya que los valores absolutos de éstas no afectan la distribución de caudales, y además debe tenerse en cuenta que las ecuaciones de cabeza son ecuaciones no lineales.

Por otro lado, a partir de los circuitos de tubos que conforman la red, los cuales pueden ser adyacentes o superpuestos, se pueden plantear las siguientes ecuaciones:

Ecuación de continuidad en las uniones que conforman el circuito:

$$\sum_{j=1}^{NT_i} Q_{ij} + Q_{Dj} = 0 \quad (2.6)$$

Ecuación de conservación de la energía alrededor del circuito:

$$\sum_{j=1}^{NT_i} h_{fij} + \sum_{j=1}^{NT_i} h_{mij} = 0 \quad (2.7)$$

Donde  $NT_i$  es el número de tubos del circuito  $i$ . Luego, si se utiliza la ecuación de Darcy-Weisbach en esta última ecuación, se obtiene la siguiente expresión:

$$\sum_{j=1}^{NT_i} \frac{V_{ij}^2}{2g} \left( \sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right) = 0 \quad (2.7a)$$

$$\sum_{j=1}^{NT_i} \frac{Q_{ij}^2}{2gA_{ij}^2} \left( \sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right) = 0 \quad (2.7b)$$

Las ecuaciones de tipo (2.7) se conocen como las ecuaciones de caudal de la red. En total se tienen  $NC$  ecuaciones de caudal, donde  $NC$  es el número de circuitos que conforman la red, Nuevamente se puede observar que son ecuaciones no lineales.

Lo anterior implica que para el análisis de la red cerrada se tienen en total  $NC + (NU - 1)$  ecuaciones que pueden ser utilizadas para encontrar las cargas de presión en cada nodo, una de las cuales debe ser conocida o supuesta, y los caudales en cada uno de los tubos que conforman la red. Sin embargo, este conjunto de ecuaciones no puede ser resuelto fácilmente debido a su naturaleza no lineal.

Una vez más debe establecerse una convención de signos para las ecuaciones de caudal (2.7). Los caudales en el circuito se consideran positivos si giran en el sentido de las agujas del reloj y negativos si lo hacen en sentido contrario. Para asegurar una correcta asignación del signo, estas ecuaciones se pueden transformar tal como se indica a continuación:

$$\sum_{j=1}^{NT_i} \frac{\sum K_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}}}{2gA_{ij}^2} Q_{ij}(Q_{ij}) \quad (2.8)$$

Los métodos de análisis de redes de tuberías utilizan conjuntos de ecuaciones de cabeza y de caudal para solucionar la red. En todos los casos se conocen los diámetros y rugosidades de las tuberías, lo cual implica que en realidad se trata de procesos de comprobación de diseño y no de diseños en sí. Sin embargo, en programas de diseño, con función objetivo de tipo optimización de costos, estos métodos de análisis deben informar alguna de las subrutinas del programa.

### 2.1.5 Método del gradiente para el análisis de redes cerradas

El método del gradiente para el cálculo de redes de distribución de aguas está basado en el hecho de que al tenerse un flujo permanente se garantiza que se cumplan las ecuaciones de conservación de la masa en cada uno de los nodos de la red y la ecuación de conservación de la energía en cada uno de los circuitos de ésta.

Por consiguiente, el método se basa en las siguientes dos condiciones:

- En cada nodo se debe cumplir la ecuación de continuidad:

$$\sum_{i=1}^{NT_i} Q_{ij} - Q_{Di} + Q_{ei} = 0 \quad (2.9)$$

- Debe haber relación no lineal entre las pérdidas por fricción y el caudal para cada uno de los tubos que conforman la red:

$$Q = -2 \frac{\sqrt{2gdh_i}}{\sqrt{f}} A \log 10 \left[ \frac{K_s}{3.7d} + \frac{2.51v\sqrt{f}}{\sqrt{2gd^3\sqrt{h_i}}} \right] \quad (2.10)$$

En esta última ecuación se ha utilizado la ecuación de Darcy-Weisbach junto con la ecuación de Colebrook – White, ya que durante el proceso de diseño el programador no tiene control sobre el número de Reynolds en todas las tuberías de la red, lo cual invalida el uso de la ecuación de Hazen – Williams.

Si se tienen en cuenta las pérdidas menores y la posible existencia de bombas en algunos de los tubos de la red, la anterior ecuación toma la siguiente forma general, válida para todos los tubos:

$$h_i = \alpha Q_i^n + \beta Q + \gamma \quad (2.11)$$

Donde:

n: exponente que depende de la ecuación de fricción utilizada (2.0 para el caso de la ecuación de Darcy – Weisbach

$\alpha$   $\beta$  y  $\gamma$ : parámetros característicos del tubo, la válvula y las bombas. Los factores  $\beta$  y  $\gamma$  sólo son necesarios para este último caso.

Para el método del gradiente hidráulico se hacen las siguientes definiciones adicionales:

NT: Número de tuberías de la red

NN: Número de nodos con presión piezométrica desconocida.

[A12]: Matriz de Conectividad asociada a cada uno de los nodos de la red. Su dimensión es NT x NN con solo dos elementos diferentes de cero en la i-ésima fila:

- 1 en la columna correspondiente al nodo inicial del tramo i.

NS: Número de nodos de carga de presión fija o conocida.

[A10]: Matriz topológica tramo para los NS nodos de carga de presión fija. Su dimensión es NT x NS con un valor igual a -1 en las filas correspondientes a los tramos conectados a nodos de carga de presión fija.

Teniendo en cuenta las anteriores definiciones, la pérdida de cabeza en cada tramo de tubería que conecte dos nodos de la red es:

$$[A11][Q] + [A12][H] = -[A10][H_C] \quad (2.12)$$

Donde:

[A 11]: Matriz diagonal de NT x NT definida como sigue:

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 Q_1^{n_1^{-1}} + \beta_1 \frac{\gamma_1}{Q_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_2 Q_2^{n_2^{-1}} + \beta_2 \frac{\gamma_2}{Q_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_3 Q_3^{n_3^{-1}} + \beta_3 \frac{\gamma_3}{Q_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_{NT} Q_{NT}^{n_{NT}^{-1}} + \beta_{NT} \frac{\gamma_{NT}}{Q_{NT}} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

### Características Especiales del Método del Gradiente

A continuación se presentan algunas de las características especiales que hacen del método del gradiente el mejor método de cálculo de redes, el cual podría ser incluido en un programa de diseño óptimo de este tipo de sistemas de tuberías. Algunas de dichas características se plantean comparándolas con las correspondientes al método de la teoría lineal, el método de cálculo de redes más ampliamente utilizado.

1. Se puede implementar un método de cálculo eficiente basado en el algoritmo del gradiente conjugado pre condicionado con la factorización incompleta de Cholesky y tratamiento de matrices dispersas.
2. El método de cálculo anterior garantiza la solución en máximo NN iteraciones.
3. La manipulación de las matrices dispersas típicas del método del gradiente reduce la memoria requerida y el tiempo de cálculo en el computador.
4. Todo lo anterior no es posible en el método de la teoría lineal ya que en éste el sistema que tiene que ser resuelto no es simétrico.
5. El método del gradiente resuelve un sistema de dimensión  $NN \times NN$ , mientras que el método de la teoría lineal resuelve un sistema de  $NT \times NT$ . Debido a que en todos los casos  $NN < NT$ , el método del gradiente es más veloz y requiere menos memoria en el computador, aun utilizando el mismo algoritmo de solución. El sistema de ecuaciones que se monta puede llegar a ser un 50% menor en el caso de redes grandes.
6. El método del gradiente calcula y ajusta simultáneamente los caudales y las cargas de presión, ya que es el método más eficiente, esto reduce el número de iteraciones con respecto al método de la teoría lineal.
7. El método del gradiente no requiere la definición de caminos de energía o circuitos, lo cual implica que el número de datos que el usuario debe proporcionar a los computadores menores, facilitándose así el manejo de los mismos.

## **2.2 Factores de comportamiento empleados para la optimización operacional de redes de distribución**

El nivel de satisfacción de los usuarios beneficiados con el suministro de agua potable, es el principal indicador para definir el grado de funcionamiento del sistema de distribución actual, este funcionamiento está sujeto a la efectividad y confiabilidad de ciertos indicadores de comportamiento del sistema como tal. De esta forma, la implementación de medidas de funcionamiento como herramientas de control garantiza que el estado de servicio de distribución en la red sea la mejor

posible.(LÓPEZ, G.; FUERTES, V.S.; MARTÍNEZ, F.J.; DÍAZ 2003). Los parámetros que miden el estado del servicio en forma general son la presión y el caudal demandado en cada uno de los nodos de consumo. Debido que el caudal demandado se mantiene constante en los nodos de consumo, la presión es el factor en la red que debe de ser controlado.

