



UNIVERSIDAD
DE LOS ANDES
DR. PEDRO GONZÁLEZ GUTIÉRREZ
MÉRIDA, VENEZUELA

Facultad de Ingeniería
Universidad de los Andes
Mérida, Venezuela

Modelo de Simulación de Redes de Distribución de Agua basado en Software Libre.

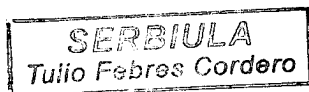
Autor: Maurice V. Ramírez S.

Tutor: Ph.D. Magdiel Ablan.

Co-Tutor: M.Sc. Luis Mora.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Proyecto de Grado entregado a la Ilustre Universidad de los
Andes para optar al título de Magister Scientiarum en Modelado
y Simulación de Sistemas según el programa de Postgrado en
Modelado y Simulación



2011



Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Dedicatoria

A Enzo Browne,

mi hijo

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Resumen

El propósito de la presente investigación consistió en la elaboración de un prototipo de simulación para el análisis de redes de distribución de agua, basado en software libre. Para el desarrollo del código del prototipo de simulación fue necesario el uso del lenguaje de programación Python, y en cuanto al desarrollo del modelo hidráulico se utilizó el método del gradiente (propuesta de E. Todini y Pilati).

Este estudio se justificó por cuanto posee una relevancia social y una utilidad práctica, ya que permite a estudiantes y profesionales el aprender saber-hacer, lo cual conllevaría en un futuro el poder abordar y tener un control verdadero del programa EPANET.

El modelo de simulación de redes de distribución de agua se denominó Waterpy, y se programó bajo ambiente Windows XP, utilizando como lenguaje de programación Python versión 2.6. Además se utilizó un conjunto de bibliotecas de código abierto, para facilitar el procedimiento de cálculo y generación de reportes.

El programa Waterpy está diseñado para el cálculo hidráulico estático, del cual se puede obtener las alturas piezométricas en cada nodo y los caudales en cada tramo de tubería. También se pueden obtener velocidades y factores de fricción, teniendo en cuenta que sólo se puede modelar tres elementos hidráulicos como son depósitos o repositorios, tuberías y nodos. El programa está diseñado para analizar redes cerradas de tuberías aplicando el método del gradiente hidráulico.

Las entradas al programa se realizan a través de un archivo de texto generado por el usuario, el cual contiene argumentos que definen la red y por línea de comando se le indican argumentos específicos para generar las salidas. El programa puede generar las salidas a través de reportes en distintos formatos como son: PDF, IMAGEN, HTML y adicionalmente puede presentar los resultados por pantalla.

La principal cualidad con la que cuenta el prototipo de simulación "Waterpy", es que está desarrollado bajo el paradigma de software libre, liberado bajo la licencia GNU versión 3, lo cual lo diferencia de otros programas similares. Esto garantiza el disponer del código fuente, lo cual permite que el prototipo pueda ser mejorado de acuerdo a los requerimientos y observaciones de sus usuarios.

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento:

A Dios por permitirme llegar hasta éste momento tan importante de mi vida y lograr otra meta más en mi carrera.

A mis padres por enseñarme que la perseverancia y el esfuerzo son el camino para lograr objetivos.

A mi esposo por su cariño, comprensión y constante estímulo.

A mi hermana por sus comentarios, sugerencias y opiniones.

A cada uno de los profesores del Postgrado de Modelado y Simulación de Sistemas, que participaron en mi desarrollo profesional durante los estudios de maestría.

A mis tutores por sus valiosas sugerencias y acertados aportes durante el desarrollo de éste trabajo

Al Profesor Luis Mora por su permanente disposición, apoyo y asesoramiento, para el desarrollo de éste proyecto de investigación.

A la Ilustre Universidad de los Andes por abrirme nuevamente sus puertas, para continuar con mi formación académica y profesional.

Por último a todas aquellas personas, familiares y amigos que me brindaron su apoyo para el logro de mis objetivos.

Tabla de Contenidos

Dedicatoria	ii
Resumen	iii
Agradecimientos	iv
Tabla de Contenidos	v
Índice de Tablas	vii
Índice de Figuras	viii
Capítulo 1	1
1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	2
1.1.1 <i>WaterCAD</i>	3
1.1.2 <i>WaterGEMS</i>	3
1.1.3 <i>EPANET</i>	4
1.2 Planteamiento del problema	5
1.3 Objetivos	7
1.3.1 <i>Objetivo General</i>	7
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i>	7
Capítulo 2	8
2. Marco Metodológico	8
2.1 Tipo de Investigación	8
2.2 Modalidad de Investigación	8
2.3 Fases en la elaboración del modelo de simulación de redes de agua	8
2.3.1 <i>Fase de planificación y elaboración del modelo hidráulico</i>	10
2.3.2 <i>Fase de Construcción</i>	10
2.3.3 <i>Fase de aplicación</i>	10
Capítulo 3	11
3. Fase de planificación y definición	11
3.1 Redes de distribución de agua	11
3.2 Elementos físicos de una red de distribución de agua	12
3.2.1 <i>Tuberías</i>	12
3.2.2 <i>Unión o nodo</i>	12
3.2.3 <i>Tanque</i>	13
3.2.4 <i>Reservorio</i>	13
3.2.5 <i>Bomba</i>	13
3.2.6 <i>Válvula</i>	13
3.3 Simulación de Redes de aguas	15
3.4 Método del gradiente hidráulico	16
3.4.1 <i>Condiciones del método del gradiente</i>	18
3.4.2 <i>Topología de la red</i>	24
3.4.3 <i>Descripción del proceso iterativo</i>	29
Capítulo 4	30
4. Fase de Construcción	30
4.1 Python como lenguaje de programación	30
4.2 Diseño del modelo	31
4.3 Características del programa	35

4.3.1 Componentes Físicos	35
4.3.2 Unidades	36
Capítulo 5	37
5. Fase de aplicación	37
5.1 Desarrollo de un ejemplo numérico (Caso 1)	37
5.1.1 Esquematización de la red	38
5.1.2 Definición de la red	38
5.1.3 Argumentos – Parámetros del modelo	41
5.1.4 Proceso de cálculo	42
5.1.5 Resultados Generales	44
5.2 Desarrollo de un ejemplo numérico (Caso 2)	48
5.2.1 Definición de la red (Caso 2)	48
5.2.2 Proceso de cálculo (Caso 2)	50
5.2.3 Salidas generadas	50
5.3 Desarrollo de un ejemplo numérico (Caso 3)	52
5.3.1 Esquematización de la red (Caso 3)	52
5.3.2 Definición de la red (Caso 3)	52
5.3.3 Proceso de cálculo (Caso 3)	54
5.3.4 Salidas generadas	54
Capítulo 6	56
6. Análisis, Conclusiones y recomendaciones	56
6.1 Conclusiones	59
6.2 Recomendaciones	60
Referencias bibliográficas	61
Anexo (Manual de Usuario)	

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Índice de Tablas

Tabla No. 1

Matriz comparativa de las principales diferencias entre productos.....4

Tabla No. 2

Coefficientes de rugosidad absoluta de las tuberías.....24

Tabla No. 3

Conjunto mínimo de propiedades necesarias para el modelo de componentes de una red y resultados obtenidos36

Tabla No. 1

Matriz comparativa de las principales diferencias EPANET Y WATERPY.....57

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Índice de Figuras

Figura No. 3.1	
Esquematación de elementos físicos de una red de distribución de agua.....	12
Figura No. 3.2	
Red abierta. Esquema de un sistema de tuberías que conecta cinco tanques de almacenamiento.....	14
Figura No. 3.3	
Red cerrada. Esquema de un sistema de tuberías con caudales consumidos en los nodos y caudales de alimentación a la red.....	15
Figura No. 3.4	
Esquema ecuación de continuidad.....	17
Figura No. 3.5	
Plano referencia. Conservación de la energía.....	17
Figura No. 3.6	
Ejemplo de red. Formulación de matrices.....	17
Figura No. 5.1	
Modelo de red en estudio No. 1.....	37
Figura No. 5.2	
Esquematación de la red.....	38
Figura No. 5.3	
Definición del sistema de ejes de coordenadas para la red.....	41
Figura No. 5.4	
Presentación de resultados por consola.....	43
Figura No. 5.5	
Presentación de tablas de resultados.....	44
Figura No. 5.6	
Presentación de gráficos de resultados.....	45
Figura No. 5.7	
Presentación de resultados en formato HTML.....	47
Figura No. 5.8	
Presentación de Grafo (Caso 2).....	50
Figura No. 5.9	
Presentación de tablas de resultados en archivo PDF.....	51
Figura No. 5.10	
Esquematación de la red (Caso 3).....	52
Figura No. 5.11	
Reporte de resultados en HTML.....	55
Figura No. 5.12	
Presentación de gráfico de barras en formato de Imagen.....	55

Capítulo 1

1. Introducción

La creciente importancia que tiene la conservación de los recursos naturales, ha despertado en el hombre la búsqueda de métodos para cuidarlos y recuperarlos, para que puedan ser aprovechados por los seres vivos; de aquí que uno de los recursos de vital importancia para el hombre como es el agua, sea objeto de estudio, pues es indispensable para las necesidades de la sociedad y del crecimiento industrial.

La necesidad de mejorar la calidad del agua suministrada y de optimizar las operaciones implicadas en ello, ha ido incorporando el uso de nuevas técnicas como la informática y la automática en la gestión y control de los sistemas hidráulicos. Debido a esto, el uso de modelos matemáticos se ha generalizado y actualmente abarca todos los sistemas del ciclo del agua (Alfonso, 2001).

Para la confección de modelos hidráulicos se necesita un programa de cómputo que permita simular los diferentes elementos de la red y un algoritmo de cálculo rápido y confiable a fin de que puedan generar y ajustar los balances hídricos en el menor tiempo posible con la mayor confiabilidad (Alfonso, 2001).

Una red de distribución de agua potable, está compuesta por elementos como tuberías, tanques, embalses, nodos, bombas, válvulas, etc., los cuales son necesarios para conducir el agua desde la fuente hasta sus consumidores. En la actualidad, el

uso de programas para el estudio de redes de distribución de agua está completamente generalizado, debido a la importancia que tiene realizar diseños que puedan garantizar la calidad del servicio.

1.1 Antecedentes

El análisis del caudal en una red de tuberías estuvo entre las primeras aplicaciones civiles de la programación en ingeniería mediante los incipientes ordenadores que se comercializaban en los años sesenta (Mays, 2002).

Durante varias décadas diversos investigadores y empresas han centrado sus esfuerzos en generar herramientas que permitan avanzar cada vez más en el campo de la modelación hidráulica de redes, ya que ésta se ha posicionado como la principal herramienta para diseñar y operar sistemas de distribución de agua para que tengan la capacidad de ofrecer a los usuarios un servicio confiable, eficiente, seguro y así poder estimar los diferentes aspectos que influyen en estos sistemas.

Actualmente existen en el mercado diversos programas que cumplen estas características entre los que se pueden mencionar: el PICCOLO de la Safege (Francia) (Piccolo, n.d.); KYPipe de la Universidad de Kentucky (EUA) (KYPipe, 2009); el STONER de Stoner Workstation Services (EUA) (Mays, 2002); el Aquanet de Finite Technologies Inc (EUA) (Mays, 2002); Pipe 2000 de Universidad de Kentucky (EUA) (KYPipe, 2009); REDES del Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA) Universidad de los Andes (Colombia) (Saldarriaga, 2007); GISRED del grupo REDHISP de la Universidad Politécnica de Valencia (España) (Mays, 2002); H2ONET Designer (Salomons, 2005); MIKE NET (Ingeduld, 2003); WaterGEMS de Bentley Systems (EUA) (Benkley, 2009b); EPANET de la USEPA (EUA) (EPA, 2008); y el WaterCAD de Haestad Methods (EUA) (Benkley, 2009a). De todos los programas anteriormente mencionados, EPANET es el único software con licencia libre.

A continuación se definen los programas más utilizados en nuestro país en la actualidad:

1.1.1 WaterCAD

Es un programa desarrollado por la empresa Bentley Systems en Estados Unidos que puede utilizarse como herramienta para el manejo integral de las redes de distribución de agua potable, incluyendo la simulación hidráulica, calibración y el diseño optimizado de las redes.

WaterCAD puede verse potenciado con la adición de los siguientes módulos de simulación: gestión avanzada y optimización de sistemas, calibración automática de modelos, diseño optimizado de redes a presión, simplificación inteligente de redes, análisis de la calidad y vulnerabilidad de sistemas (Benkley, 2009a).

Este programa permite realizar análisis hidráulicos, de calidad de agua y simulación en tiempo extendido, además permite modelar varios de los componentes hidráulicos típicos de las redes de distribución, como válvulas reguladoras, estaciones de bombeo y controles automatizados sensibles a la presión o al caudal. La metodología de solución empleada es la del Método del Gradiente bajo las ecuaciones de análisis de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach y Chézy-Manning (Saldarriaga, 2007).

1.1.2 WaterGEMS

Es una herramienta adicional y opcional del WaterCAD; el WaterGEMS es un sistema multiplataforma de modelado de distribución de agua y de gestión; con soporte para cuatro diferentes plataformas ArcGIS, AutoCAD, MicroStation, y Stand-Alone. WaterGEMS ofrece verdadera interoperabilidad y funcionalidad (Benkley, 2009b).

La ventaja de este sistema es que sin importar la plataforma utilizada, WaterGEMS guarda la información de tal manera que no se compromete la integridad de la misma y además no se pierde velocidad de ejecución, por otra parte WaterGEMS tiene la posibilidad de utilizar modelos geoespaciales para localizar demandas de agua y elevación de nodos (Saldarriaga, 2007).

1.1.3 EPANET

Es un programa gratuito desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, Environmental Protection Agency), para el estudio y el análisis del comportamiento de redes hidráulicas a presión.

Se trata de un programa de entorno Windows 95/98/NT/XP que realiza simulación hidráulica en período extendido; en cuanto a la calidad del agua y del comportamiento dentro de redes de tuberías a presión, utiliza como metodología de solución la del Método del Gradiente bajo las ecuaciones de análisis de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach y Chézy-Manning (Saldarriaga, 2007).

A continuación se presenta una tabla comparativa de las principales diferencias de capacidades de cálculo entre los tres programas:

Tabla No. 1

Matriz comparativa de las principales diferencias entre productos.

Característica	WaterCAD/GEMS V8i	EPANET
Análisis en Estado Estático.	SI	SI
Análisis en Periodo Extendido	SI	SI
Análisis de Calidad	SI	SI
Análisis Automatizado de Flujo de Incendio	SI	NO
Análisis de Costos de Energía	SI	LIMITADO
Análisis Crítico y de Segmentación (Critically Analysis)	SI	NO
Análisis de Vaciado Uni-Direccional (Flushing Analysis)	SI	NO
Archivos de Fondo Escalado - Manejo DXF, SHP e Imágenes	SI	NO
Manejo de Múltiples Escenarios y Alternativas en un único Archivo y Análisis Comparativo	SI	NO
Posibilidad de Creación de Submodelos y acoplamiento de estos en Modelos Maestros.	SI	NO
Controles Lógicos Simples	SI	SI
Controles Lógicos Compuestos	SI	LIMITADO
Módulo para Esquelitización Inteligente de Modelos.	SI	NO
Algoritmos Genéticos en Calibración y Diseño óptimo	SI	NO
Navegador de la Red y Generación automática de consultas	SI	NO

topológicas y de conectividad		
Bombas de Velocidad Variable	SI	NO
Curvas de Energía del Sistema.	SI	NO
Elemento Hidrante	SI	NO
Elemento Válvula de Aislamiento/Seccionamiento	SI	NO
Emisores y Nodos Dependientes de Presión	SI	LIMITADO
Integración con AutoCAD 2009	SI	NO
Integración con MicroStation V8i	SI	NO
Integración con ArcGIS 9.x	SI	ALGUNOS DESARROLLOS EXTERNOS
Herramientas Automatizadas de Anotación	SI	NO
Compatibilidad ODBC	SI	NO
Gestión y Manejo de Bases de Datos - Sincronización con GIS, Access y Excel.	SI	NO
Asignación Automática de Cargas a partir de consumos Geo-referenciados (LoadBuilder)	SI	NO
Edición Global de Elementos, Morphing, etc.	SI	NO
Creación de Líneas de Perfil, incluida línea de terreno.	SI	NO
Consultas y Filtros tipo SQL.	SI	NO
Desarrollo Aplicaciones y Personalización.	SI	SI
Datos Operativos de Tanques (Niveles, Mezcla, etc)	SI	SI
Capacidad de Reportes Tabulares y Gráficos Personalizados. Herramientas de Animación.	SI	LIMITADO
Reportes Estadísticos del Sistema (Min., Max., Prom.)	SI	NO
Licenciamiento en Redes de Área Local (LAN Networks)	SI	NO
Soporte Técnico 7 días y Actualizaciones Periódicas	SI	NO

(Gutiérrez, 2009)

1.2 Planteamiento del problema

En nuestro país la mayoría de los Organismos públicos utilizan para el diseño y la simulación de redes de distribución de agua el programa *WaterCAD*, esto debido a las ventajas que ofrece sobre otros programas que existen en el mercado, como es la introducción de datos, las interfaces gráficas y la interacción con el programa AUTOCAD.

Por otra parte las universidades nacionales aun teniendo a su disposición el programa EPANET, no se han actualizado en cuanto a la implementación de los

nuevos métodos y tecnologías para la enseñanza del diseño y cálculo de redes de distribución de agua.

En vista de que la EPA (La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos) sacará la versión EPANET 3.0, la cual será la última desarrollada por ellos con la finalidad de liberarla y que las universidades tomen el control del programa; y también tomando en cuenta que como cada vez es mas eminente la migración al Software Libre, debido al Decreto 3390 del 23 de Diciembre del 2004, aprobado por el Gobierno Nacional, en el cual dispone que la Administración Pública Nacional emplee prioritariamente Software Libre desarrollado con estándares abiertos en sus sistemas, proyectos y servicios informáticos; se plantea la necesidad de desarrollar un modelo de simulación de redes de distribución de agua potable basado en software libre, que permita el aprender saber-hacer, lo cual conllevaría a empezar a tener dominio propio de la teoría, técnicas y tecnología a desarrollar, con visión a poder abordar y tener un control verdadero del programa EPANET.

Entre los usuarios potenciales de éste proyecto se encuentran:

- Las universidades interesadas para el uso académico.
- Las universidades, organismos, personas o empresas interesadas en el desarrollo e investigación de éste modelo de simulación.
- Los organismos públicos y privados encargados del diseño y manejo de las redes de distribución de agua.

Beneficio social:

- La simplicidad de la herramienta, permitiría que las Mesas Técnicas de Agua puedan hacer uso del mismo.
- Su utilización para el cálculo de acueductos rurales por gravedad, favorecería a las comunidades, ya que por ser software libre no generaría gasto alguno de licencia.

Teniendo en cuenta éste planteamiento, los objetivos del proyecto son:

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Desarrollar un prototipo de simulación de redes de distribución agua, basado en software libre y multiplataforma.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Recopilar, Gestionar, Analizar y Producir toda la información relacionada con el desarrollo del prototipo de simulación.
- Diseñar e implementar el modelo de simulación y documentar todos los procedimientos.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Capítulo 2

2. Marco Metodológico

2.1 Tipo de Investigación

Dentro de la clasificación de investigación aplicada el presente trabajo se apoya en la investigación tecnológica, la cual tiene como fin obtener un conocimiento para lograr modificar una realidad en estudio, vinculando la investigación y la transformación.

En la investigación tecnológica es necesario configurar un marco teórico-operativo. Para su realización se requiere buscar información de diversa índole tanto teórica como operativa, la cual finalmente permita determinar un quehacer práctico, ejecutable y útil para un fin en particular (García, 2007).

2.2 Modalidad de la Investigación

Dentro de la investigación tecnológica se presentan diversas modalidades, siendo éstas de acuerdo con el uso de la información: pura, aplicada, tecnológica y de desarrollo (García, 2007).

Estudiando cada una de las modalidades, se puede ubicar éste proyecto en la modalidad de investigación tecnológica, debido a que proporciona soluciones o un producto tangible a ser usado por masas, que en circunstancias concretas generan recursos económicos.

La modalidad de investigación tecnológica son quehaceres de tipo propositivo en los cuáles no solo se establece cuál es la solución, sino que brinda información para llevar a cabo su implementación (García, 2007).

“El desarrollo tecnológico consiste en la utilización de los conocimientos científicos existentes para la producción de nuevos materiales, dispositivos, productos, procedimientos, sistemas o servicios o para su mejora sustancial, incluyendo la realización de prototipos y de instalaciones piloto.” (Eustat, 2004).

En primera instancia para el desarrollo del proyecto a tratar en la tesis se llevó a cabo la identificación de los objetivos que se deben cumplir para desarrollar un prototipo de simulación de redes de distribución agua potable, y para esto se realizó una investigación documental en torno a las tecnologías que se ofrecen en la actualidad. Luego se creó el modelo hidráulico apoyado en el marco teórico abordado en la tesis, que es el producto de la investigación de diferentes fuentes a cerca de las tecnologías disponibles y seleccionadas en concordancia a las necesidades y objetivos planteados en la tesis.

Para el desarrollo del prototipo se emplea el lenguaje de programación Python el cual es un lenguaje multiparadigma, permitiendo tanto la programación estructurada como la orientada a objetos, además se considera un lenguaje dinámico ya que se puede escribir y ejecutar el código de un programa al mismo tiempo.

Este lenguaje de programación es interpretado e interactivo, capaz de ejecutarse en una gran cantidad de sistemas operativos; a diferencia de otros lenguajes este brinda el desarrollo rápido de sistemas interoperables y multiplataformas lo cual beneficia especialmente a los proyectos de simulación, además de ser un lenguaje de software libre.

2.3 Fases en la elaboración del modelo de simulación de redes de agua.

2.3.1 Fase de planificación y definición

Esta fase consiste en la definición de conceptos y requerimientos necesarios a implementar en la fase de construcción del modelo de simulación.

2.3.2 Fase de Construcción

En esta fase se efectúa el diseño a partir de los requerimientos, utilizando para ello el lenguaje de programación Python.

2.3.3 Fase de aplicación

Esta fase contempla la implementación del prototipo para su validación, lo cual se lleva a cabo a través de pruebas con ejemplos numéricos.

Capítulo 3

3. Fase de planificación y definición

3.1 Redes de distribución de agua

Una red de distribución de agua, es un sistema de obras de ingeniería, que está constituida por un conjunto de tuberías, accesorios y estructuras que conducen el agua potable hasta las tomas domiciliarias o hidrantes públicos. La red de distribución de agua tiene como finalidad el abastecimiento de agua con el caudal, continuidad y presión suficiente.

Los sistemas de distribución de agua conectan al consumidor con el recurso del agua, usando componentes hidráulicos como tuberías, válvulas y reservorios. Los componentes operacionales seleccionados, son usados para suministrar la demanda requerida con las presiones adecuadas (Alperovits, 1977).

Normalmente las redes de distribución de agua de una ciudad está compuesta de dos partes: la primera de ellas es una red matriz que está encargada de conducir el agua desde la planta de tratamiento hasta los diferentes tanques de almacenamiento, y la segunda parte está conformada por las redes de distribución secundarias a través de las cuales el agua potable se mueve desde los tanques de almacenamiento hasta la acometida del usuario final.

3.2 Elementos físicos de una red de distribución de agua

Una red de distribución de agua está compuesta por un conjunto de elementos físicos (válvulas, bombas, depósitos, tanques, tuberías, entre otros), utilizados para distribuir agua en una zona determinada. (AMF, 2004).

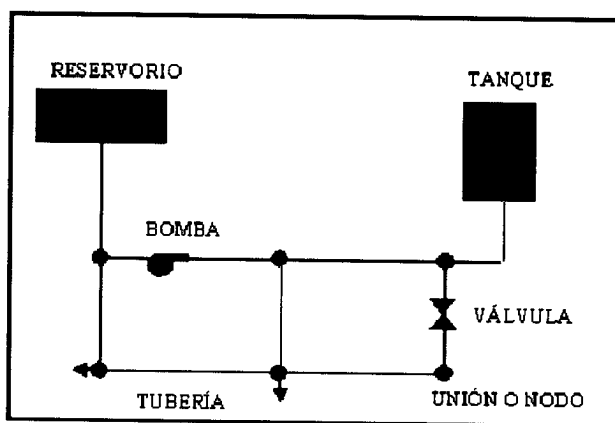


Figura No. 3.1 Esquematización de elementos físicos de una red de distribución de agua.

3.2.1 Tuberías

Conjunto de elementos de una red conectados entre dos puntos, los cuales llevan el agua de un punto de la red a otro.

3.2.2 Unión o nodo

Punto de la red donde se unen dos a más líneas, o por donde entra o sale el agua de la red.

3.2.3 *Tanque*

Son depósitos con capacidad de almacenamiento, donde el nivel de agua puede variar en el tiempo en función de las entradas y salidas que solicite la red.

3.2.4 *Reservorio*

Constituyen depósitos lo suficientemente grandes como para mantener una cota piezométrica fija. Los reservorios son nodos que representan una fuente externa infinita, los cuales son utilizados para modelar embalses, ríos y lagos entre otros.

3.2.5 *Bomba*

Elementos que aportan energía al fluido elevando su altura piezométrica.

3.2.6 *Válvula*

Limitan la presión o el caudal en un punto determinado de la red. Según su propósito se encuentran los siguientes tipos de válvulas:

- Válvulas Reductoras de Presión
- Válvulas Sostenedoras de Presión
- Válvulas de Rotura de Carga
- Válvulas Controladoras de Caudal
- Válvulas de Regulación
- Válvulas de Propósito General

Un análisis de redes consiste en dadas las características físicas de las conducciones, diámetros, rugosidades, longitudes, así como de los restantes elementos de la red como válvulas, depósitos, etc., y sus características funcionales, como presión de tarado de las válvulas (presión a la cual abre la válvula), grado de apertura de las válvulas, etc., y conocida al menos una altura piezométrica en uno de

los nodos del sistema, determinar el caudal conducido por cada una de las tuberías así como la altura piezométrica en todos los nodos restantes. (AMF, 2004).

Las redes de distribución de agua según su estructura en planta pueden ser: ramificadas, malladas y mixtas.

- Redes ramificadas o abiertas

Este tipo de redes tan sólo pueden tener un punto de alimentación, ya que en caso contrario pasaría a ser mallada. Asimismo el agua sólo puede seguir un camino para llegar a cada uno de los nodos del sistema, por lo que el agua discurre siempre en el mismo sentido (Álvarez, 2009).

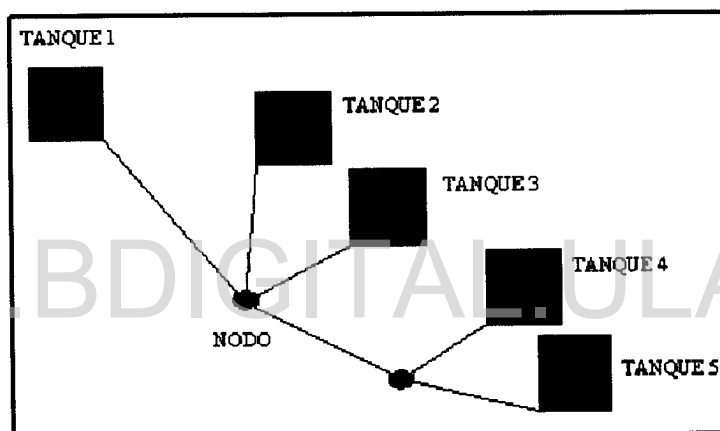


Figura No. 3.2 Red abierta. Esquema de un sistema de tuberías que conecta cinco tanques de almacenamiento.

- Redes Malladas o cerradas

En las redes malladas las tuberías principales se comunican unas con otras formando circuitos cerrados. Se caracterizan por el hecho de que la alimentación de las tuberías puede efectuarse por sus dos extremos indistintamente según como se comporten las tuberías adyacentes, de manera que el sentido de la corriente no es el mismo, y el agua para llegar a cada nodo del sistema puede seguir como mínimo dos caminos diferentes (Álvarez, 2009).