Los factores utilizados en el estudio se definieron de tal manera que representaran de la mejor manera el comportamiento del sistema de distribución con el objetivo de tomar la decisión más conveniente de ¿Cuál? y ¿Cuándo? cambiar una tubería del sistema para lograr aumentar la uniformidad de presiones en la red. A continuación se describen los factores utilizados

### 2.2.1 Índice de Resiliencia

Las pérdidas de presión ocasionadas por la fricción en las tuberías hacen que la confiabilidad del sistema disminuya. El Ir es un indicador de la vulnerabilidad de la red frente a la posibilidad de dejar ciertos nodos del sistema sin servicio en caso de la ocurrencia de una falla. Se fundamenta en la relación existente entre la resiliencia de un sistema y la cantidad de energía que éste disipa.

A menor energía disipada, mayor será la capacidad de respuesta del mismo debido a la cantidad de energía disponible.

(Pimentel H., Marques S., Oliveira P. 2009)propuso el índice de Resiliencia, basado en el concepto que la potencia por unidad de peso de entrada ( $P_{ent}$ ) en una red de distribución de agua es igual a la potencia por unidad de peso de operación del sistema ( $P_{int}$ ), ocasionada por los efectos de la fricción en las tuberías y la presencia de fugas en el mismo, más la potencia por unidad de peso entregada ( $P_{sal}$ ) en los nodos de consumo (ver Ecuación 2.14).

$$P_{ent} = P_{int} + P_{sal} \quad (2.14)$$

Donde,

$P_{ent}$ : Potencia por unidad de peso de entrada (W).

$P_{int}$ : Potencia por unidad de peso de operación del sistema ocasionada por los efectos de la fricción en las tuberías y la presencia de fugas en el mismo (W/Kg).

$P_{sal}$ : Potencia por unidad de peso entregada en los nodos de consumo (W/Kg).

La potencia por unidad de peso total de entrada incluye la potencia por unidad de peso suministrada por una bomba más la suministrada por los embalses (ver Ecuación 2.15).

$$P_{ent} = \sum_{i=1}^{n_e} (Q_e H_e)_i + \sum_{i=1}^{n_{pu}} P_i \quad (2.15)$$

Donde,

$Q_e$ : Caudal suministrado por el embalse

$H_e$ : Cabeza de entrada suministrado por el embalse

$P_i$ : Potencia por unidad de peso suministrada por la bomba  $i$

$n_{pu}$ : Numero de bombas en la red

La potencia por unidad de peso entregada en los nodos en términos de presión de servicio y caudal demandado ( $P_{sal}$ ) puede clasificarse de dos formas. La potencia por unidad de peso de entrega óptima ( $P_{sal}^{max}$ ), debida a una presión de servicio mínima en los nodos de consumo, y la potencia por unidad de peso de entrega real ( $P_{sal}^{real}$ ), debida a las presiones de entrega del servicio a partir de una configuración de tuberías. La Ecuación 2.16 presenta la expresión para la ( $P_{sal}^{max}$ ) y la Ecuación 2.17 para la ( $P_{sal}^{real}$ ).

$$(P_{sal}^{max}) = \sum_{j=1}^{n_n} Q_j H_j \quad (2.16)$$

$$(P_{sal}^{real}) = \sum_{j=1}^{n_n} Q_j H_j \quad (2.17)$$

Donde,

$Q_j$ : Demanda en el nodo  $j$

$H^*j$ : Presión mínima requerida en cada uno de los nodos de consumo

$H_j$ : Presión con la cual se satisface la demanda  $Q_j$

$n_n$ : Numero de nodos de toda la red

Por lo tanto, a partir de la Ecuación 2.14 es posible establecer la expresión para la potencia por unidad de peso de operación del sistema de distribución, la cual corresponde a la diferencia entre la potencia por unidad de peso de entrada y la potencia por unidad de peso de entrega en los nodos de consumo (ver Ecuación 2.18).

$$P_{int} = P_{ent} - P_{sal} \quad (2.18)$$

Sin embargo como se mencionó anteriormente, la potencia por unidad de peso de entrega se clasifica en una entrega óptima y en una de entrega real del servicio a partir de las cuales es posible definir las potencias por unidad de peso de operación óptima (Ecuación 2.19) y de operación real (Ecuación 2.2) de la red.

$$P_{int}^{max} = P_{ent} - P_{sal}^{max} \quad (2.19)$$

$$P_{int}^{real} = P_{ent} - P_{sal}^{real} \quad (2.2)$$

Por lo tanto es posible integrar los conceptos mencionados en un factor que relacione la potencia por unidad de peso de operación real y la potencia por unidad de peso de operación óptima del sistema de distribución con el fin de establecer el grado de eficiencia de entrega del servicio dada una configuración de tuberías. El índice de Resiliencia de la red define la relación entre las potencias mencionadas y por lo tanto es posible establecer el nivel de conservación de potencia presente en el sistema (ver Ecuación 2.21)

$$L_r = 1 - \frac{P_{sal}^{real}}{P_{sal}^{max}} \quad (2.21)$$

Al sustituir los valores apropiados se encuentra la expresión general para el índice de Resiliencia de la red (ver Ecuación 2.22). (Pimentel H., Marques S., Oliveira P. 2009).

$$L_r = \frac{\left[ \sum_{j=1}^{n_e} (Q_e H_e) i + \sum_{j=1}^{n_{pm}} P_i \right] - \sum_{j=1}^{n_n} Q_j H_j}{\left[ \sum_{j=1}^{n_e} (Q_e H_e) i + \sum_{j=1}^{n_{pm}} P_i \right] - \sum_{j=1}^{n_n} Q_j H_j^*} = \frac{\sum_{j=1}^{n_n} Q_j (Q_j H_j^*)}{\left[ \sum_{j=1}^{n_e} (Q_e H_e) i + \sum_{j=1}^{n_{pm}} P_i \right] - \sum_{j=1}^{n_n} Q_j H_j^*} \quad (2.22)$$

Donde,

$Q_j$ : Demanda en el nodo  $j$ .

$Q_e$ : Demanda en el embalse.

$H_e$ : Presión con la cual se satisface la demanda  $Q_e$ .

$H_j^*$ : Presión mínima requerida en cada uno de los nodos de consumo.

$H_j$ : Presión con la cual se satisface la demanda  $Q_j$ .

$n_n$ : Numero de nodos de toda la red.

### 2.2.2 Coeficiente de uniformidad de presiones (CU)

Al aumentar el índice de Resiliencia de la red, que representa la relación entre la potencia por unidad de peso de operación real del sistema con una configuración de tuberías dada respecto a la potencia por unidad de peso máxima de trabajo suministrada por las fuentes del recurso, se logra uniformizar el estado de presiones. La definición de potencia por unidad de peso máxima de trabajo hace parte del problema y busca la definición de qué tanta potencia por unidad de peso el sistema requiere para realizar la óptima distribución del servicio.

El factor utilizado para analizar el grado de uniformidad del estado de presiones en la red es el coeficiente de uniformidad (CU), definido en la (Ecuación 2.23), el cual relaciona la presión sobre todos los nodos con la máxima presión encontrada en la red de distribución de agua potable.

$$CU = \frac{\sum_{j=1}^{n_n} H_j}{n_n \max\{H_j\}} \quad (2.23)$$

Donde,

H<sub>j</sub>: Presión con la cual se satisface la demanda Q<sub>j</sub>

n<sub>n</sub>: Numero de nodos de toda la red

### 2.2.3 Desviación estándar de presiones (DESV)

La desviación estándar es una medida estadística del promedio de las diferencias entre un conjunto de valores respecto al promedio del mismo. Estas diferencias pueden ser positivas, cuando el valor se encuentra por encima del promedio, y negativas, cuando el valor se encuentra por debajo del promedio.

Con lo cual para efectos de la investigación se debe garantizar que en ningún momento se tengan valores menores a la mínima permitida en los nodos de

consumo, en este caso  $H^*$ . La Ecuación 2.24, muestra la manera como se calculará la desviación estándar del estado de presiones, a partir de las presiones en los nodos de consumo de la red de distribución.

$$DESV = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n_n} (H_j - \bar{H})^2}{n_n - 1}} \quad (2.24)$$

El plano óptimo de presiones se define como la magnitud absoluta de la presión del agua a la entrada de un sector, sub-sector, distrito o zona de la red de distribución de agua potable (aguas debajo de una válvula controladora o reductora de presión), tal que el caudal por pérdidas totales debidas a fugas no visibles, a daños (roturas de tubos, explosiones causados por terceros, etc.) es minimizado sino que se afecte en forma apreciable el volumen total de agua facturado ni se dejen cumplir los niveles de presión máxima mínima en una red establecidos por la normatividad colombiana referente al sector de agua potable y saneamiento básico.