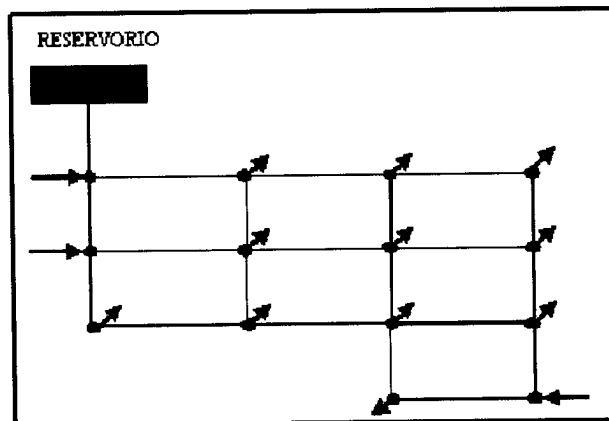


Figura No. 3.3 Red cerrada. Esquema de un sistema de tuberías con caudales consumidos en los nodos y caudales de alimentación a la red.

- Redes Mixtas

En las redes mixtas se puede disponer de una distribución en malla, de las que parten subsistemas ramificados (Álvarez, 2009).

Las redes matrices son redes ramificadas o abiertas mientras que las redes secundarias son malladas o cerradas en el sentido que están conformadas por circuitos (Saldarriaga, 2007).

En general, se prefieren las redes malladas debido a que proporcionan mayor confiabilidad en el suministro de agua.

3.3 Simulación de Redes de aguas

Las simulaciones en redes de distribución de agua son usadas para predecir respuestas de un sistema bajo una amplia gama de condiciones sin interrumpir el sistema real.

Actualmente, se dispone de excelentes modelos matemáticos y de eficaces programas de computadoras para simular el trabajo de las redes de distribución de

agua. Estas herramientas son ayudas importantes para el planeamiento y diseño de un sistema.

Los modelos matemáticos que existen en la actualidad representan los diferentes métodos de análisis y diseño de redes de distribución de agua, los cuales se basan en ecuaciones y algoritmos.

El modelo de simulación de redes de distribución de agua se basará en el análisis de redes de tuberías cerradas, para lo cual existen diferentes métodos de estudio y diseño que se nombran a continuación:

- Método de Hardy-Cross con corrección de caudales en los circuitos, fue desarrollado en 1936 por el ingeniero norteamericano Hardy Cross (Saldarriaga, 2007).
- Método de Hardy-Cross con corrección de Alturas piezométricas en los nodos, fue planteada en 1938 por el ingeniero R. Cornish (Saldarriaga, 2007).
- Método de Newton-Raphson. En 1962-1963 los investigadores D. Martin y G. Peters aplicaron por primera vez éste método para el cálculo de redes de distribución de agua (Mays, 2002).
- Método de la teoría lineal, desarrollado por Wood y Charles entre 1970 y 1972 (Mays, 2002).
- Método del gradiente hidráulico, desarrollado por Todini y Pilati en 1987 (Saldarriaga, 2007).

El modelo de simulación de la presente tesis se basará en el método del gradiente, el cual es ideal para el análisis y diseño de redes de agua potable y es el utilizado por la mayoría de los programas comerciales.

3.4 Método del gradiente hidráulico

El método del gradiente fue desarrollado por los profesores E. Todini y Pilati, planteando la forma definitiva del método en 1987, en el cual las ecuaciones de energía individuales para cada tubo se combinan con las ecuaciones de masa individuales en cada unión con el fin de obtener una solución simultánea tanto de los caudales en las tuberías como de las alturas piezométricas en los nodos (Saldarriaga, 2007).

Para el cálculo de redes de distribución de aguas el método del gradiente 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 (Saldarriaga, 2007).

La ecuación de conservación de la masa o ecuación de continuidad se cumple si a través de dos secciones (sean éstas A_1 y A_2) de una tubería la masa que entra es igual a la masa que sale. Por lo tanto el caudal volumétrico a lo largo de la tubería, sin aportes o consumos intermedios es constante: $A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2$

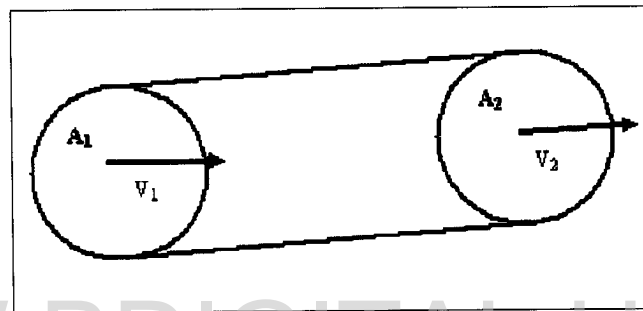


Figura No. 3.4 Esquema ecuación de continuidad

La ecuación de conservación de la energía o ecuación de Bernoulli, establece que un fluido en movimiento sometido a la acción de la gravedad, la suma de la altura geométrica, manométrica y cinética es constante para los diversos puntos de la línea de corriente (Sotelo, 2002).

La ecuación de Bernoulli particularizada entre dos secciones de tubería se expresa:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g}$$

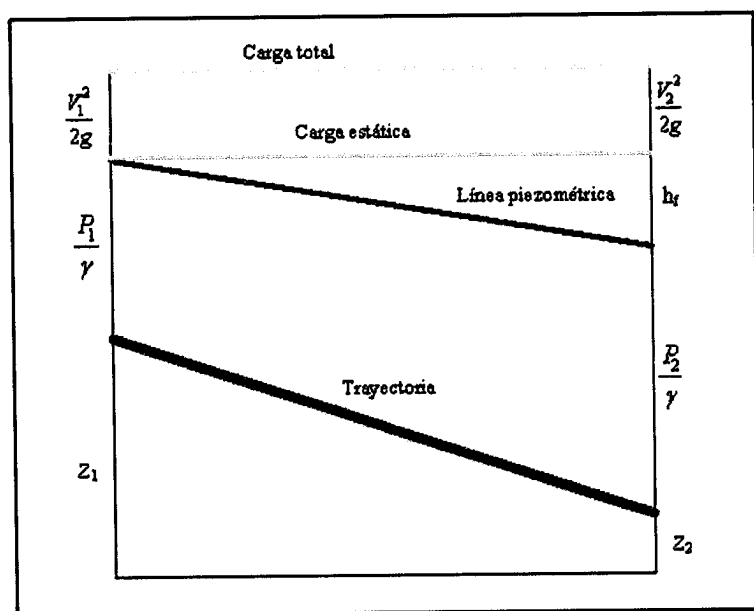


Figura No. 3.5 Plano referencia. Conservación de la energía.

3.4.1 Condiciones del método del gradiente

- Se debe cumplir la ecuación de continuidad en cada nodo.

$$\sum_{j=1}^{NTi} Q_{ij} + Q_{di} - Q_{ei} = 0 \quad (1)$$

donde:

Q_{ij} = Caudal que pasa por la tubería ij hacia el nodo i desde el nodo j (m^3/s)

Q_{di} = Caudales consumidos en cada uno de los nodos (m^3/s)

Q_{ei} = Caudales que alimentan la Red de Distribución (m^3/s)

NTi = Número de tubos que llegan al nodo i .

- Existe una relación no lineal entre las pérdidas por fricción y el caudal para cada uno de los tubos que conforman la red.

$$Q_{ij} = 2 * \frac{\sqrt{2 * g * d_{ij} * hf_{ij}}}{\sqrt{l_{ij}}} * A_{ij} * \log_{10} \left[\frac{ks_{ij}}{3,7 * d_{ij}} + \frac{2,51 * \nu * \sqrt{l_{ij}}}{\sqrt{2 * g * d_{ij}^3 * hf_{ij}}} \right] \quad (2)$$

donde:

hf_{ij} = pérdidas por fricción por tramo de tubería(m)

A_{ij} = área de la sección transversal del tubo (m²)

Q_{ij} = Caudal por tramo de tubería (m³/s)

d_{ij} = diámetro de la tubería por tramo (m)

g = gravedad (m/s²)

l_{ij} = longitud por tramo de tubería (m)

ks_{ij} = Rugosidad absoluta de la tubería (m)

ν = viscosidad cinemática (m²/s)

Para el cálculo de las pérdidas por fricción se utilizó la combinación de la ecuación de Darcy Weisbach con la ecuación de Colebrook White.

- En cada tubo la energía total disponible se gasta en pérdidas por fricción y en pérdidas menores

$$H_t = hf + \sum hm \quad (3)$$

donde:

H_t = energía total (m)

hf = pérdidas por fricción (m)

$\sum h_m$ = pérdidas menores (m)

Si se tienen en cuenta las pérdidas menores causado por cualquier tipo de accesorio y la posible existencia de bombas en algunos de los tubos de la red, la ecuación (3) toma la siguiente forma general, válida para todos los tubos:

$$H_t = \alpha * Q^n + \beta * Q + \gamma \quad (4)$$

donde:

Q = Caudal por tramo de tubería (m^3/s).

n = exponente que depende de la ecuación de fricción utilizada (2 para el caso de la ecuación de Darcy-Weisbach).

α, β, γ = parámetros característicos del tubo, las válvulas y las bombas.

α es un parámetro característico del tubo que incluye los factores de pérdidas por fricción y pérdidas menores. En el caso de accesorios especiales como algunos tipos de válvulas, el parámetro α establece su relación con Q^n adicional a las relaciones para las pérdidas antes mencionadas. Para bombas colocadas en las tuberías se requieren de los tres parámetros α, β, γ (Saldarriaga, 2007).

Si en una tubería particular solo ocurren pérdidas por fricción y pérdidas menores normales (aquellas que son función de la altura de velocidad únicamente), lo cual es el caso más normal en las tuberías que conforman la red, la ecuación (4) se reduce a:

$$H_t = \alpha * Q^n \quad (5)$$

que sustituyendo en (3) queda:

$$hf + \sum_{j=1}^{NTi} hm = \alpha * Q^n \quad (6)$$

Para determinar las pérdidas por fricción, primero necesitamos determinar ciertas variables como son la velocidad, el número de Reynolds y el coeficiente de fricción.

El factor de fricción es calculado con diferentes ecuaciones dependiendo del número de Reynolds (Re) para el caudal:

- Cálculo de la velocidad

Velocidad media:

$$\bar{v} = \frac{Q}{A} \quad \text{ó} \quad \bar{v} = \frac{4 * Q}{\pi * d^2} \quad (7)$$

donde:

$\bar{v}$ = velocidad media (m/s)

Q= Caudal (m³/s)

A= área de la sección transversal de la tubería (m²)

d= diámetro de la tubería (m)

- Cálculo del tipo de flujo

El número de Reynolds es adimensional y se utiliza para definir las características del flujo dentro de una tubería, éste relaciona las fuerzas inerciales con las fuerzas viscosas, y se define como:

$$Re = \frac{\bar{v} * d}{\nu} \quad (8)$$

donde:

Re= número de Reynolds

$\bar{v}$ = velocidad media (m/s)

ν = viscosidad cinemática del agua = $1.141 \cdot 10^{-6}$ (m²/s), para t=15°C.

Una vez determinado el número de Reynolds se procede a determinar el coeficiente de fricción según las siguientes condiciones:

1. Para Régimen laminar $Re < 2000$ el cálculo de la fricción se utilizó la ecuación de Hagen-Poiseuille:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (9)$$

2. Para Régimen turbulento $Re > 4000$ utiliza la aproximación de Swamee y Jain a la ecuación de Colebrook-White:

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{ks}{3,7 * d} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (10)$$

3. Para $2000 < Re < 4000$ se utiliza la ecuación de Moody:

$$f = 0,0055 * \left[1 + \left(2000 * \frac{ks}{d} + \frac{10^6}{Re} \right)^{1/3} \right] \quad (11)$$

Utilizando la ecuación de Darcy Weisbach para describir las pérdidas por fricción tenemos:

$$hf = \frac{f * l * v^2}{d * 2 * g} \quad (12)$$

donde:

hf= pérdidas por fricción (m)

f= coeficiente de fricción

l= longitud del tramo de la tubería en el cual se pierde hf (m)

d= diámetro de la tubería (m)

g= gravedad (m/s²)

v= velocidad media (m/s)

Por último para el cálculo del parámetro α se hace uso de la ecuación (6) quedando:

$$\alpha = \frac{\left(f * \frac{l}{d} + \sum km \right)}{2 * g * A^2} \quad (13)$$

donde:

f= coeficiente de fricción

d= diámetro de la tubería

$\sum km$ = coeficiente de pérdidas menores de los accesorios

g= gravedad (m/s²)

A= área de la sección transversal de la tubería (m²)

Tabla No. 2

Rugosidad absoluta (ks) para diferentes materiales utilizados en la fabricación de tuberías

MATERIAL	Ks(m)
PVC	0,0000015
Acero	0,000046
Hierro galvanizado	0,00015
Hierro fundido	0,00015
Hierro dúctil	0,00025
Polietileno	0,000007
Acero bridado	0,00090

(Saldarriaga, 2007)

En el interior de las tuberías comerciales existen irregularidades de diferentes formas y tamaños, lo cual genera pérdidas por fricción y su valor medio para cada uno de los materiales se denomina rugosidad absoluta.

3.4.2 Topología de la red

Para definir de forma matricial la topología de la red, se hacen las siguientes definiciones adicionales para el Método de gradiente hidráulico.

NT = Número de tuberías en la red.

NN = Número de nodos con altura piezométrica desconocida.

NS = Número de nodos de altura piezométrica fija o conocida.

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

-1 en la columna correspondiente al nodo inicial del tramo i, en la dirección del flujo supuesto

1 en la columna correspondiente al nodo final del tramo i

A continuación se plantea un ejemplo para la formulación de las matrices necesarias en cada estudio de red de distribución:

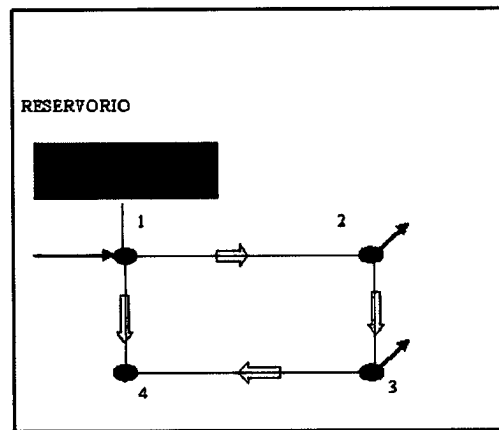


Figura No. 3.6 Ejemplo de red. Formulación de matrices

Del ejemplo planteado tenemos en cuenta que:

NT=4

NN=3

NS=1.

$[A12]$ = Matriz de conectividad cuya dimensión es (NTxNN), es decir (4x3)

$$[A12] = \begin{matrix} & \begin{matrix} NN \rightarrow \end{matrix} \\ \begin{matrix} \downarrow NT \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$[A10]$ = Matriz topológica tramo a nodo para los NS nodos de altura piezométrica fija. Su dimensión es NT*NS con un valor igual a -1 en las filas correspondientes a los tramos conectados a los nodos de altura piezométrica fija.

Para el ejemplo de la figura No. 3.6 tenemos:

$[A10]$ = Matriz topológica cuya dimensión es (NTxNS), es decir (4x1)

$$[A10] = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$$

La pérdida de altura piezométrica en cada tramo de la tubería que conecte dos nodos de la red es:

$$[A11] * [Q] + [A12] * [H] = -[A10] * [Ho] \quad (14)$$

donde:

$[A11]$ = matriz diagonal de NT*NT

$[Q]$ = vector de caudales con dimensión NT*1

$[H]$ = vector de alturas piezométricas desconocidas con dimensión NN*1

$[Ho]$ = vector de alturas piezométricas fijas con dimensión NS*1

La matriz diagonal $[A11]$ esta dada por:

$$[A11] = \begin{bmatrix} \alpha * Q^{(\gamma-1)} + \beta + \frac{\gamma}{Q} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha * Q^{(\gamma-1)} + \beta + \frac{\gamma}{Q} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha * Q^{(\gamma-1)} + \beta + \frac{\gamma}{Q} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha * Q^{(\gamma-1)} + \beta + \frac{\gamma}{Q} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Para el modelo presentado en esta tesis los coeficientes β y γ para la matriz $[A11]$ son cero, ya que para el diseño no se está tomando en cuenta los accesorios de bombas y válvulas.

La ecuación de continuidad para todos los nodos de la red es:

$$[A21]^* [Q] = [q] \quad (16)$$

donde:

$[A21]$ = matriz transpuesta de $[A12]$

$[q]$ = vector de consumo (demanda) o de entrada (oferta) en cada nodo de la red, con dimensión $NN*1$

Las ecuaciones (14) y (16) se pueden expresar en términos matriciales como:

$$\begin{bmatrix} A11 & [A12] \\ [A21] & [0] \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} [Q] \\ [H] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -[A10]^* [Ho] \\ [q] \end{bmatrix} \quad (17)$$

En la ecuación (17) la parte superior corresponde a la relación Q versus H y la parte inferior corresponde a la conservación de la masa en cada uno de los nodos. Dado que la parte superior es no lineal, es necesario utilizar algún algoritmo iterativo. El método del gradiente consiste en hacer una expansión truncada de Taylor.

Al operar simultáneamente sobre el campo ($[Q]$, $[H]$) y aplicar el operador gradiente se obtiene:

$$\begin{bmatrix} [N]^* [A11'] & [A12] \\ [A21] & [0] \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} [dQ] \\ [dH] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [dE] \\ [dq] \end{bmatrix} \quad (18)$$

donde:

$[N]$ = matriz diagonal ($n_1, n_2, n_3, \dots, n_{NT}$) con dimensión $NT*NT$

$[A11']$ = matriz con dimensión $NT*NT$ que para el caso de tuberías está definida como:

$$[A1] = \begin{bmatrix} \alpha_1 * Q^{(n1-1)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_2 * Q^{(n2-1)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_3 * Q^{(n3-1)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_{NT} * Q^{(nNT-1)} \end{bmatrix} \quad (19)$$

[dE]= representa el desbalance de energía por unidad de peso (altura piezométrica) en cada tubo.

[dq]= representa el desbalance de caudal en cada nodo.

Estos desbalances están dados por las siguientes ecuaciones:

$$[dE] = [A11] * [Q_i] + [A12] * [H_i] + [A10] * [H_o] \quad (20)$$

y

$$[dq] = [A21] * [Q_i] - [q] \quad (21)$$

El objetivo del método del gradiente es solucionar el sistema descrito mediante la ecuación (18) teniendo en cuenta que para cada iteración:

$$[dQ] = [Q_{i+1}] - [Q_i] \quad (22)$$

y

$$[dH] = [H_{i+1}] - [H_i] \quad (23)$$

Resolviendo el sistema teniendo en cuenta la ecuación (16) tenemos:

$$\begin{bmatrix} dQ \\ dH \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [N] * [A11] & [A12] \\ [A21] & [0] \end{bmatrix}^{-1} * \begin{bmatrix} [dE] \\ [dq] \end{bmatrix} \quad (24)$$

Resolviendo los sistemas, se obtienen las siguientes dos ecuaciones:

$$[H_{i+1}] = -\left\{ [A_{21}] * \left([N] * [A_{11}] \right)^{-1} * [A_{12}] \right\}^{-1} * \left\{ [A_{21}] * \left([N] * [A_{11}] \right)^{-1} * ([A_{11}] * [Q_i] + [A_{10}] * [H_0]) - ([A_{21}] * [Q_i] - [q]) \right\} \quad (25)$$

$$[Q_{i+1}] = \left\{ [V] - \left([N]^{-1} * [A_{11}] - [A_{11}] \right) \right\} - \left\{ ([N] * [A_{11}])^{-1} * ([A_{12}] * [H_{i+1}] + [A_{10}] * [H_0]) \right\} \quad (26)$$

3.4.3 Descripción del proceso iterativo

El proceso de solución se puede resumir en los siguientes pasos:

- Se suponen unos caudales iniciales en cada uno de los tubos de la red (no necesariamente balanceados).
- Con $[H_{i+1}]$ calculado se utiliza la ecuación (26) para determinar $[Q_{i+1}]$.
- Con el $[Q_{i+1}]$ se vuelve a ensamblar el sistema para encontrar un nuevo $[H_{i+1}]$.
- El proceso se repite hasta que se cumpla una de las siguientes condiciones:
 - En dos iteraciones sucesivas $[H_{i+1}] \approx [H_i]$ son aproximadamente iguales con precisión de defecto de 0,001.
 - Se llega al número de iteraciones indicadas por el usuario.
 - Se alcanza la precisión requerida por el usuario.

Con esto se culmina una breve descripción hidráulica de conceptos y ecuaciones necesarias para el análisis hidráulico de una red, lo cual nos permite pasar a la siguiente fase de elaboración del modelo.

Capítulo 4

4. Fase de Construcción

4.1 Python como lenguaje de programación

Python es un lenguaje de programación de proceso dinámico orientado a objetos que pueden utilizarse para muchos tipos de desarrollo de software.

Se trata de un lenguaje interpretado o de script, con tipado dinámico, fuertemente tipado, multiplataforma y orientado a objetos (González, 2008).

- *Lenguaje interpretado o de script*

Un lenguaje interpretado o de script es el que está diseñado para ser ejecutado utilizando un programa intermedio llamado intérprete. Se puede decir que un lenguaje es interpretado si sus instrucciones se ejecutan secuencialmente a partir de código fuente (González, 2008).

- *Tipado dinámico*

“La característica de tipado dinámico se refiere a que no es necesario declarar el tipo de dato que va a contener una determinada variable, sino que su tipo se determinará en tiempo de ejecución según el tipo del valor al que se asigne, y el tipo

de esta variable puede cambiar si se le asigna un valor de otro tipo” (González, 2008).

- ***Fuertemente Tipado***

Dado una variable de un tipo concreto, no se permite tratar como si fuera una variable de otro tipo distinto, es necesario que se realice una conversión al nuevo tipo previamente (González, 2008).

- ***Multiplataforma***

“El intérprete de Python está disponible en multitud de plataformas (UNIX, Solaris, Linux, DOS, Windows, OS/2, Mac OS, etc.) por lo que si no utilizamos librerías específicas de cada plataforma nuestro programa podrá correr en todos estos sistemas sin grandes cambios” (González, 2008).

- ***Orientado a objetos***

“La orientación a objetos es un paradigma de programación en el que los conceptos del mundo real relevantes para nuestro problema se trasladan a clases y objetos en nuestro programa. La ejecución del programa consiste en una serie de interacciones entre los objetos” (González, 2008).

Según lo anteriormente expuesto la programación Orientada a objetos (POO) es la forma más cercana a como expresaríamos las cosas en la vida real.

4.2 Diseño del Modelo

El modelo de simulación desarrollado en la presente tesis se denomina Waterpy, y está desarrollado con la versión Python 2.6 bajo la plataforma Windows XP. Waterpy se desarrolló con la visión de ser software libre, por lo cual se utilizó un conjunto de bibliotecas de código abierto.

El software de código abierto requiere que el código fuente en el que están escritos los programas esté disponible para los usuarios, para que de esa forma otros

programadores puedan estudiar cómo trabaja el software, fijar errores, y hacer modificaciones (González, 2009).

El software de código abierto no es sinónimo de dominio público, y las leyes del copyright se aplican también a estos programas. La Free Software Foundation usa igualmente el término Copyleft para el software cuyas licencias especifican que no existen restricciones adicionales para la creación y distribución de nuevas versiones. Los programas con licencias de código abierto (*open source*) pueden ser transformados y mejorados (González, 2009).

Waterpy está publicado bajo la licencia de código GNU (GENERAL PUBLIC LICENSE) versión 3. Ésta licencia tiene la intención de garantizar de compartir y cambiar todas la versiones de un programa, para asegurar esto deja el software libre a todos los usuarios.

Las licencias de la mayoría del software y otros trabajos prácticos están destinadas a suprimir la libertad de compartir y modificar trabajos. Por el contrario La Licencia Pública General de GNU pretende garantizarle la libertad de compartir y modificar todas las versiones de un programa, para asegurarse de que sigue siendo software libre para todos sus usuarios (GNU, 2007).

A continuación se describen las bibliotecas y funciones utilizadas para el desarrollo del programa y subprogramas:

- Numpy: es el paquete fundamental necesario para la computación científica con el Python, el cual aporta funcionalidades para el uso de matrices multidimensionales así como librerías de funciones matemáticas de alto nivel para operar con estas matrices (Numpy, 2009).

Este paquete contiene:

- Matrices N-dimensiones.
- Funciones Básicas de álgebra lineal.
- Transformaciones básicas de fourier.
- Operadores de números aleatorios.
- Herramientas para integrar códigos fortran y C/C++

La versión utilizada para ésta versión de Waterpy fue la 1.5.1.

- Numpy linalg: es un paquete que contiene herramientas básicas de álgebra lineal, entre las que se encuentra la inversa de una matriz cuadrada.
- Optparse: es más cómodo, flexible y potente biblioteca para analizar opciones de línea de comandos. OptParse es un módulo, el cual hace que sea fácil escribir herramientas de línea de comandos.
- Reportlab: es una librería de fuente abierta que permite crear documentos PDF empleando como lenguaje de programación Python.

La biblioteca ReportLab crea directamente documentos PDF basándose en comandos gráficos y sin pasos intermedios, generando informes en un tiempo extremadamente rápido y siendo de gran utilidad (Ferreiro y García, 2005). La versión de reportlab que se utilizó para ésta versión de Waterpy fue la 2.5.

- Matplotlib: Es una biblioteca utilizada para la generación de gráficas 2D (Matplotlib, 2008).

Se utilizó la versión 1.0.0 de Matplotlib.

- Networkx: Es una biblioteca utilizada para la creación y manipulación de grafos y redes (Networkx, 2010).

La versión de Networkx utilizada fue la 1.3.

- re: El trabajo con expresiones regulares en Python se realiza mediante el módulo re.

El módulo re contiene funciones para buscar patrones dentro de una cadena (search), comprobar si una cadena se ajusta a un determinado criterio descrito mediante un patrón (match), dividir la cadena usando las ocurrencias del patrón como puntos de ruptura (split) o para sustituir todas las ocurrencias del patrón por otra cadena (sub) (González, 2008).

- len: es una función que devuelve la longitud de una lista o una cadena de caracteres.

- Try-except: “En Python se utiliza una construcción try-except para capturar y tratar las excepciones. El bloque try (intentar) define el fragmento de código en el que creemos que podría producirse una excepción. El bloque except (excepción) permite indicar el tratamiento que se llevará a cabo de producirse dicha excepción. Muchas veces nuestro tratamiento de la excepción consistirá simplemente en imprimir un mensaje más amigable para el usuario, otras veces nos interesará registrar los errores y de vez en cuando podremos establecer una estrategia de resolución del problema” (González, 2008)

Para generar la documentación del código se utilizó la herramienta Epydoc.

- Epydoc: Es una herramienta utilizada para generar la documentación API (*Application Programming Interfaz*) para módulos Python (Epydoc, n.d.).

Se utilizó la versión 3.0.1. de Epydoc.

- Docutils: es un sistema de tratamiento de texto de origen abierto para procesar la documentación en formatos útiles, como HTML o Látex (Docutils, 2010).

La versión utilizada de docutils fue la 0.5, ya que las versiones 0.6 y 0.7 no son compatibles con la versión 3.0.1. de Epydoc.

- Graphviz - Graph Visualization Software: La visualización de gráfico es un modo de representar la información estructural como los diagramas de gráficos abstractos y redes. El dibujo de gráfico automático tiene muchos usos importantes en la ingeniería de software, la base de datos y el diseño de web, la interconexión, y en interfaces visuales para muchos otros dominios (Graphviz, n.d.).

Graphviz es la biblioteca utilizada por EpyDoc para la generación de grafos, que utiliza el lenguaje DOT.

La versión de Graphviz utilizada fue la 2.26.3

4.3 Características del programa

El modelo de simulación desarrollado consta de un programa principal llamado *Waterpy*, del cual se derivan dos subprogramas llamados *util* y *redes*. En cuanto a los archivos de datos de entrada se tienen dos, uno fijo denominado *datos*, el cual contiene los valores de la rugosidad absoluta (k_s) para diferentes materiales utilizados en la fabricación de tuberías, presentados en la tabla No.1; y el otro bajo el nombre que le asigne el usuario, el cual contiene los argumentos de definición de la red.

Waterpy modela sistemas de distribución de agua de una forma sencilla, tomando en cuenta componentes físicos que constituyen el sistema de distribución así como sus parámetros operacionales.