### 2.3 Características del software de modelación Bentley WaterGEMS

**Bentley WaterGEMS** es un software comercial de análisis, modelación y gestión de redes a presión (sistemas de distribución o de riego) con una completa integración a entornos GIS, propiedad de la Empresa de Software **Bentley Systems, Incorporated** que produce soluciones para el diseño, construcción y operación de infraestructuras en diversos campos. WaterGEMS al igual que WaterCAD (producto de la misma casa de Software) permiten la simulación hidráulica de un modelo computacional representado en este caso por elementos tipo: Línea (tramos de tuberías), Punto (Nodos de Consumo, Tanques, Reservorios, Hidrantes) e Híbridos (Bombas, Válvulas de Control, Regulación, etc.). No obstante, WaterGEMS agrega a las capacidades de análisis hidráulico incluidas en WaterCAD, el soporte a entornos GIS y la inclusión de diferentes módulos de análisis avanzado.

WaterGEMS fue originalmente desarrollado por la Empresa Haestad Methods, Inc. con base en Watertown, CT (USA). Esta empresa fue adquirida por Bentley Systems a mediados del año 2004, adquisición a partir de la cual el producto comenzó a denominarse comercialmente como Bentley WaterGEMS.

WaterGEMS es producto cuyo lanzamiento se dio a comienzos del siglo XXI y es software posterior al producto WaterCAD de la misma casa de software lanzado al mercado en la década del 90. Para muchos expertos, WaterGEMS más que una evolución de WaterCAD es fundamentalmente un 'súper' licenciamiento del mismo, que adicional a las herramientas de análisis hidráulico en régimen permanente de dicho software y a otros análisis complementarios (ya incluidos en WaterCAD), agrega una integración transparente con entornos GIS e incluye en una única versión comercial todos los módulos de análisis avanzados que solo pueden adquirirse separadamente en WaterCAD. En este sentido, es un software cuyo usuario objetivo es la empresa operadora de abastecimientos, antes reguladores y/o importantes proyectos de consultoría.

En términos de tareas básicas e intermedias de Modelación Hidráulica, WaterCAD y WaterGEMS son productos similares (de hecho comparten el mismo motor de cálculo hidráulico) así como una misma estructura de modelo de datos, por tanto un modelo creado en WaterCAD puede ser leído en WaterGEMS y viceversa. Mientras WaterCAD, soporta una plataforma Autónoma (Stand Alone) así como MicroStation y AutoCAD (como adición al producto). WaterGEMS agrega a los anteriores entornos el soporte a ArcGIS.

El software cuyo algoritmo de cálculo se basa en el método del Gradiente Hidráulico, permite el análisis hidráulico de redes de agua (aunque puede usarse para cualquier fluido newtoniano) determinando las presiones en diversos puntos del sistema, así como los caudales, velocidades, pérdidas en las líneas que conforman la red hidráulica; así como otros muchos parámetros operativos derivados de los elementos presentes en el sistema como: Bombas, Válvulas de Control, Tanques, etc. a partir de las características físicas del sistema y unas condiciones de demanda previamente establecidas. WaterGEMS además permite

extender sus capacidades a temas de gestión a largo plazo de sistemas de abastecimiento incluyendo: análisis de vulnerabilidad, análisis de protección contra incendio, estimación de costos energéticos, calibración hidráulica, optimización, etc.

Este programa adicional a las herramientas convencionales para el análisis y modelación de redes a presión, cuenta con herramientas de productividad en los procesos de gestión de datos, construcción de modelos a partir de archivos externos, extracción de elevaciones, asignación de demandas a partir de técnicas de análisis espacial, preparación y gestión de escenarios, cálculos hidráulicos complementarios, gestión operativa y preparación de reportes y planos. Así mismo el software ofrece diversas opciones para visualización de resultados como reportes tabulares, perfiles, gráficos de variación temporal, anotaciones y codificación por color, etc.

El software además de contar con una interfaz gráfica autónoma (Windows Stand Alone), puede trabajarse de manera integrada entornos CAD como los son AutoCAD y Bentley MicroStation, y con entornos GIS como lo es ArcGIS. En consecuencia es un software que brinda la flexibilidad de poderlo trabajar en cuatro diferentes plataformas.

En los últimos años el software ha tenido una gran evolución especialmente en características como: interoperabilidad, facilidad de uso, herramientas de productividad, conexión con datos externos, procesos de consulta multi-criterio, operaciones de análisis espacial, posibilidades gráficas, integración con Sistemas de Información Geográfica (GIS), etc. Dentro de los más recientes desarrollos se incluyen las siguientes características:

- Intercambio de Datos con otros Sistemas de Información, Dispositivos Electrónicos y/o otros programas de gestión.
- Uso de Algoritmos Genéticos para procesos de calibración hidráulica automatizada, diseño óptimo y optimización energética.
- Detección Analítica de Fugas
- Planes de Vulnerabilidad ante eventos de Contaminación

- Integración con Sistemas SCADA
- Análisis de Calidad multi-parámetro
- Planificación para Renovación de Redes
- Integración con Análisis de Transientes Hidráulicos y Golpe de Ariete

WaterGEMS (descripción basada en versión V8i) posee diferentes herramientas y tipos de cálculo complementarios al análisis hidráulico convencional.

Tipos de Cálculo (Régimen Permanente):

- Análisis Hidráulico en Periodo Estático (también Conocido como Análisis SteadyStateó SS por su Siglas en inglés)
- Análisis Hidráulico en Periodo Extendido o Cuasi-Estático (también Conocido como Análisis EPS por su Siglas en inglés)
- Análisis de Calidad de Agua (Análisis de tipo EPS con tres variantes: Edad del Agua, Rastreo de Fuente o Constituyente)
- Análisis de Protección contra Incendio (Análisis de Tipo SS para analizar la capacidad de respuesta de la Red ante un evento de Incendio)
- Análisis de Costos de Energía (Determinación de la Energía Consumida y Costos en las Estaciones de Bombeo)
- Análisis de Segmentos Críticos o de Vulnerabilidad del Sistema ante cortes de servicio (Criticality Analysis)
- Análisis y Proyección de Roturas de Tuberías (Pipe Break Analysis)
- Análisis de Lavado de Tuberías por estrategias de Vaciado (Flushing Analysis)

**Herramientas Complementarias incluidas:**

- Centro de Control de Demandas (Demand Control Center)
- Administrador de Escenarios y Comparación (Scenario Management & Scenario Comparison)
- Construcción Inteligente de Modelos a partir de archivos externos (ModelBuilder)
- Asignación Automática de Elevaciones a partir de Modelos Digitales de Terreno (Trex)

- Asignación Automática de Demandas basada en Análisis Espacial (LoadBuilder)
- Generador de Polígonos de Thiessen

**Módulos de Análisis Adicionales - Incluidos:**

- Skelebrator: Simplificación o Esqueletización Inteligente de Redes
- Darwin Designer: Optimización de Diseño de Sistemas basado en Algoritmos Genéticos y según criterios económicos y restricciones hidráulicas
- Darwin Calibrator: Calibración Hidráulica de Redes basada en Algoritmos Genéticos y según correlación estadística con datos de campo
- Darwin Scheduler: Optimización Energética para Programación de Ciclos de Bombes basado en Algoritmos Genéticos
- Pipe Renewal Planner: Planeación para la Renovación de Redes basada en Análisis Multi-Criterio
- SCADA Connect: Conexión en tiempo real del Modelo Hidráulico con Sistemas SCADA

Adicional a los módulos anteriores, el usuario puede personalizar el Software WaterGEMS a través de la utilidad WaterObjects, que a través de aplicaciones y rutinas tipo VBA permite adicionar nuevas herramientas de cálculo y de visualización de resultados, extendiendo y personalizando las capacidades del software a proyectos o usos específicos.

## **CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN** (u otro nombre de capítulo)

### **3.1 Estado actual del sistema de abasto de la red de la UCLV.**

El suministro de agua potable a lo largo de la historia se ha convertido en una enorme y compleja estructura la cual con el paso del tiempo se deteriora y sufre daños que tiene un alto costo tanto económico como en el servicio.

En la actualidad la red de abasto de la UCLV no cuenta con la información suficiente, en la figura 3.1 se muestra que no aparecen algunas de las ubicaciones de las redes que se encuentran conectada a la red principal ya que no existe una actualización del sistema original debido a nuevas instalaciones que se han construido y no se han agregado a dichos planos, además de no conocer la cantidad de consumidores existentes. El sistema está compuesto de tuberías primarias de 10 plg y tuberías secundarias de 4plg con una altura aproximada de los tanques elevados de 10m de altura..