4.3.1 Componentes Físicos

Waterpy modeliza tres elementos hidráulicos: depósitos, tuberías, y nodos.

- Depósitos o reservorios: son nodos que representan una fuente externa que abastecen la red. La principal característica de un depósito o reservorio es su altura piezométrica.
- Nodos: son puntos en la red donde se conectan dos o más tuberías o por donde entra o sale agua de la red.
- Tuberías: son elementos que llevan el agua de una red de un punto a otro.

A continuación se presenta una tabla donde se indica según cada componente hidráulico, cual es la información básica que se requiere para modelar y cuál sería el resultado que se obtiene en cada elemento a lo largo de toda la simulación.

Tabla No. 3

Conjunto mínimo de propiedades necesarias de los componentes de una red y resultados obtenidos.

Componentes o elementos	Propiedades	Resultados
Depósitos	-Altura piezométrica	
Nodos	- Demanda - Cota terreno	Altura piezométrica Presión
Tuberías	- Nodo inicial - Nodo final - Diámetro - Longitud - Coeficiente de rugosidad - Caudal inicial	Caudal Velocidad

En todo análisis de redes de distribución de agua los resultados necesarios para el estudio de dicha red son los expresados en ésta tabla; por tal razón el programa Waterpy se basó en éste esquema para su diseño.

4.3.2 Unidades

El programa Waterpy está diseñado para ingresar los valores de las variables en el sistema de unidades MKS(metro, kilogramo, segundo), por lo que los resultados obtenidos del cálculo estarán dados en éste mismo sistema.

Éste capítulo comprendió la elaboración, descripción del programa de simulación Waterpy; finalizada ésta fase podemos proceder a la validación e implementación del programa, haciendo uso de unos ejemplos numéricos. Esto se describe detalladamente en el capítulo 5.

Capítulo 5

5. Fase de aplicación

Para la aplicación del modelo se considerarán tres ejemplos propuestos por el Prof. Juan Saldarriaga de la Universidad de los Andes. Bogotá – Colombia, en su libro Hidráulica de tuberías.

5.1 Desarrollo de ejemplo numérico (Caso 1)

Para el primer caso en consideración se tomará la red que se muestra en la figura a continuación.

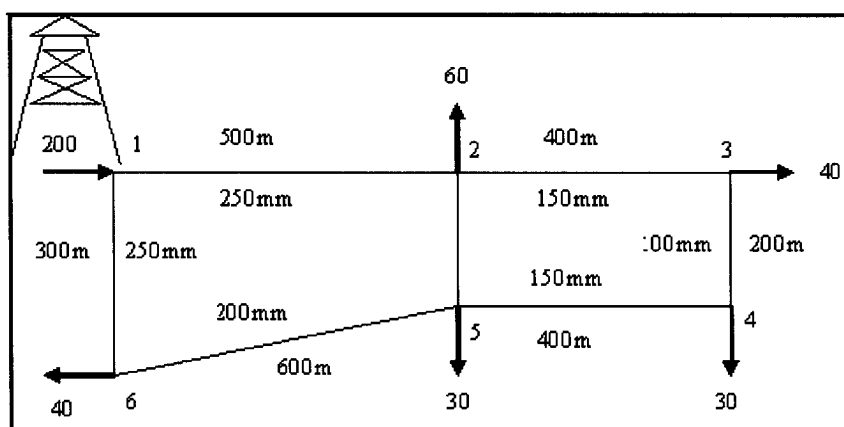


Figura No. 5.1 Modelo de red en estudio No. 1

Se pide analizar los caudales y las alturas piezométricas. Los caudales de consumo están dados en l/seg; los diámetros en milímetros y las longitudes de las tuberías en metros. La presión en el punto 1 es de 100mca.

5.1.1 Esquematización de la red

El primer paso es dividir el sistema en una serie de elementos finitos identificando sus puntos extremos como “nodos”. Una tubería debe estar plenamente identificada en la red por su nodo inicial y final estableciendo implícitamente la dirección del flujo del caudal en la tubería, además se deben enumerar los nodos y tuberías.

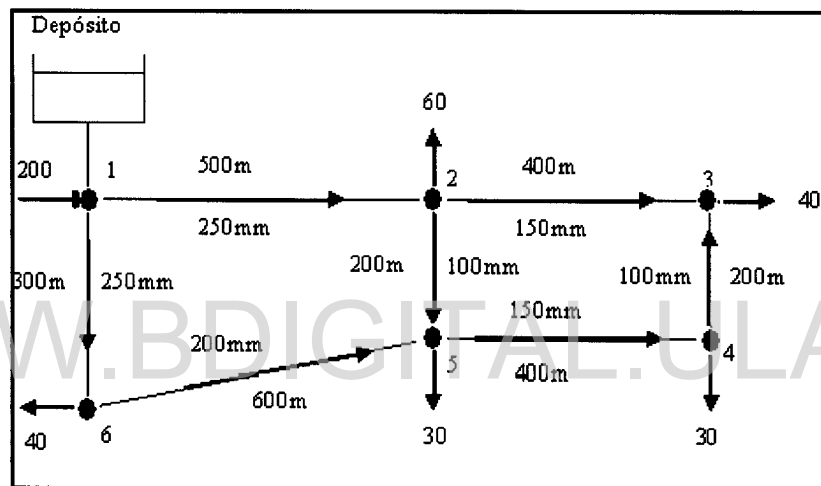


Figura No. 5.2 Esquematización de la red

5.1.2 Definición de la red

Para la definición de la red, procedemos al llenado de las cuatro secciones en que se divide el archivo de entrada, que son RED, APC, q y N.

Para la primera sección (RED), cada fila representa la conectividad de la tubería en la red, los valores entre columnas están separados por comas.

Donde:

Columna #1: Número del nodo inicial

Columna #2: Número del nodo final

Columna #3: Longitud de la tubería en metros [m]

Columna #4: Diámetro de la tubería en metros [m]

Columna #5: Valor estimado del caudal inicial en cada tramo de tubería [m^3/seg].

Observando la esquematización de la red introducimos los valores en el archivo de entrada según la descripción anterior, tomando en cuenta que los valores del caudal inicial son estimados, para el presente ejemplo tomaremos un valor supuesto de 100l/seg para todos los tramos de tuberías.

[RED]

#n_inicial, n_final, longitud, diámetro, Q_inicial

1,	2,	500,	0.25,	0.1
2,	3,	400,	0.15,	0.1
4,	3,	200,	0.1,	0.1
5,	4,	400,	0.15,	0.1
2,	5,	200,	0.1,	0.1
6,	5,	600,	0.2,	0.1
1,	6,	300,	0.25,	0.1

La segunda sección se refiere a los nodos de cota piezométrica conocida y los argumentos son:

Columna #1: Número del nodo con altura piezométrica conocida

Columna #2: Valor de la altura piezométrica conocida.

En el presente caso se indica que la altura piezométrica conocida tiene un valor de 100mca, correspondiente al nodo número 1, por lo tanto:

[APC] #nodo,	altura
1,	100

En la tercera sección se tienen dos argumentos representados en las columnas: nodos y q_inicial donde éste último indica los valores correspondientes a los caudales de consumo, los cuáles se ven representados en la esquematización de red como salidas de los nodos.

[q] #nodo	q_inicial
2,	0.06
3,	0.04
4,	0.03
5,	0.03
6,	0.04

Por último en la cuarta sección se representan tres columnas, en las cuales se indica las coordenadas x, y, z para cada uno de los nodos según un sistema de ejes de coordenadas predefinido, por lo tanto para este ejemplo numérico tenemos:

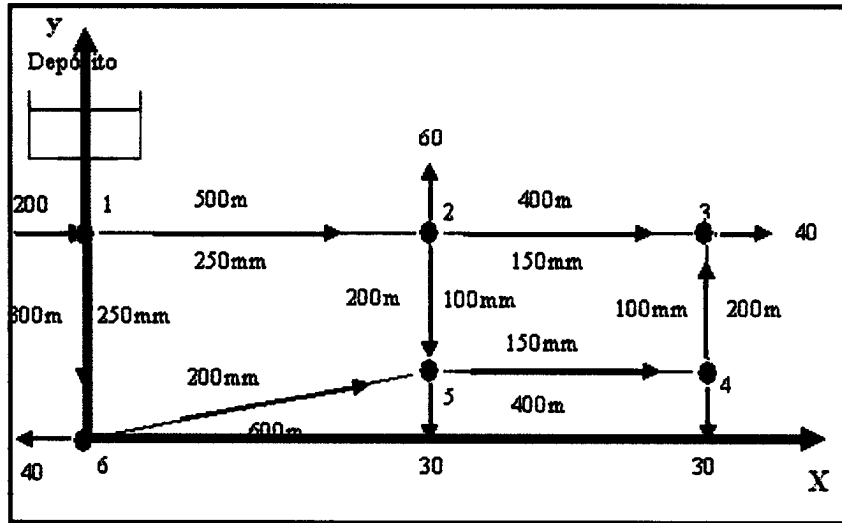


Figura No. 5.3 Definición del sistema de ejes de coordenadas para la red

[N] #nodo,	x,	y	z
1,	0,	300,	70
2,	500,	300,	65
3,	900,	300,	60
4,	900,	100,	58
5,	500,	100,	63
6,	0,	0,	68

5.1.3 Argumentos – Parámetros del modelo

Una vez que se han reunido e introducido los datos del modelo de red, se deben identificar los parámetros del modelo asociados a los argumentos pasados por línea de comandos.

Para el problema en estudio se tomarán los siguientes argumentos:

- -r redentrada
(Archivo que contiene los datos de entrada del modelo de red en estudio)
- -m pvc
(Se tomará que la tubería es de pvc)
- -d 3
(se le indicará que muestre 3 decimales por pantalla)
- -o html
(Indicando que genere la salida HTML, éste arrojará los archivos de imágenes y el reporte en formato html)
- -v
(Con ésta instrucción se le indica que muestre la información por pantalla, con la finalidad de presentar el desarrollo de los cálculos.)
- No se le indica el número de iteraciones; esto se realiza con el propósito de que el proceso se repita hasta que en dos iteraciones sucesivas las alturas piezométricas sean aproximadamente iguales, es decir, que se cumpla $[H_{i+1}] \approx [H_i]$ con una precisión de 0.001, valor ya asignado por defecto en el programa.

5.1.4 Proceso de cálculo

Teniendo identificados los parámetros del modelo, proseguimos a realizar el cálculo de presiones y caudales en la red.

Para iniciar el proceso de cálculo introducimos los parámetros del modelo por línea de comandos, como se muestra en el siguiente ejemplo:

c:\...waterpy.py -r redentrada.txt -m pvc -d 3 -o html -v

donde:

[...] indica la ubicación del archivo de entrada en la pc.

5.1.4.1 Proceso iterativo interno

A continuación se presenta la información mostrada por pantalla:

```

Símbolo del sistema
[ 0.009]
[ 0.052]
[ 0.092]]
Los nuevos valores de H son:
[[ 93.478]
[ 84.127]
[ 84.251]
[ 90.881]
[ 97.047]]

ITERACION 7
Tabla de datos:
[[ 0.108      0.013      2.194      6.523      562.293]
[ 0.038      0.015      2.167      9.348      6373.212]
[ 0.002      0.026      0.217      0.126      43321.347]
[ 0.032      0.015      1.794      6.632      6599.092]
[ 0.009      0.018      1.198      2.603      29407.544]
[ 0.052      0.015      1.665      6.165      2254.319]
[ 0.092      0.014      1.80      2.953      346.636]]

Los nuevos valores de Q son:
[[ 0.108]
[ 0.038]
[ 0.002]
[ 0.032]
[ 0.009]
[ 0.052]
[ 0.092]]

Los nuevos valores de H son:
[[ 93.478]
[ 84.127]
[ 84.251]
[ 90.881]
[ 97.047]]

Caudales finales <Q>:
[[ 0.108]
[ 0.038]
[ 0.002]
[ 0.032]
[ 0.009]
[ 0.052]
[ 0.092]]

Alturas finales <H>:
[[ 93.478]
[ 84.127]
[ 84.251]
[ 90.881]
[ 97.047]]

C:\Documents and Settings\Maurice Ramirez\Escritorio\modelotesis>

```

Figura No. 5.4 Presentación de resultados por consola

Como se puede observar en la captura de pantalla mostrada, el modelo de simulación realiza siete (7) iteraciones, esto debido a que en los argumentos pasados por línea de comandos no se le indicó cuantas iteraciones realizar, por lo tanto éste itera tantas veces sea necesario hasta que se cumpla la condición que exista por defecto una precisión de 0.001.

5.1.5 Resultados Generales

El modelo de simulación genera los resultados del estudio de red en un archivo de salida pdf como se muestra a continuación:

redentrada.pdf - Adobe Reader

Archivo Edición Ver Ventana Ayuda

1 / 3 54% Comentario Compartir

Redes de Agua Potable

Tabla #1

ID Nodo	Consumo (m³/Seg)	Alturas Piezométricas (m)	Presión (m.c.a.)
1	0.0	100.0	33.0
2	0.03	33.376	25.478
3	0.04	24.127	24.027
4	0.03	24.201	23.251
5	0.03	20.001	27.001
6	0.04	27.047	29.047

Tabla #2

ID Tramo	Longitud (m)	Dámetro (m)	Velocidad (m/s)	Caída (m/Seg)
1-2	500.0	0.25	2.194	0.103
2-3	400.0	0.15	3.167	0.038
4-3	200.0	0.1	0.217	0.002
5-4	400.0	0.15	1.754	0.032
2-5	600.0	0.1	1.193	0.009
5-6	600.0	0.2	1.665	0.052
1-6	100.0	0.25	1.86	0.092

Figura No. 5.5 Presentación de tablas de resultados.

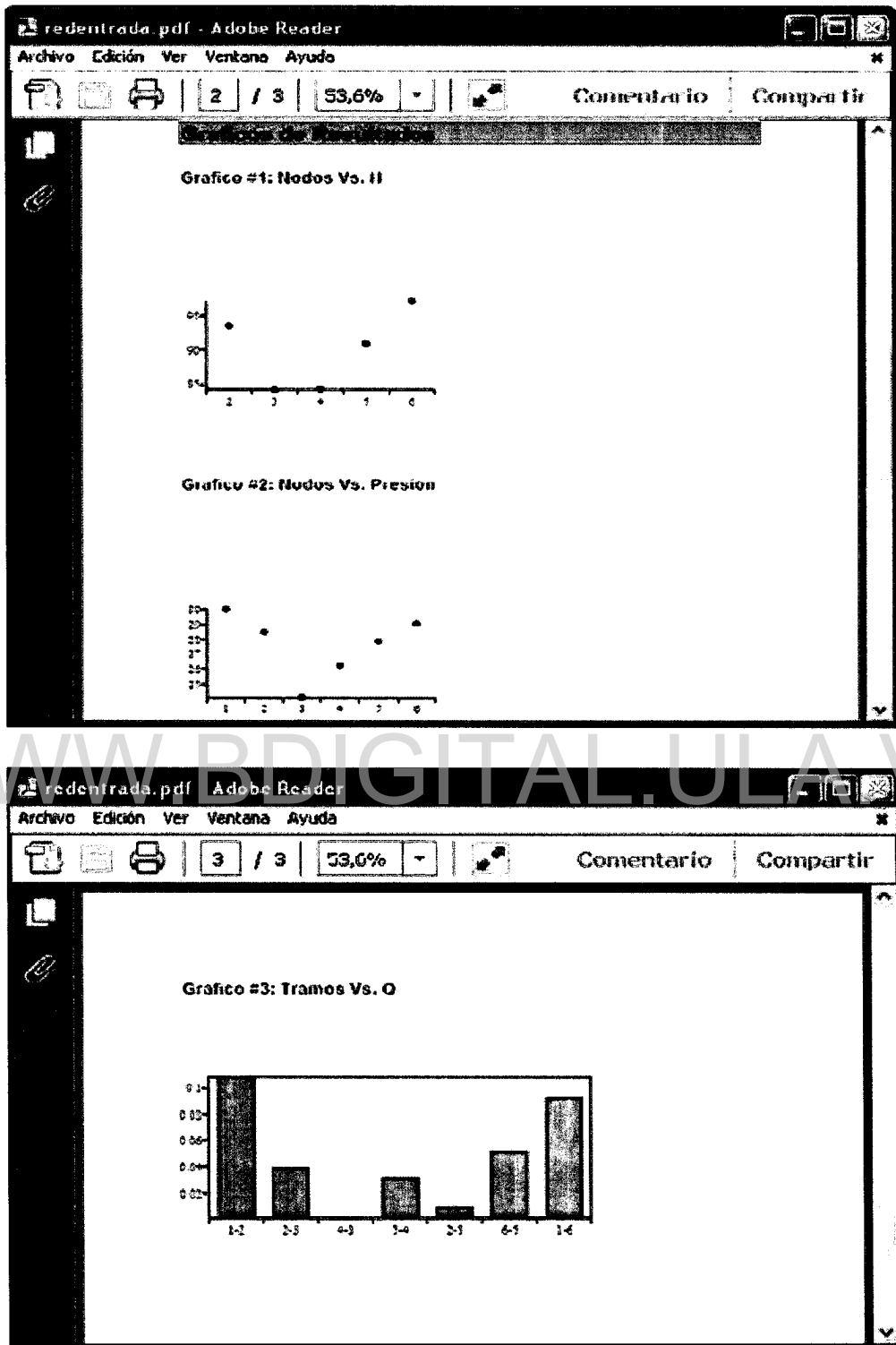


Figura No. 5.6 Presentación de gráficos de resultados.

Los resultados se generan en tres hojas, en la primera se presentan dos tablas de resultados.

La tabla # 1 contiene tres columnas que están identificadas de la siguiente manera:

Columna #1: Número de identificación del nodo.

Columna #2: Caudal de consumo por nodo [m^3/seg].

Columna #3: Alturas piezométricas por nodo en metros [m].

Columna #4: Presión por nodo en metro columna de agua [m.c.a].

La Tabla # 2 está estructurada de la siguiente manera:

Columna #1: Contiene la identificación del tramo de tubería.

Columna #2: Valor de la longitud del tramo de tubería [m].

Columna #3: Valor del diámetro de tubería por tramos [m].

Columna #4: Contiene los valores de velocidad por tramos de tubería [m^3/seg].

Columna #5: Contiene el valor del caudal por tramos de tubería (m^3/seg).

En la segunda hoja se presenta los gráficos de resultados; en el Gráfico # 1 se relaciona según el nodo la altura piezométrica correspondiente, y en el Gráfico # 2 se presenta el valor de presión para cada nodo.

Finalmente en la tercera hoja el Gráfico # 3 representa el valor de caudal que pasa por cada tramo de tubería.

Se puede observar en la tabla y en los gráficos de resultados, los valores de las principales variables del cálculo hidráulico estático, como son las alturas piezométricas en cada nodo, las presiones por nodos y los caudales en cada tramo de tubería.

Dado que se le indicó por línea de comandos que adicionalmente presente los resultados en formato de Imagen y HTML, a continuación se muestra los resultados arrojados en formato HTML ya que éste engloba los obtenidos en tres archivos en formato de Imagen.

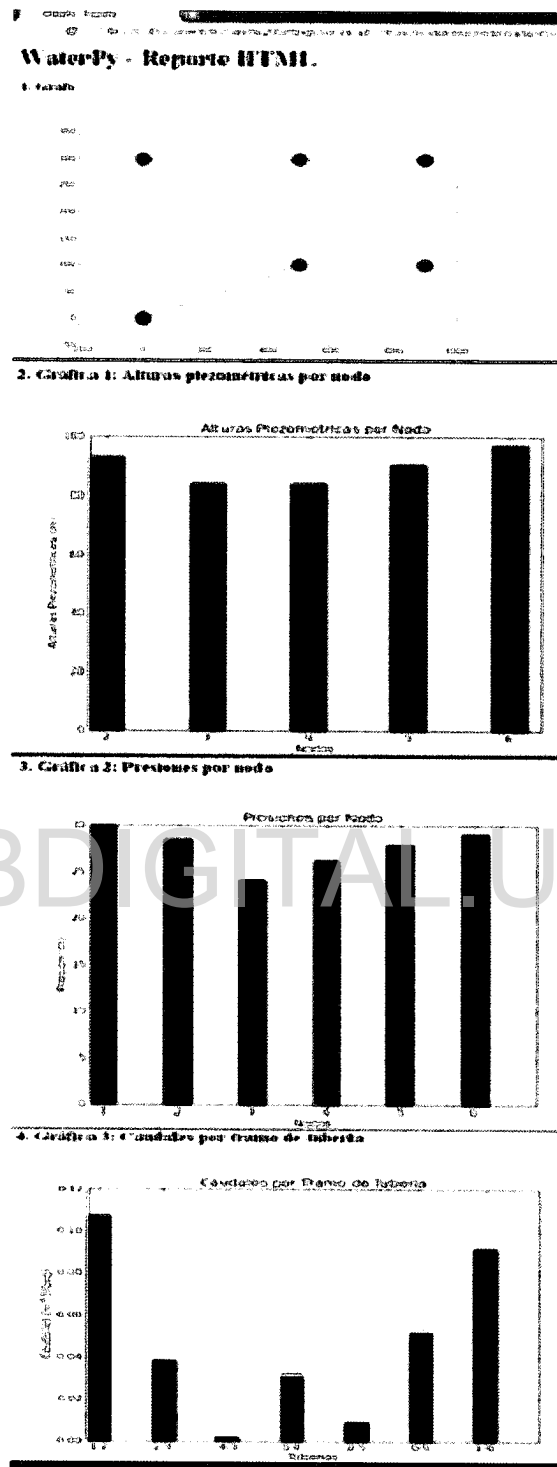


Figura No. 5.7 Presentación de resultados en formato HTML.

Como se puede observar lo que varía entre los resultados de los gráficos obtenidos en formato HTML y los ya presentados en archivo pdf, es la forma en cuanto a representación gráfica.

El grafo obtenido se puede visualizar en el archivo de Imagen y HTML. Éste representa la esquematización de la red en estudio de manera sencilla, ya que solo nos indica los nodos y la visualización de planta de la red de distribución.

5.2 Desarrollo de ejemplo numérico (Caso 2)

A continuación se presenta un ejemplo en el cuál se tienen los datos del archivo de entrada, a diferencia del primer ejemplo de red no se presenta una esquematización de la red, por lo cual se pedirá por línea de comandos los resultados en formato PDF y en HTML para ver la representación grafica de la red a través del grafo. En éste caso por línea de comando no se indicará el material de la tubería, de manera que por defecto tomará como material el polietileno.

5.2.1 Definición de la red (Caso 2)

Para la definición de la red, se procede al llenado de las cuatro secciones.

[RED]

#n_inicial,	n_final,	longitud,	diametro,	Q_inicial
1,	2,	500,	0.2,	0.1
2,	3,	150,	0.30,	0.1
3,	4,	120,	0.25,	0.1
5,	4,	200,	0.2,	0.1
6,	5,	120,	0.254,	0.1
6,	3,	200,	0.2,	0.1
7,	6,	80,	0.25,	0.1
7,	2,	60,	0.254,	0.1
8,	7,	100,	0.25,	0.1
1,	8,	60,	0.25,	0.1

[APC]

#nodo,	altura
--------	--------

1,	50
----	----

[q]

#nodo	#q_inicial
-------	------------

2,	0.06
----	------

3,	0.05
----	------

4,	0.07
----	------

5,	0.1
----	-----

6,	0.08
----	------

7,	0.05
----	------

8,	0.07
----	------

[N]

#nodo,	x,	y	z
--------	----	---	---

1,	300,	60,	68
----	------	-----	----

2,	200,	60,	60
----	------	-----	----

3,	120,	200,	58
----	------	------	----

4,	0,	200,	54
----	----	------	----

5,	0,	0,	50
----	----	----	----

6,	120,	0,	60
----	------	----	----

7,	200,	0,	62
----	------	----	----

8,	300,	0,	65
----	------	----	----

5.2.2 Proceso de cálculo (Caso 2)

Para iniciar el proceso de cálculo introducimos los parámetros del modelo por línea de comandos, como se muestra a continuación

```
c:\...waterpy.py -r redentrada2.txt -o html
```

5.2.3 Salidas generadas

Las salidas generadas son por archivo PDF e IMAGEN, ya que no se le indicó por línea de comandos que debía mostrar resultados por pantalla. Adicionalmente como no se le indicó precisión toma por defecto 0.001.

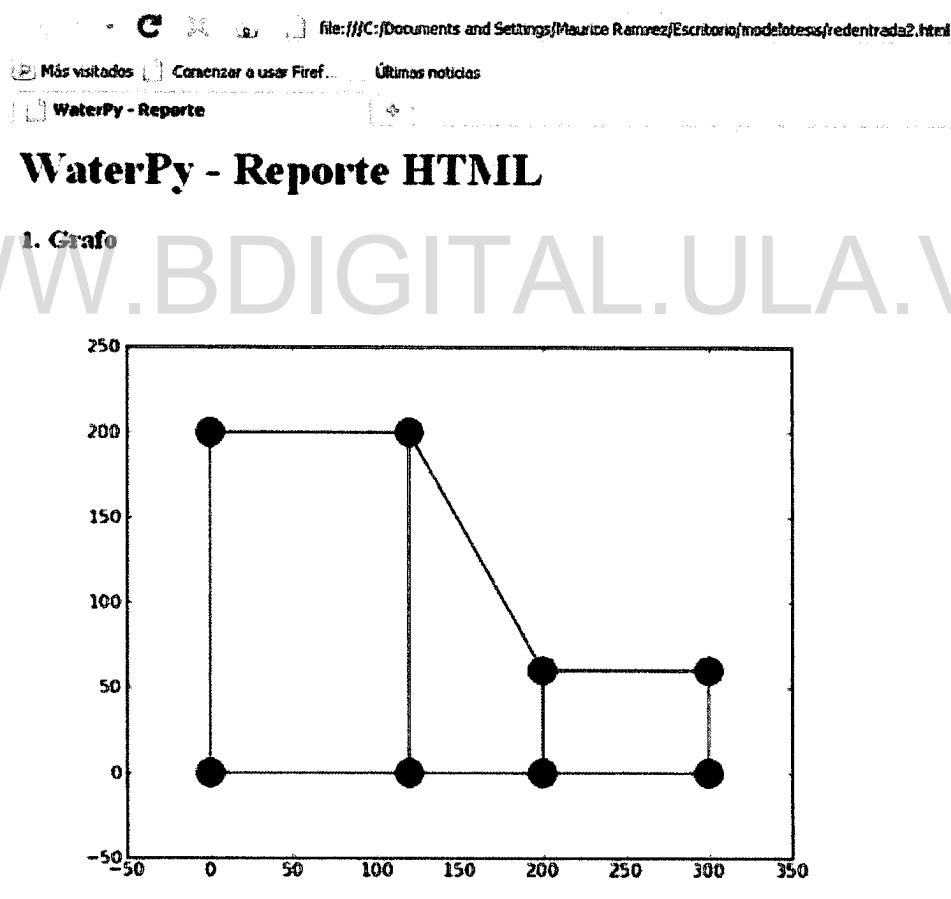


Figura No. 5.8 Presentación de Grafo (Caso 2)