Para lograr un mejor funcionamiento de la distribución del agua potable y brindar un mejor servicio al usuario se hizo necesario realizar una propuesta de rehabilitación del sistema de abasto.

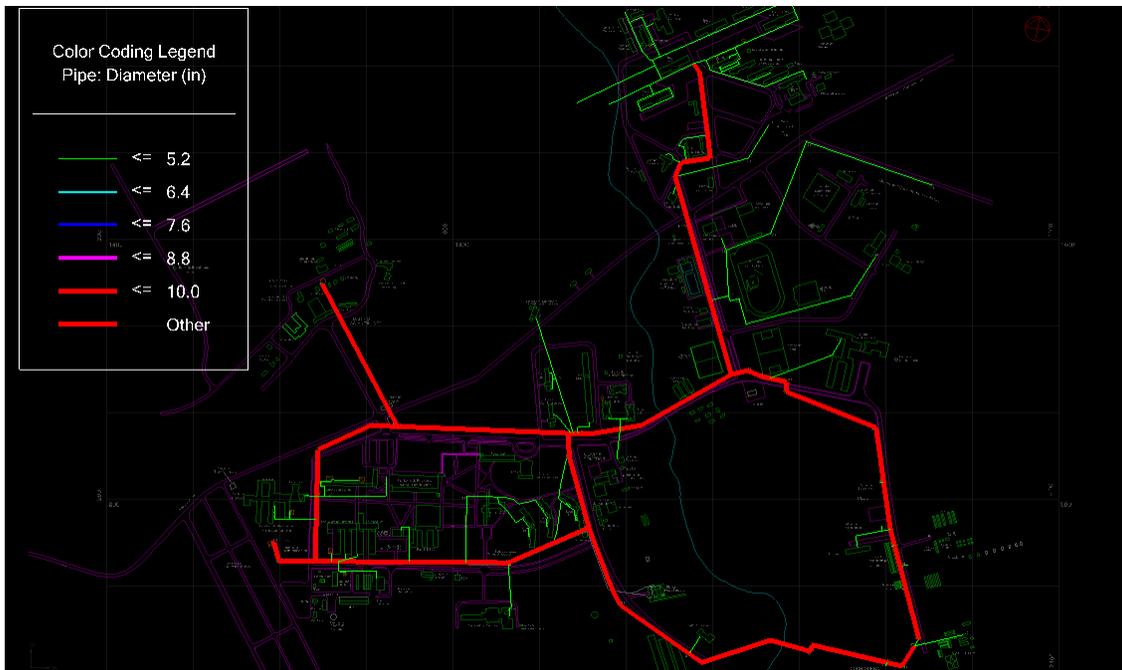


Figura 3.1 Sistema de abasto actual de la UCLV

En la figura 3.2 se muestra el punto de operación que equivale a una presión de 5m con un caudal de entrega de 48l/s por lo que es evidente que no será posible abastecer a los tanques elevados ubicados en el mismo

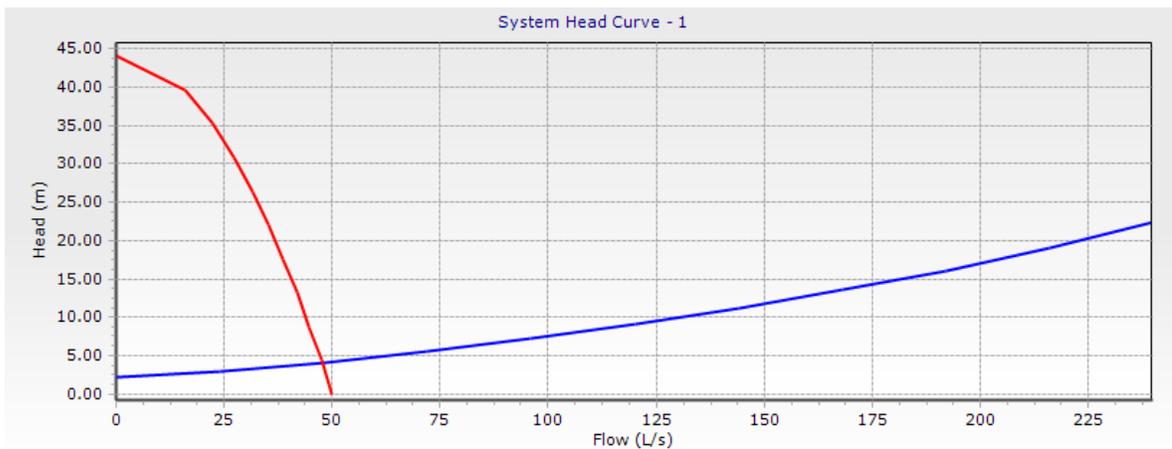


Figura 3.2. Curva característica del Sistema actual de la UCLV.

### 3.2 Condiciones de operación con sistema de redes secundarias.

Teniendo en cuenta las condiciones existentes es necesario crear un sistema de mallado acoplado a la red principal reflejado en la figura 3.3 que pueda suministrar la demanda de los consumidores.

Existen dos zonas de mayor densidad, la zona central y la de agropecuaria, que se encuentra más alejada del punto de entrada de la red, provocando la pérdida de presiones en la prestación de servicio impidiendo que la misma llegue a los tanques elevados, dando lugar a que se tenga que almacenar el agua en las cisternas existentes.

Para realizar el mallado de la red se aprovechó todos aquellos puntos más cercanos y se le agregaron secciones, logrando así una mayor uniformidad de las presiones



Figura 3.3 Sistema de mallado de la red en la UCLV

La modelación del nuevo escenario en el caso de la zona central (figura 3.4) con respecto a la bomba que se encuentra en funcionamiento, se logró que aumentara la carga debido al efecto del sistema de mallado (figura 3.5) permitiendo que el agua llegue hacia tanques elevados y cisternas a la misma vez, dejando estas

últimas como alternativa en horarios que no exista la operación de bombeo. Esto se ve de más utilidad en la zona residencial (figura 3.6) porque se puede realizar el servicio en varias ocasiones del día logrando la demanda diaria por persona establecida de 615,600.00 L/día para un caudal de ingreso a la red de abastecimiento con una cantidad de personas de 5,130.000 habitantes, y lograr subir el nivel de la misma.

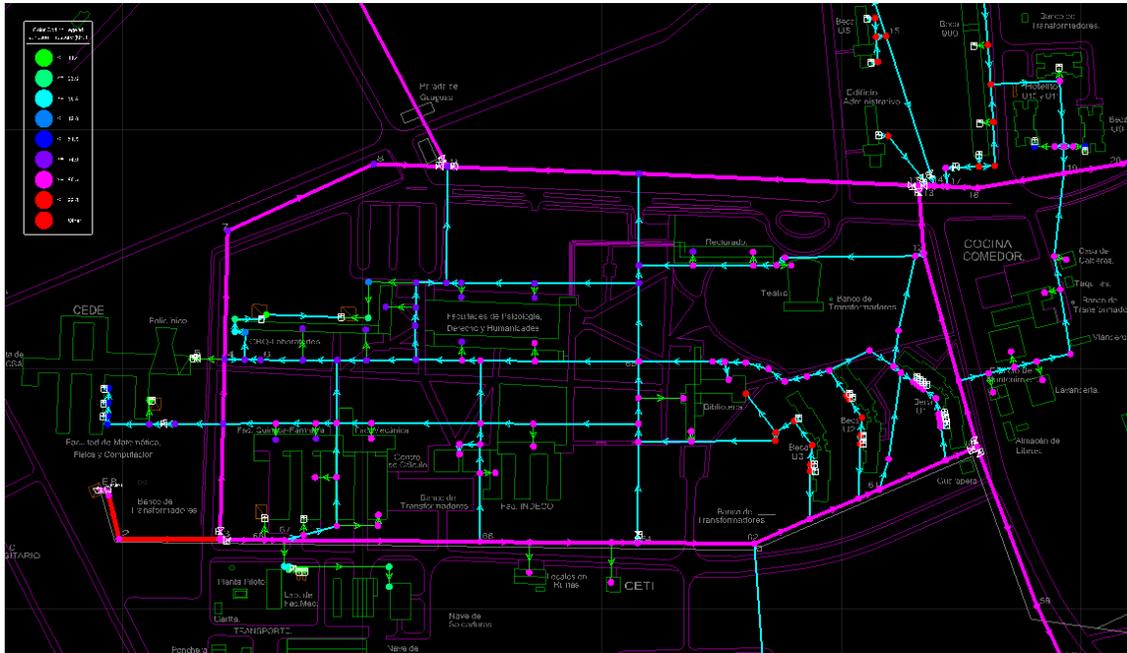


Figura 3.4 Presiones según el mallado en la zona central de la UCLV

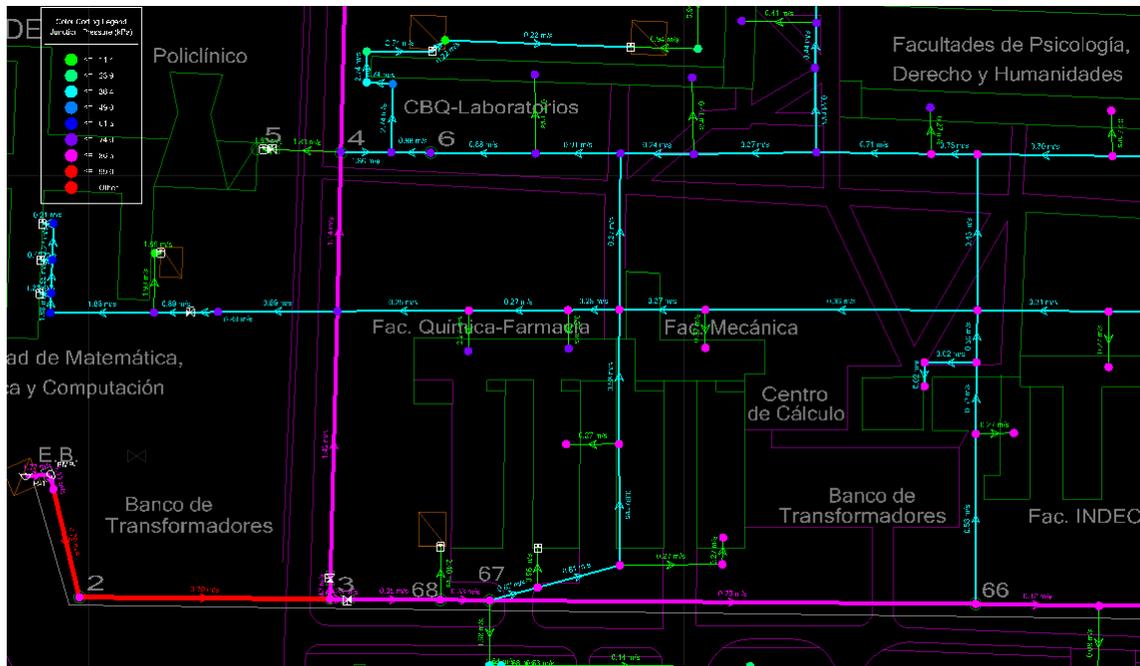


Figura 3.5 Otra dimensión de las presiones en los nodos de la zona central de la UCLV

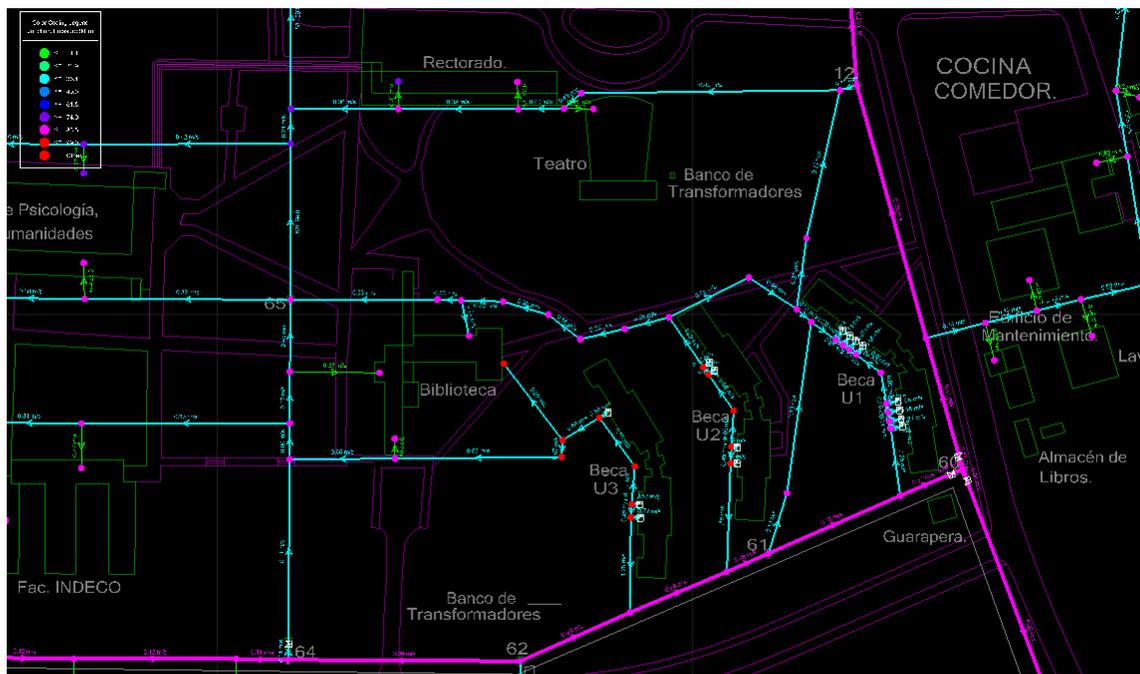


Figura 3.6 Presión en los nodos del sistema unitario en la zona residencial central  
 Con el nuevo mallado, los nodos consumidores en forma de cisterna si son capaces de obtener caudal, el problema está en que la carga media en los nodos

que depende de la presión en la zona de agropecuaria no son suficiente para los tanques elevados (figura 3.7) con la operación de bombeo existente aunque se proponga un mallado más intenso es poco probable que se logre uniformidad en sus presiones además de que no sea económicamente factible.

A pesar de que no se pueda abastecer el sistema secundario (tanques elevados) en la zona de agropecuaria debido a la falta de presión, se logra suministrar dicha zona a través del sistema terciario (las cisternas), ya que es así como está concebido.



Figura 3.7 Presión no suficiente en los nodos en la zona agropecuaria

### 3.3 Sectorización de la red de abastecimiento general

Se propone dividir en dos sectores individuales la red, una que abastezca la zona central con la estación de bombeo existente y a la zona de agropecuaria con una antigua estación de bombeo ubicada cerca del Hotel “Los Sauces”(figura 3.8) que se va a conectar directa a la planta potabilizadora de dicha zona a la que se le incorpora el agua del sistema Minerva. Por lo que se logra mejorar las presiones en dicho lugar (figura 3.9) y en la zona residencial del C1, C2, C3, C4, C5 (figura 3.10, 3.11) abasteciendo a los tanques elevados y a las cisterna.



Figura 3.8 Zona de agropecuaria con su estación de bombeo



Figura 3.9 Presión en los nodo de la zona de agropecuaria con el sistema sectorizado

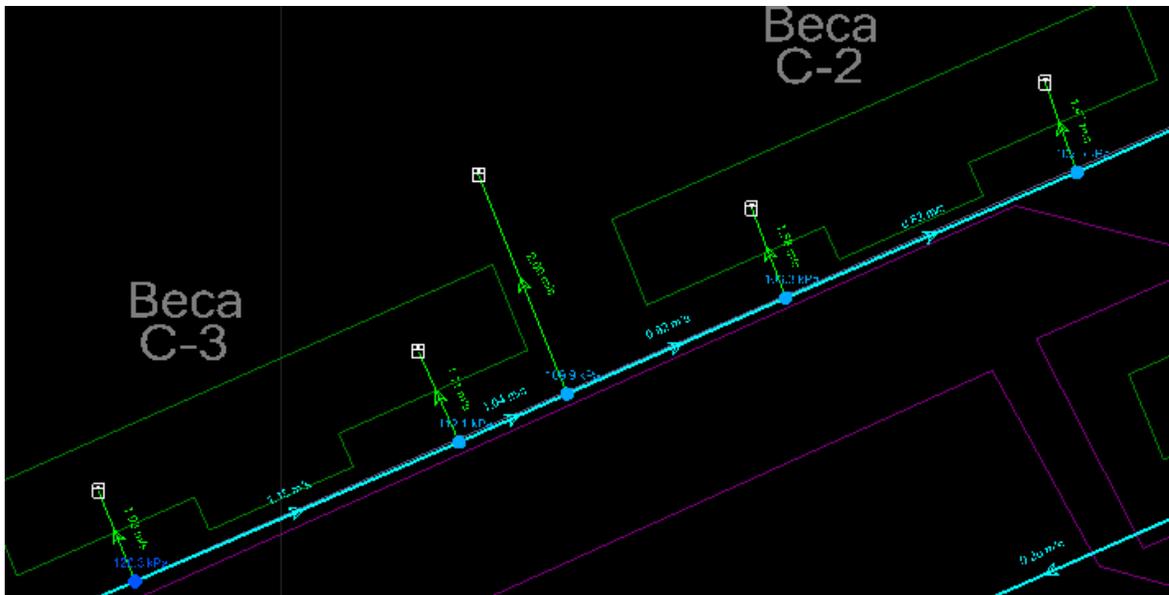


Figura 3.10 Presión de los nodos en la zona residencial de agropecuaria del sistema sectorizado.