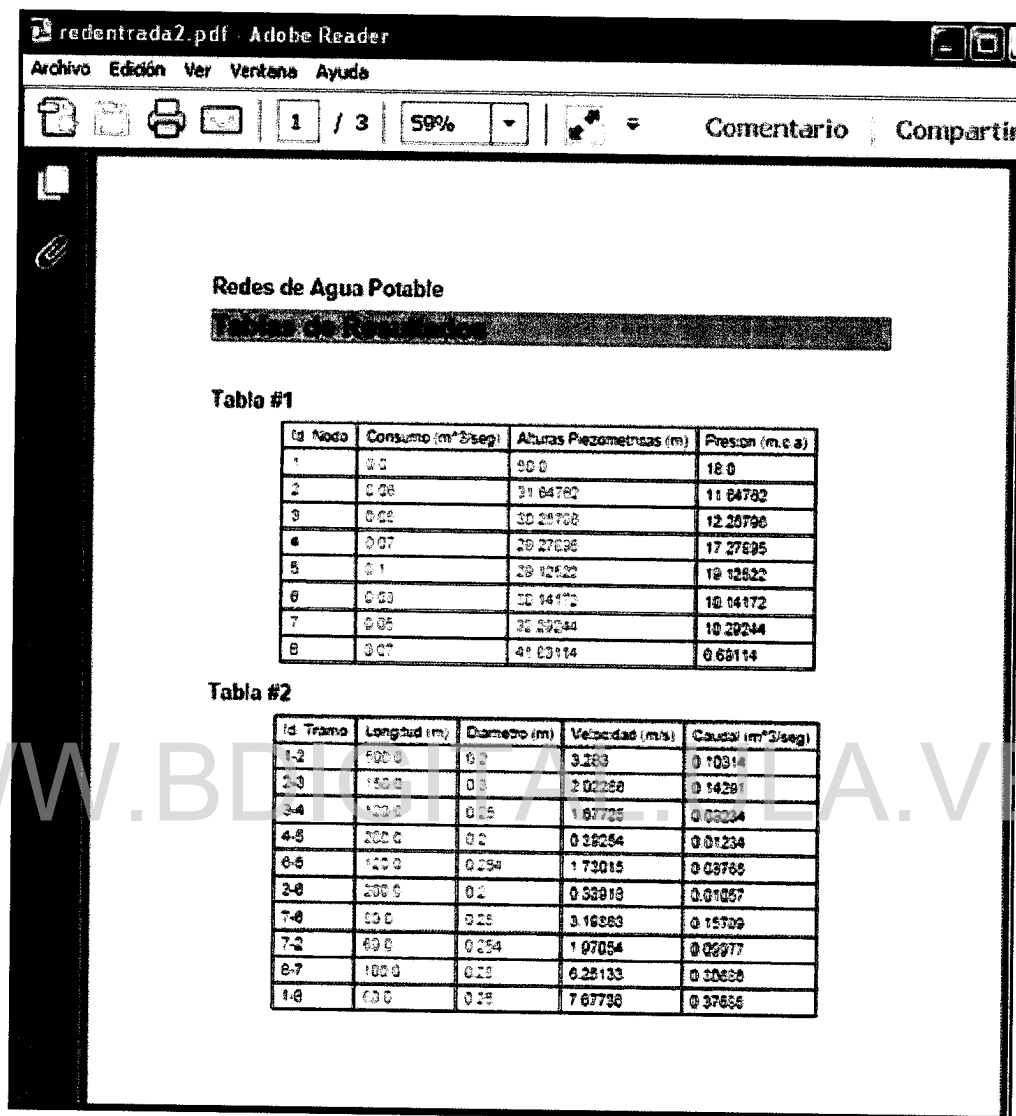


Figura No. 5.9 Presentación de tablas de resultados en archivo PDF

5.3 Desarrollo de ejemplo numérico (Caso 3)

Por último se presenta un ejemplo, en el cuál se tienen los datos del archivo de entrada. A diferencia de los dos ejemplos anteriores en éste caso se le indica por línea de comandos que la precisión de los resultados sea de 0.005.

5.1.1 Esquematización de la red (Caso3)

A continuación se presenta en el esquema los datos para generar el archivo de entrada al programa.

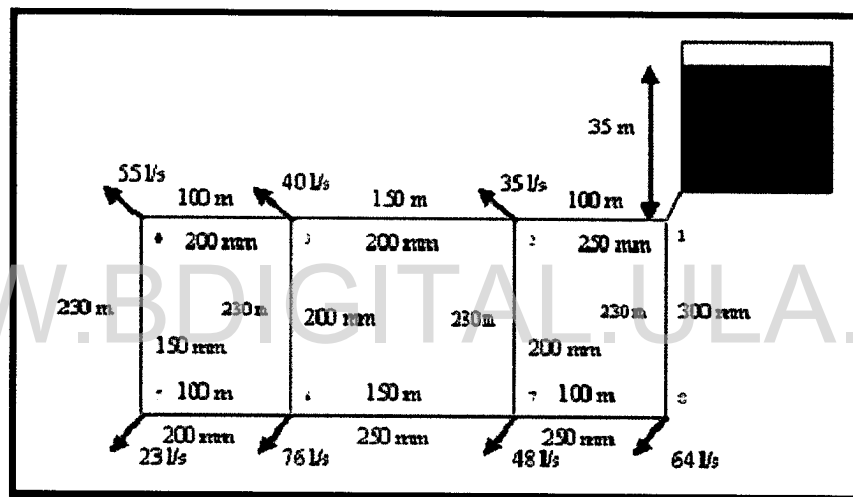


Figura No. 5.10 Esquematización de la red (Caso 3)

5.3.2 Definición de la red (Caso 3)

Se procede al llenado de las secciones correspondientes al archivo de entrada, según los datos representados en la esquematización de la red.

[RED]

#n_inicial,	n_final,	longitud,	diametro,	Q_inicial
1,	2,	100,	0.25,	0.1
2,	3,	150,	0.20,	0.1
3,	4,	100,	0.20,	0.1
5,	4,	230,	0.15,	0.1
6,	5,	100,	0.20,	0.1
6,	3,	230,	0.20,	0.1
7,	6,	150,	0.25,	0.1
2,	7,	230,	0.20,	0.1
8,	7,	100,	0.25,	0.1
1,	8,	230,	0.30,	0.1

[APC]

#nodo,	altura
1,	35

[q]

#nodo	#q_inicial
2,	0.035
3,	0.04
4,	0.055
5,	0.023
6,	0.076
7,	0.048
8,	0.064

[N]

#nodo,	x,	y,	z
1,	350,	230,	22
2,	250,	230,	19
3,	100,	230,	14
4,	0,	230,	11
5,	0,	0,	14
6,	100,	0,	16
7,	250,	0,	18
8,	350,	0,	20

5.3.3 Proceso de cálculo (Caso 3)

Para iniciar el proceso de cálculo se introducen los parámetros del modelo por línea de comandos, como se muestra a continuación

c:\...waterpy.py -r redentrada3.txt -m pvc -p 0.005 -o html

5.3.4 Salidas generadas

Las salidas generadas son por archivo de Imagen y html, ya que no se le indicó por línea de comandos que debía generar las otras. También se le indicó que debe tener una precisión de 0.005 y el material utilizado para el coeficiente de rugosidad es pvc.

A continuación se presenta otras maneras de visualización de los resultados:

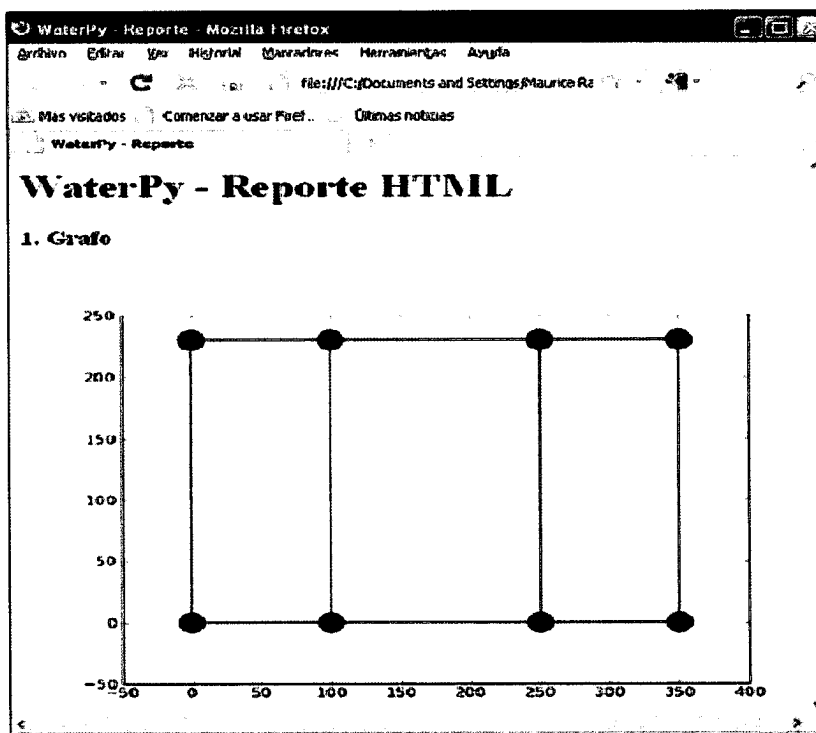


Figura No. 5.11 Reporte de resultados en HTML

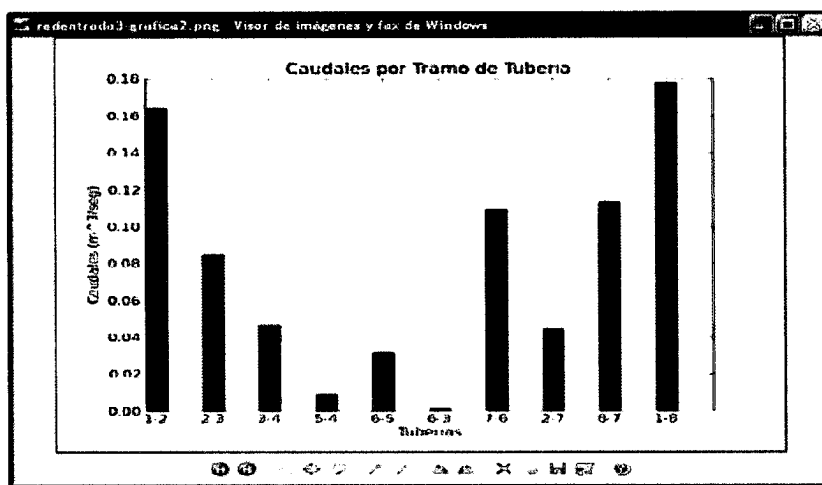


Figura No. 5.12 Presentación de gráfico de barras en formato de Imagen

Capítulo 6

6. Análisis, Conclusiones y recomendaciones

Finalizada la implementación del modelo con la aplicación de varios ejemplos numéricos, conlleva a observar que se cumplieron todas las fases en la elaboración del modelo de simulación de redes de distribución agua; en la primera fase de planificación y elaboración se generó la definición de una serie de requerimientos conceptuales y el modelo hidráulico, lo cual permitió llevar a cabo uno de los objetivos específicos, el cual indicaba recopilar, gestionar, analizar y producir la información relacionada con el desarrollo del prototipo de simulación. Una vez finalizada ésta fase se siguió con el desarrollo de la fase de construcción, generándose en ésta el modelo de simulación denominado Waterpy.

En la fase de aplicación se logró realizar la implementación del modelo, obteniéndose los resultados esperados en cuanto al cálculo hidráulico estático se refiere, siendo éstos resultados comprobados con la aplicación de los mismos ejemplos numéricos en el programa redes 2007 del Prof. Juan Saldarriaga de la Universidad de los Andes, Bogotá-Colombia. También se probó un ejemplo en el programa EPANET.

A continuación se presenta una tabla comparativa entre los alcances de de EPANET y WATERPY.

Tabla No. 4

Matriz comparativa de las principales diferencias EPANET y WATERPY.

Característica	WATERPY	EPANET
Análisis en Estado Estático.	LIMITADO	SI
Análisis en Periodo Extendido	NO	SI
Análisis de Calidad	NO	SI
Análisis Automatizado de Flujo de Incendio	NO	NO
Análisis de Costos de Energía	NO	LIMITADO
Análisis Crítico y de Segmentación (Critically Analysis)	NO	NO
Análisis de Vaciado Uni-Direccional (Flushing Analysis)	NO	NO
Archivos de Fondo Escalado - Manejo DXF, SHP e Imágenes	NO	NO
Manejo de Múltiples Escenarios y Alternativas en un único Archivo y Análisis Comparativo	NO	NO
Posibilidad de Creación de Submodelos y acoplamiento de estos en Modelos Maestros.	NO	NO
Controles Lógicos Simples	NO	SI
Controles Lógicos Compuestos	NO	LIMITADO
Módulo para Esquelitización Inteligente de Modelos.	NO	NO
Algoritmos Genéticos en Calibración y Diseño óptimo	NO	NO
Navegador de la Red y Generación automática de consultas topológicas y de conectividad	NO	NO
Bombas de Velocidad Variable	NO	NO
Curvas de Energía del Sistema.	NO	NO
Elemento Hidrante	NO	NO
Elemento Válvula de Aislamiento/Seccionamiento	NO	NO
Emisores y Nodos Dependientes de Presión	NO	LIMITADO
Integración con AutoCAD 2009	NO	NO
Integración con MicroStation V8i	NO	NO
Integración con ArcGIS 9.x	NO	ALGUNOS DESARROLLOS EXTERNOS
Herramientas Automatizadas de Anotación	NO	NO
Compatibilidad ODBC	NO	NO
Gestión y Manejo de Bases de Datos - Sincronización con GIS, Access y Excel.	NO	NO
Asignación Automática de Cargas a partir de consumos Geo-referenciados (LoadBuilder)	NO	NO
Edición Global de Elementos, Morphing, etc.	NO	NO
Creación de Líneas de Perfil, incluida línea de terreno.	NO	NO

Consultas y Filtros tipo SQL.	NO	NO
Desarrollo Aplicaciones y Personalización.	NO	SI
Datos Operativos de Tanques (Niveles, Mezcla, etc)	NO	SI
Capacidad de Reportes Tabulares y Gráficos Personalizados. Herramientas de Animación.	NO	LIMITADO
Reportes Estadísticos del Sistema (Min., Max., Prom.)	NO	NO
Licenciamiento en Redes de Área Local (LAN Networks)	NO	NO
Soporte Técnico 7 días y Actualizaciones Periódicas	NO	NO
Tiempo de ejecución	Real 0m4.209s User 0m0.820s Sys 0m0.172s	real 0m0.035s user 0m0.004s Sys 0m0.004s
Tamaño de archivo	589 bytes	575 bytes
Licencia	GPL V3	Dominio Público

Waterpy está diseñado para el análisis en estado estático, sin embargo su capacidad es limitada debido a que no simula bombas y válvulas, por lo tanto sirve es para redes de distribución por gravedad. No obstante ya con las condiciones que tiene el programa se da solución de análisis a una gran cantidad de redes de distribución en estudio. Cabe destacar que en el estado Mérida de los acueductos administrados por la empresa estatal Aguas de Mérida C.A el 65% trabajan por gravedad.