Figura 3.11 Presión de los nodos en la zona residencial de agropecuaria del sistema sectorizado.

En dicho escenario se diseñó la bomba en la zona de agropecuaria, llamada Electrobomba centrífuga normalizada derivada de la norma DIN 24255, construida en hierro fundido. Adecuada para el abastecimiento de agua doméstico, agrícola e

industrial, grupos de presión y contra incendio, calefacción y aire acondicionado, lavado a presión, tratamiento de agua, torres refrigeración e intercambiadores de calor. Incorporada a diferentes tipos de maquinaria industrial figura 3.14

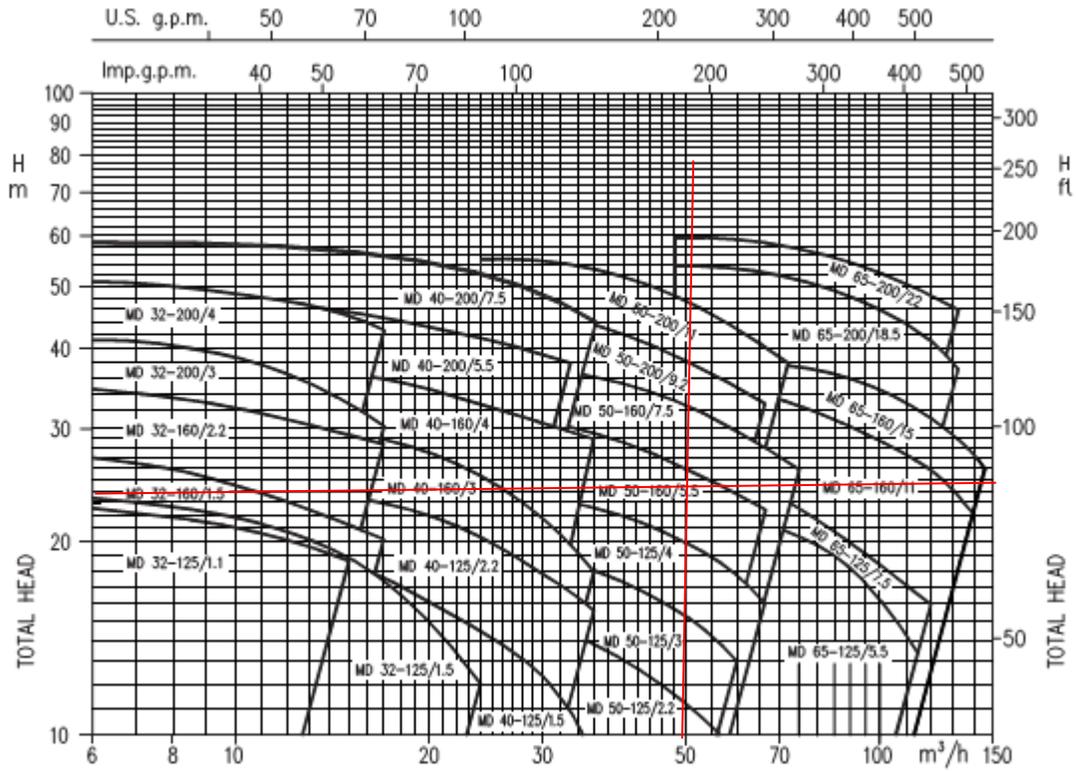


Figura 3.12: Familia de curvas características de la firma Calpeda

Modelo	kW	Q=Caudal																		
		100	200	250	280	400	550	600	667	800	1000	1100	1200	1250	1400	1900	2000	2200	2300	2400
		H=Altura manométrica total en m																		
		6	12	15	17	24	33	36	40	48	60	66	72	75	84	14	120	132	138	144
MD 32-125/1.1	1.1	22.5	20.3	18.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MD 32-125/1.5	1.5	23.5	21.4	19.7	18.5	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MD 32-160/1.5	1.5	27	23.9	21.9	20.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MD 32-160/2.2	2.2	34.5	32	30	28.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MD 32-200/3.0	3.0	41	36.3	32.9	30.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MD 32-200/4.0	4.0	50.5	46.9	44.3	42.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MD 40-125/1.5	1.5	19.5	18.4	17.7	17.2	14.6	10.3	8.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MD 40-125/2.2	2.2	25	23.2	22.9	22.5	20.4	16.9	15.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MD 40-160/3.0	3.0	30.5	29.1	28.3	27.8	25.3	21.5	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MD 40-160/4.0	4.0	38	36.7	36	35.5	33.4	30.2	29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MD 40-200/5.5	5.5	49	47.5	46.5	45.6	42.9	38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MD 40-200/7.5	7.5	58.5	57.2	56.3	55.6	52.3	46.4	44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MD 50-125/2.2	2.2	-	-	-	-	16	14.8	14	13.3	11.7	8.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MD 50-125/3.0	3.0	-	-	-	-	20	18.9	18.4	17.7	16.1	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MD 50-125/4.0	4.0	-	-	-	-	24.5	23.5	23.1	22.4	20.9	17.8	16	-	-	-	-	-	-	-	-
MD 50-160/5.5	5.5	-	-	-	-	32.5	31.2	30.7	30	28.1	24.6	22.5	-	-	-	-	-	-	-	-
MD 50-160/7.5	7.5	-	-	-	-	38	36.9	36.4	35.7	34.1	31	29.1	27.1	26	-	-	-	-	-	-
MD 50-200/9.2	9.2	-	-	-	-	47.5	45.6	44.8	43.7	41.1	36	33	-	-	-	-	-	-	-	-
MD 50-200/11	11.0	-	-	-	-	55	53.3	52.6	51.5	49	44.2	41.3	38	-	-	-	-	-	-	-
MD 65-125/5.5	5.5	-	-	-	-	-	24	23.7	23.1	22	21.3	20.6	20.2	18.9	13.5	-	-	-	-	-
MD 65-125/7.5	7.5	-	-	-	-	-	27	26.7	26.2	25.1	24.5	23.8	23.4	22.2	17.2	16	-	-	-	-
MD 65-160/11	11.0	-	-	-	-	-	-	34	33.6	32.8	32.3	31.8	31.5	30.5	26.4	25.4	23.2	22	-	-
MD 65-160/15	15.0	-	-	-	-	-	-	-	38.2	37.4	36.9	36.4	36.1	35.2	31.2	30.3	28.3	27.1	26	-
MD 65-200/18.5	18.5	-	-	-	-	-	-	-	51.5	50.3	51.5	50.7	50.2	48.7	47.2	46.6	47	-	-	-

Figura 3.13 Modelo de la bomba



Figura 3.14 Electrobomba centrífuga normalizada

#### **PRESTACIONES**

- Presión máx. de trabajo: 10 bar.
- Temperaturas máx. del líquido vehiculado: 90°C

#### **MATERIALES**

- Cuerpo de bomba, soporte e impulsor: Hierro fundido.
- Eje: AISI 304
- Cierre mecánico: Carbón / Cerámica / NBR

#### **DATOS TÉCNICOS**

- Motor asíncrono 2 polos.
- Aislamiento Clase F
- Protección IP55
- Monofásica 230V  $\pm$  10% 50 Hz
- Trifásica 230/400V  $\pm$  10% 50 Hz hasta 4 kW inclusive  
400/690V  $\pm$  10% 50 Hz para potencias superiores
- Condensador y protección termoamperimétrica de rearme automático incorporados (monofásica).  
Trifásica: protección a cargo del cliente

Para lograr las condiciones de operación requerida se recurre al acoplamiento de dos bombas en paralelo y una auxiliar de respaldo. El resultado obtenido para este sistema cumple con la carga necesaria para que el agua llegue a los tanques elevados siendo estos nodos dependientes de la carga debido a que están a una altura estática superior que la red de abastecimiento. El comportamiento antes mencionado se describe gráficamente en la figura 3.15 mostrándose que el punto de operación corresponde para una carga de 20 m y un caudal total de ambas bombas de 135 m<sup>3</sup>/h. Otro aspecto de interés es el consumo promedio de la operación de bombeo donde se define para cada bomba una potencia según las características técnicas de 5.5 kW. Esto demuestra que para una operación de bombeo de 4 h diarias se obtiene un consumo energético de 44 kWh/día valor aceptable respecto al escenario inicial unitario antes analizado.