Otra de las diferencias que podemos comparar es el tiempo de ejecución de ambos programas, la gran diferencia entre ellos es debido al tipo de lenguaje de programación bajo el cual está cada uno de ellos. Epanet está escrito bajo un lenguaje compilado, es decir con un lenguaje de bajo nivel en los que las instrucciones se traducen del lenguaje utilizado a código máquina para una ejecución rápida. Por el contrario Waterpy está escrito bajo un lenguaje interpretado en el cual las instrucciones se traducen o interpretan una a una, lo cual lo hace más lento. Otro factor que influye en el tiempo, es la generación de reportes.

En cuanto a la licencia utilizada para cada uno de los programas, se tiene que EPANET está bajo la licencia de software de dominio público, es decir que los autores han renunciado a todos sus derechos como autores y entregan el producto para uso de todos; lo que puede significar que algunas copias o versiones modificadas pueden no ser completamente libres, «dominio público» es un término legal y significa de manera precisa «sin derechos de autor». Por otra parte WATERPY está bajo la licencia GPL versión 3, por lo cual está protegido con copyleft. El software protegido con copyleft es libre y los términos de distribución aseguran que todas las copias de todas las versiones son software libre, lo cual genera un beneficio para los usuarios del producto.

6.1 Conclusiones

Una vez diseñado el prototipo de simulación y habiéndolo implementado, se obtuvieron los resultados esperados, los cuales permiten presentar el siguiente conjunto de conclusiones:

Se logró el objetivo de desarrollar un prototipo de simulación de redes de distribución agua basado en software libre, capaz de responder a las necesidades tecnológicas y a las exigencias del cálculo hidráulico estático para redes cerradas, según las limitaciones propias del modelo en cuanto a los componentes físicos que se pueden modelar como son depósitos o reservorios, nodos y tuberías.

La principal cualidad con la que cuenta el prototipo de simulación "Waterpy", es que está desarrollado bajo software libre, lo cual lo diferencia de otros programas similares; esto garantiza el disponer del código fuente, permitiendo que el prototipo pueda ser mejorado de acuerdo a los requerimientos y observaciones de sus usuarios. El código fuente de Waterpy y la documentación del mismo se encuentran disponibles en el repositorio <http://code.google.com/p/waterpy>, de igual forma allí se explica los requisitos para su instalación e implementación.

6.2 Recomendaciones

- Mejorar el prototipo incluyendo nuevos componentes como son bombas y válvulas, lo cuales son elementos importantes dentro del análisis hidráulico.
- Incorporar interfaces gráficas que faciliten la introducción de los archivos de entrada y que permitan dibujar la esquematización de la red a simular.
- Incorporar al prototipo la modelación de accesorios especiales en redes de tuberías.
- Mejorar el prototipo incluyendo el análisis de otro tipo de redes con sus respectivos métodos de cálculo.
- Incluir en el modelo el cálculo dinámico, es decir el cálculo hidráulico en periodo extendido (cálculo hidráulico a diferentes horas del día).
- Mejorar el prototipo de manera que se puedan importar modelos hidráulicos creados en EPANET y viceversa.

Referencias bibliográficas

Alfonso F. Miguel E. (2001) ***“EPARED. Programa para el diseño y simulación de redes hidráulicas”*** en Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental. Recuperada 26 de noviembre de 2010, de <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico26/vii-002.pdf>

Alperovits E. y Shamir U. (1977) ***“Design of Optimal Water Distribution Systems”*** Journal of Water Resources Research. Vol. 13. No. 6. Recuperada 12 de febrero de 2011, de <http://urishamir.wri.technion.ac.il/files/documents/1977-Design%20of%20Optimal%20Water%20Distribution%20Systems.pdf>

Álvarez G. Francisco J. (2009) ***“Infraestructuras de las zonas de abastecimiento”*** Junta de Castilla y León. Consejería de Sanidad. Recuperada 2 de Diciembre de 2010, de http://www.salud.jcyl.es/sanidad/cm/profesionales/tkContent?idContent=763162&locale=es_ES&textOnly=false

AMF (2004), ***“Área de Mecánica de Fluidos, Universitat Jaume I”*** Recuperada 2 de Diciembre de 2010, de http://www.amf.uji.es/Practicas_Red.es.pdf

Benkley (2009a) ***“WaterCAD” Modelación y Diseño de Sistemas de Distribución.*** Recuperada 26 de noviembre de 2010, de <http://www.bentley.com/es-MX/Products/WaterCAD/Overview.htm>

Benkley (2009b) ***“WaterGEMS” Modelación y Gestión de Sistemas de Distribución con Integración GIS.*** Recuperada 26 de noviembre de 2010, de www.bentley.com/es-MX/Products/WaterGEMS/

Docutils (2010) ***“Docutils: Documentation Utilities”*** Recuperada 2 de Diciembre de 2010, de <http://docutils.sourceforge.net>

EPA, Environmental Protection Agency (2008) ***“EPANET”***. Disponible desde: www.epa.gov/nrmrl/wswrd/dw/epanet.html

Epydoc (n.d.) ***“Automatic API Documentation Generation for Python”***
Recuperada 2 de diciembre de 2010, de <http://epydoc.sourceforge.net>

Eustat (2004) ***“Euskal Estatistika Erakundea - Instituto Vasco de Estadística”***
Recuperada 28 de noviembre de 2010, de http://www.eustat.es/estadisticas/idioma_c/tema_179/opt_0/tipo_5/temas.html

Eyssautier de la Mora Maurice (2006) ***“Metodología de la Investigación: Desarrollo de la inteligencia”*** Recuperada 28 de noviembre de 2010, de http://books.google.co.ve/books?id=xdALJ4BXo_AC#reviews_anchor

Ferreiro Ana M. y García José A. (2005) ***“Generación de Informes profesionales desde Python REPORTLAB”*** Recuperada 28 de Noviembre de 2010, de: <http://www.linux-magazine.es/issue/13/ReportLab.pdf>

García C. Fernando (2007) ***“La Investigación Tecnológica”*** Investigar, Idear e Innovar en Ingenierías y Ciencias Sociales. Segunda edición. Editorial LIMUSA S.A. México, D.F.

GNU (2007) ***“GNU General Public License”*** Recuperada 2 de julio de 2011, de: www.gnu.org/copyleft/gpl.html

González D. Raúl (2008) ***“Python para todos”*** Recuperada 2 de diciembre de 2010, de <http://mundogeek.net/tutorial-python/>

González F. Nieves (2009) ***“La biblioteca expandida en código abierto”***
Recuperada 2 de diciembre de 2010, de <http://www.aab.es/pdfs/baab9697/96-97col01.pdf>

Graphviz (n.d.) ***“Graphviz - Graph Visualization Software”*** Recuperada 2 de Diciembre de 2010, de <http://www.graphviz.org>

Ingeduld Petr (2003) ***“Modeling of Water Distribution Systems with MIKE NET”*** Recuperada 09 de marzo de 2011, de http://www.hydrosys.net/myplus/bbs/table/hydrosys_doc/upload/MIKE_NET_OverviewGuide.pdf

KYPipe (2009) ***“KYPipe”*** Recuperada 29 de Noviembre de 2010, de <http://www.kypipe.com/kypipe>

Matplotlib (2008) ***“Matplotlib”*** Recuperada 28 de Noviembre de 2010, de <http://matplotlib.sourceforge.net/>

Mays Larry (2002) ***“Manual de Sistemas de Distribución de Agua. Departamento de Ingeniería Civil y Medio Ambiente.”*** Universidad del Estado de Arizona (Tempe, Arizona). Editorial McGraw-Hill/ Interamericana de España, S.A.U

Networks (2010) ***“Networkx”*** Recuperada 28 de Noviembre de 2010, de <http://networkx.lanl.gov>

Numpy (2009) ***“Numpy”*** Recuperada 28 de Noviembre de 2010, de <http://numpy.scipy.org/>

Piccolo (n.d.) ***“SAFEGE Consulting Engineers”*** Recuperada 28 de noviembre de 2010, de <http://www.safege.com/en/nos-metiers/rd-innovation/research-areas/research-areas/>

Saldarriaga Juan (2007). ***Hidráulica de Tuberías, Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos.*** Universidad de los Andes en Bogotá. Editorial Alfaomega, Bogotá – Colombia.

Salomons Elad (2005) ***“Water Simulation H2ONET Designer”*** Recuperada 09 de marzo de 2011, de <http://www.water-simulation.com/wsp/2005/07/20/h2onet-designer/>

Sotelo Gilberto (2002) ***“Hidráulica General”*** Fundamentos. Volumen 1.
Editorial Limusa, S.A. Grupo Noriega Editores. México, D.F.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

MANUAL DE USUARIO

WATERPY

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Índice

Índice.....	2
Introducción.....	3
Instalación del programa.....	4
Procesamiento de entrada.....	5
Procesamiento de salida.....	7

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

INTRODUCCIÓN

El presente documento tiene por finalidad ser una herramienta de apoyo para el uso del modelo de simulación de redes de distribución de agua llamado WATERPY.

WATERPY es un programa que realiza simulaciones en periodo estático del comportamiento hidráulico y está diseñado para analizar redes cerradas de tuberías aplicando el método del gradiente.

En general una red consta de tuberías, nodos, bombas, válvulas y tanques de almacenamiento o depósitos. Waterpy en ésta su versión 1.0 modela tres elementos hidráulicos: depósitos, tuberías y nodos.

A través de éste modelo de simulación se puede obtener las alturas piezométricas, presiones en cada nodo, caudales en cada tramo de tubería; velocidades y factores de fricción.

El programa puede generar reportes en distintos formatos como son: PDF, IMAGEN, HTML y adicionalmente puede presentar los resultados por pantalla.

1.- Instalación del programa

Waterpy se puede descargar del repositorio <http://code.google.com/p/waterpy> en el cual se encuentra disponible junto a su documentación.

Antes de utilizar Waterpy se debe instalar python y las bibliotecas descritas a continuación:

- 1) Python Se utilizó la versión 2.6 de python, como ya se dijo para ambiente Windows. Python puede ser descargado de la siguiente dirección: <http://www.python.org>
- 2) Numpy La versión utilizada para esta versión de waterpy fue la 1.5.1, la cual se puede descargar de la siguiente dirección: <http://numpy.scipy.org>
- 3) Reportlab La versión que se usó fue la versión 2.5, se puede descargar de la siguiente dirección: <http://www.reportlab.com/software/opensource/>
- 4) Matplotlib Se utilizó la versión 1.0.0, la cual puede ser descargada de la siguiente dirección: <http://matplotlib.sourceforge.net>
- 5) Networkx La versión utilizada fue la 1.3, que puede ser descargada de la siguiente dirección: <http://networkx.lanl.gov>

Para generar la documentación del programa se utilizó Epydoc, para lo cual se requiere la instalación de:

- 1) Graphviz (Graph Visualization Software) La versión de Graphviz utilizada fue la 2.26.3, que se puede descargar de la siguiente dirección: <http://www.graphviz.org>
- 2) Docutils La versión utilizada de docutils fue la 0.5 y se puede descargar de la siguiente dirección: <http://docutils.sourceforge.net>

- 3) Epydoc La versión utilizada de Epydoc fue la versión 3.0.1. Esta versión no es compatible con las versiones 0.6 y 0.7 de docutils. Se puede descargar de la siguiente dirección: <http://epydoc.sourceforge.net>

2.- Procesamiento de entrada

La descripción de la red se realiza a través de un archivo de texto, el cual contiene la información mínima necesaria en cuanto a componentes y propiedades descritas en la Tabla No. 2.

El archivo de entrada está dividido en las siguientes secciones:

- RED: contiene los valores correspondientes a las propiedades de las tuberías (longitud, diámetro y caudal inicial), además incluye las relaciones topológicas las cuales describen los enlaces entre nodos, es decir, el nodo inicial y el nodo final de cada tramo de tubería.
- APC: se refiere a los nodos de los cuales es conocida su altura piezométrica.
 - q: especifica por nodo cual es el caudal de consumo.
 - N: indicada las coordenadas de cada uno de los nodos.

Representación de las cuatro secciones en que se divide el archivo de entrada:

[RED] n_inicial, n_final, longitud, diámetro, Q_inicial
[APC] nodo, altura
[q] Nodo, q_inicial
[N] Nodo, x, y, z

Donde:

[RED]

n_inicial: número del nodo inicial.

n_final: número del nodo final.

Q_inicial: Valor estimado del caudal inicial por tramo de tubería.

Longitud: valor de la longitud por tramo de tubería en metros (m).

diámetro: longitud y diámetro por tramo de tubería en metros (m).

[APC]

nodo: punto donde se conoce la altura piezométrica.

altura: valor de la altura piezométrica en metros (m).

[q]

nodo: número de nodo donde existe consumo.

q_inicial: valor de los consumos por nodo en m³/seg.

[N]

nodo: número de nodo

x: coordenada del nodo en dirección x según ejes definidos.

y: coordenada del nodo en dirección y según ejes definidos.

z: cota terreno del nodo.

Por otra parte se tienen los argumentos pasados por línea de comandos, siendo estos propios del modelo. A continuación se indican los que se tomaron en consideración:

- -r Archivo de entrada donde se encuentran los datos de la red (el nombre del archivo lo indica el usuario).
- -m material con el cual está construida la tubería (dependiendo de este material, el coeficiente de rugosidad de la tubería varía; estos valores se encuentran en el archivo de entrada llamado "datos" y están especificados en la tabla No. 1)
- -i número de iteraciones a realizar
- -p precisión requerida por el usuario
- -d número de decimales a mostrar por pantalla
- -o mostrar resultados en formato de Imagen y HTML.
- -v mostrar información por pantalla

3.- Procesamiento de salida

El procesado de salida traslada los resultados calculados por el modelo a un formato de archivo PDF, éste se genera con el mismo nombre del archivo de entrada asignado por el usuario. El archivo PDF contiene tablas y gráficos donde se puede identificar por nodos cual es el valor de las alturas piezométricas y sus presiones, y por tramos de tubería el valor del caudal.

Adicionalmente se puede obtener archivos de salida en formato de Imagen y HTML. En formato de Imagen se obtienen tres archivos los cuales son: nombre_archivo_entrada-grafical: En el cual se observan las alturas piezométricas por nodos; nombre_archivo_entrada-grafica2: representa los caudales por tramos de tuberías; nombre_archivo_entrada-grafo: en un grafo se esquematiza el modelo de red en estudio. Por último la salida en formato HTML representa un reporte con los resultados mostrados en los tres archivos de imagen.