Tabla 3.1: Características técnicas

Modelo		kW	Condensador		Intensidad absorbida (A)			
Mono-fásica 230V 50Hz	Trifásica		$\mu\text{F}$	V <sub>c</sub>	Mono-fásica	230V	Trifásica 400V	690V
MD 32-125/1.1 M	MD 32-125/1.1	1,1	31,5	450	7,1	5,2	3	-
MD 32-125/1.5 M	MD 32-125/1.5	1,5	40	450	9,3	5,9	3,4	-
MD 32-160/1.5 M	MD 32-160/1.5	1,5	40	450	10,3	5,9	3,4	-
MD 32-160/2.2 M	MD 32-160/2.2	2,2	50	450	13,3	8,7	5	-
-	MD 32-200/3.0	3,0	-	-	-	12	6,9	-
-	MD 32-200/4.0	4,0	-	-	-	16	9,2	-
MD 40-125/1.5 M	MD 40-125/1.5	1,5	40	450	9,5	6	3,5	-
MD 40-125/2.2 M	MD 40-125/2.2	2,2	50	450	12,9	8,7	5	-
-	MD 40-160/3.0	3,0	-	-	-	11,4	6,6	-
-	MD 40-160/4.0	4,0	-	-	-	17	9,8	-
-	MD 40-200/5.5	5,5	-	-	-	-	11,5	6,6
-	MD 40-200/7.5	7,5	-	-	-	-	15,5	9
MD 50-125/2.2 M	MD 50-125/2.2	2,2	50	450	12,9	8,7	5	-
-	MD 50-125/3.0	3,0	-	-	-	10,7	6,2	-
-	MD 50-125/4.0	4,0	-	-	-	15,4	8,9	-
-	MD 50-160/5.5	5,5	-	-	-	-	11,8	6,8
-	MD 50-160/7.5	7,5	-	-	-	-	15	8,7
-	MD 50-200/9.2	9,2	-	-	-	-	19	11
-	MD 50-200/11	11,0	-	-	-	-	22	12,7
-	MD 65-125/5.5	5,5	-	-	-	-	12	6,9
-	MD 65-125/7.5	7,5	-	-	-	-	14	8,1
-	MD 65-160/11	11,0	-	-	-	-	20,8	12
-	MD 65-160/15	15,0	-	-	-	-	27	15,6
-	MD 65-200/18.5	18,5	-	-	-	-	39	22,5
-	MD 65-200/22	22,0	-	-	-	-	43	24,8

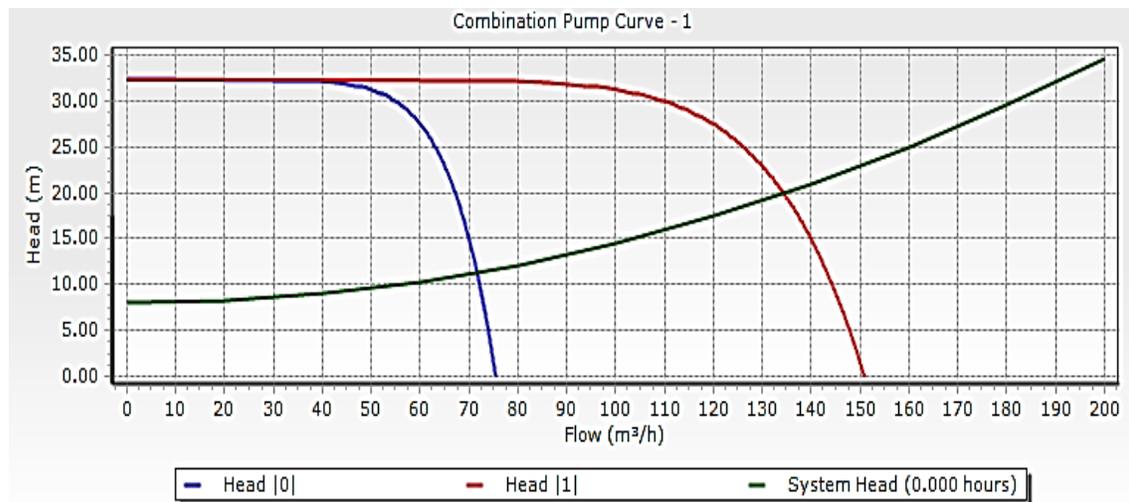


Figura 3.15: Curvas características entre el sistema de tuberías y las bombas.

Finalmente se establece la diferencia de 74kWh/día entre consumos para cada escenario considerando una operación de 4 h para ambos casos. Esto demuestra un ahorro energético considerable además de abastecer satisfactoriamente con las condiciones de carga requeridas para ambos casos.

### 3.4 Análisis del índice de Resiliencia y el coeficiente de uniformidad de presiones

Para determinar el índice de resiliencia y el coeficiente de uniformidad se recurre al estudio de todos los nodos del sistema considerando los valores medios como elementos aproximados para la red de abastecimiento en general. La carga mínima para todos los nodos de demanda se establece como 6 m y los restantes valores como la carga máxima y la sumatoria de la demandas se determina a partir de la herramienta de reporte del WaterGEMS. Los resultados del índice de resiliencia y el coeficiente de uniformidad se muestran en la tabla 3.2 para cada escenario individual.

Tabla 3.2.: Distribución del IR y CU

Escenario	IR(Índice de Resiliencia)	CU(coeficiente de uniformidad)
<b>1-(sistema unitario)</b>	46%	68%
<b>2-(sistema sectorizado)</b>	53%	32.1%

Estos valores se definen fundamentalmente a partir de la demanda producida por la red de abastecimiento y la distribución de carga o presión en el sistema. El índice de resiliencia mientras más se aproxima a la unidad o al 100 % menor son las pérdidas ocurridas en la conducción y consecuentemente se estabilizan las presiones a lo largo del sistema. Esto tiende a confundir cuando se analiza el coeficiente de uniformidad debido a que los valores de la carga en el sistema son más distantes y ocurre una desviación entre la presión mayor. En otras palabras cuando el sistema es eficiente según las pérdidas entonces el gradiente de presión es mayor, o sea se distribuye la presión de un máximo a un mínimo en un mayor rango.

Finalmente se comprueban los valores de índice de resiliencia y coeficiente de uniformidad y practicante no ocurre una variación significativa entre los dos escenarios propuestos por la investigación. Sin embargo se destaca un aspecto de consumo energético que diferencia ambas operaciones además de la satisfacción de la carga requerida para los nodos de demanda en el sistema en general.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- 1 Se definieron los aspectos teóricos actuales empleados para cálculo de sistemas de redes de abastecimiento así como los criterios de diseño aplicados para la modelación hidráulica a partir del software WaterGems.
- 2 Se discute las bondades y limitaciones de la herramienta de modelación WaterGems a partir de la comparación con otros sistemas de cálculo destacándose el empleo de la distribución de la demanda, el estudio de post-cálculo del sistema respecto al análisis de los parámetros hidráulicos y la interrelación con los demás sistemas CAD y GIS.
- 3 Se evalúa la situación actual del sistema de abastecimiento de agua en la Universidad Central Marta A. Abreu de las Villas así como las posibles soluciones para su correcta operación definiéndose los escenarios de mallado unitario y sectorizado como alternativas a modelar su comportamiento.
- 4 El comportamiento del índice de resiliencia y el coeficiente de uniformidad para los escenarios propuestos se comportaron en el rango de operación aceptable para pequeños sistemas de abastecimiento, siendo el escenario sectorizado el de mayores prestaciones técnico-económica del sistema general.

### Recomendaciones

- 1 Emplear algoritmos de optimización económica para evaluar el diseño del mallado secundario y terciario realizado mediante el software WaterGems.
- 2 Realizar un estudio de factibilidad económica relacionado a la inversión y operación de los escenarios estudiados.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- (AWWA), A.W.W.A., 1989. Distribution Network Analysis for Water Utilities, Manual AWWA M32. USA.
- Agua, C.N. del, 1994. Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento, Lineamientos Técnicos para el Diseño de Sistemas de Agua Potable y Alcantarillado. México.
- Burden, F. y R., 1979. Numerical analysis, Prindle. *Weber and Schmidt*.
- Dandy G., Simpson A., and M.L., 1996. An improved genetic algorithm for pipe network optimization". *Water Resources Research*.
- FUERTES, V.S.; GARCÍA-SERRA, J.; IGLESIAS, P.L.; LÓPEZ, G.; MARTÍNEZ, F.J.; PÉREZ, R., 2002. Modelación y diseño de redes de abastecimiento de agua". . *Grupo Mecánica de Fluidos – Universidad Politécnica de Valencia*,.
- IGLESIAS, P., 2001. Modelo general de análisis de redes hidráulicas a presión en régimen transitorio". *Universidad Politécnica de Valencia*.
- IGLESIAS, P.L.; LÓPEZ, P.A.; LÓPEZ, G.; MARTÍNEZ, F., 2004. EPANET 2.0vE. Manual de usuario". *Grupo Multidisciplinar de Modelación de Fluidos – Universidad Politécnica de Valencia*.
- King, H. W., W.C.O. y W., 1948. Hydraulics, John Wiley and Sons. *Japón*.
- LÓPEZ, G.; FUERTES, V.S.; MARTÍNEZ, F.J.; DÍAZ, J., 2003. Regulación de redes de distribución de agua. *GMMF – UPV*.
- MONTGOMERY WATSON, I., 1996. H2ONET. Graphical water distribution modeling and management package. User's manual. MW Soft Inc. Pasadena. *California (USA)*.
- Pimentel H., Marques S., Oliveira P., and M.M., 2009. "Optimal dimensioning model of water distribution systems." *Water SA*.

---

Smith, G.D., 1975. Numerical solution of partial differential equations, Oxford,. *Gran Bretaña*.

Westlake, J.R., 1968. A handbook of numerical matrix inversion and solution of linear equations, John Wiley and Sons, Inc. *Nueva York*.

## ANEXOS

### Anexo I Tabla de los métodos existentes

Periodo	Año	Investigados/Autor(es)	Investigaciones/Formulaciones/Métodos de Análisis
I	1839	G. Hagen y J.L. Poiseulle	Ecuación de Pérdidas de Carga para tuberías en régimen laminar.
	1845	Darcy y Weisbach	Fórmula para las pérdidas de carga por fricción en un flujo a través de una tubería simple.
	1883	O. Reynolds	Definición de Número Adimensional para distinción entre régimen Laminar y Turbulento.
	1906	Hazen y Williams	Fórmula empírica para la pérdida de carga por fricción en el flujo a través de una tubería simple.
	1938	C. Colebrook y C. White	Formulación basada en trabajos de Prandtl y sus discipulos (Von Karman, Nikurodse y Blasius) para la determinación del factor de fricción en la

			fórmula de Darcy.
II	1936	Hardy Cross	Método de Cross con Corrección de Caudales. Técnica de Relajación elaborada por H. Cross profesor de ingeniería estructural I de la Universidad de Illinois. Método originalmente desarrollado para cálculo de estructuras de concreto extendido a Redes Malladas a Presión basado en un principio de balanceo de caudal.
	1938	R.J. Cornish	Modificación al Método de Cross denominado originalmente Balance de Cantidad que posteriormente se conoció como M. Hardy Cross con corrección de altura.
	1950	Mclroy	Método de Análisis de Fluidos en Redes análogo al Método Computacional Eléctrico.
III	>1950	N/A	Desarrollos y Pruebas con subrutinas numéricas de los primeros computadores digitales.
	1957	Hang and Weinberg	Adaptación de los métodos de Hardy Cross para computadores digitales.
	1955-1965	Rader & Associates y Brown & Caldwell	Comercialización de Servicios de Ingeniería para cálculo de redes basado en modelos computacionales.

	>1960	Daries Corporation , TX	Pioneros en la Venta de Software de Cálculo comercial.
IV	1962-1963	Martin y Peters	Método del Nodo Simultáneo. Aplicación del Método Iterativo de Newton-Raphson a redes de distribución por parte de D.W. Martin y G. Peters.
	1968	Shamir y Howard	Expansión del Método del Nodo Simultáneo
	1970	A. Fowler y R. Epp	Método del Circuito Simultáneo
	1970-1972	Wood y Charles	Método de la Teoría Lineal. Metodología desarrollada por D.J. Wood y C.O.A. Charles que permite resolver simultáneamente las ecuaciones de conservación de masa en nodos y conservación de energía en circuitos.
	1977	R. Jeppson	Programa comercial para el análisis de redes con base en el método del circuito simultáneo.
	1987	Todini y Pilati	Método del Gradiente Hidráulico. Finalmente formulado por E. Todini y Plati. Método de manejo matricial de las ecuaciones de energía y conservación de masa de rápida convergencia.
V	1980-1985	IBM y Otros Fabricantes	Introducción de los primeros Computadores Personales (IBM o Compatibles) y nacimiento de la industria

			del Software Comercial para Análisis de Redes.
1981-1985	Boeing Computer Serv - Univ. Kentucky Civil		Lanzamiento de primeros programas comerciales de Análisis de Redes de Distribución para PC como el WATSIM (Boeing ComputerServ.) y KYPIPE (Universidad de Kentucky).
1982-1985	D. Wood y U.S. EPA		Desarrollos de los primeros modelos de calidad en estado estático.
1985	ASCE-División de Gestión de Recursos Hídricos		La sociedad de Ingenieros de EE.UU. en su conferencia anual realizó una serie de sesiones para evaluación de metodologías numéricas que posteriormente se llamaron "La Batalla de los Modelos".
1986	AWWA-U.S. EPA-Diversas Universidades		En el Simposio de Sistemas de Distribución organizado por AWWA se da una Introducción formal a los Modelos Dinámicos de Calidad de Agua.
1987	J. Gessler, J. Sjostrom y T. Walski - Patrocinio USACE		Lanzamiento de software WADISO, programa de dominio público con simulaciones en periodo estático y extendido. Uno de los pioneros en incluir un módulo de optimización de diseño.
1988-1990	W. Grayman, R. Clark y D. Males		Desarrollo del modelo de calidad DWQM. Modelo Dinámico de calidad basado en un Método de Elementos de Volumen Discretos que se integraba y

			partía de los resultados generados por un modelo hidráulico.
1990-1993	Firmas de desarrollo de Software Comercial		Lanzamiento de paquetes de software con entrada amigable de datos y entornos gráficos como CyberNet, RINCAD, STONER, AQUANET, Piccolo, etc. Se destaca la integración de algunos paquetes con entornos CAD como el CyberNET de HaestadMethods.
1993	Lewis Rossman - U.S. EPA		EPANET 1.0. Lanzamiento al Público del Programa para el Análisis de Redes por parte de la EPA y bajo el liderazgo de L. Rossman retomando los modelos WADISO y DQM, y llevando al usuario a una interfaz gráfica en Windows. La versión 2.0 a finales de los 90's incluyó importantes modificaciones al programa original.
1998-2002	Centro Suizo de Desarrollo Corporativo de Tecnologías (SKAT)		Publicación/Recopilación Técnica de los 10 programas de software mas usado a nivel mundial para el análisis y diseño de sistemas de Distribución. Predecesores de los programas actualmente mas populares del mercado: WaterCAD/GEMS, H2O Map, MikeNet, Pipe 2012, etc.
2002-Actualidad	Firmas varias de desarrollo de Software Comercial		Adopción del método del gradiente como algoritmo estándar de la mayoría de software, entorno gráfico en Windows, y

			técnicas de inteligencia artificial para Calibración Hidráulica y Diseño Optimizado.
--	--	--	--

**Anexo II      Tabla de la demanda por cada nodo**

Junction Demand Control Center			
ID	Label	Number of Unit Demands	Unit Demand Demand (Base) (L/day)
	891J-252		50.000
	1540J-405		100.000
	1483J-381		100.000
	1478J-379		100.000
	1473J-377		100.000
	1488J-383		100.000
	1536J-403		100.000
	820J-221		100.000
	1527J-399		100.000
	1493J-385		150.000
	1545J-407		150.000
	1547J-408		150.000
	1517J-395		100.000
	1522J-397		100.000
	1508J-391		100.000
	1503J-389		100.000
	1552J-410		120.000
	1557J-412		120.000
	1559J-413		120.000
	1579J-421		100.000
	880J-247		100.000
	1574J-419		100.000
	1030J-307		100.000
	1585J-423		30.000
	1590J-425		30.000
	1595J-427		200.000
	1603J-430		200.000
	1606J-432		100.000
	1046J-313		50.000
	793J-208		200.000
	302J-88		100.000
	797J-210	20.000	2,400.00
	761J-192	50.000	6,000.00

994J-295	20.000	2,400.00
1682J-456	100.000	12,000.00
1690J-459	100.000	12,000.00
1726J-473	100.000	12,000.00
1721J-471	100.000	12,000.00
1711J-467	40.000	4,800.00
1716J-469	40.000	4,800.00
1006J-299	50.000	6,000.00
816J-219	50.000	6,000.00
835J-228	50.000	6,000.00
1736J-477	50.000	6,000.00
1731J-475	50.000	6,000.00
1747J-482	50.000	6,000.00
1694J-461	50.000	6,000.00
1702J-464	50.000	6,000.00
321J-101	100.000	12,000.00
1569J-417	30.000	3,600.00
1564J-415	30.000	3,600.00
1702J-464	30.000	3,600.00
1694J-461	100.000	12,000.00
915J-262	500.000	60,000.00