



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN
INGENIERÍA CIVIL



**“ALGUNAS APORTACIONES PARA EL DISEÑO ÓPTIMO DE
REDES DE DISTRIBUCIÓN. CASO DE ESTUDIO: RED DE
COCOTITLÁN, ESTADO DE MÉXICO”**

DESARROLLO DE UN CASO PRÁCTICO

PARA OBTENER EL GRADO DE

INGENIERO CIVIL

PRESENTA

JUAN OSCAR MELÉNDEZ HERNÁNDEZ

DIRECTOR DE TESIS

M.I. MARTÍN RUBÉN JIMÉNEZ MAGAÑA

México, Méx. Marzo 2015

FES Aragón
Ciudad Nezahualcóyotl, Estado de México



FES Aragón



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN | 5 |
| OBJETIVOS | 6 |
| Objetivo general:..... | 6 |
| Objetivos específicos:..... | 6 |
| CAPÍTULO 1. GENERALIDADES SOBRE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE Y LOS MODELOS NUMÉRICOS PARA DISEÑARLAS. | 7 |
| 1.1 GENERALIDADES SOBRE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE..... | 7 |
| 1.1.1 Redes de distribución de agua potable..... | 7 |
| 1.1.2 Fuentes de abastecimiento | 7 |
| 1.1.3 Componentes del sistema de abastecimiento | 7 |
| 1.1.4 Red de distribución | 9 |
| 1.1.5 Impacto ambiental de un sistema de abastecimiento de agua potable..... | 9 |
| 1.1.6 Información requerida para el planteamiento de la red de distribución de agua potable | 9 |
| 1.1.7 Red de abastecimiento de agua potable abierta o ramificada | 10 |
| 1.2 MODELACIÓN MATEMÁTICA APLICADA A REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE..... | 14 |
| 1.2.1 Ecuaciones fundamentales..... | 14 |
| 1.3 PÉRDIDAS DE ENERGÍA..... | 16 |
| 1.3.1 Perdidas de carga por fricción..... | 16 |
| 1.4 MODELOS DE ANÁLISIS | 18 |
| 1.4.1 Tipos de modelos | 18 |
| CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE DEL DISEÑO..... | 21 |
| 2.1 ANTECEDENTES | 21 |
| 2.2 TIPOS DE MODELOS | 21 |
| 2.2.1 Aplicabilidad | 22 |
| 2.2.2 Grado de detalle..... | 22 |
| 2.2.3 Variación en el tiempo | 22 |
| 2.2.4 Variables del sistema..... | 26 |
| 2.3 MODELOS HIDRÁULICOS | 26 |
| 2.3.1 Etapas en la elaboración de un modelo hidráulico | 26 |
| 2.3.2 Esqueletización de la red..... | 34 |
| 2.3.3 Estudio de consumos y asignación de demandas | 37 |

| | |
|---|----|
| 2.3.4 Calibración del modelo hidráulico..... | 50 |
| 2.3.5 Realización de mediciones en la red | 60 |
| 2.3.6 Evaluación de resultados del modelo hidráulico | 65 |
| 2.3.7 Precalibrado del modelo | 67 |
| 2.3.8 Análisis de sensibilidad..... | 68 |
| 2.3.9 Ajuste fino del modelo | 68 |
| 2.4 RESUMEN | 72 |
| CAPÍTULO 3. FUNDAMENTOS DE LA COMPUTACIÓN EVOLUTIVA, ALGORITMOS GENÉTICOS | 73 |
| 3.1 FUNDAMENTOS..... | 73 |
| 3.2 LA COMPUTACIÓN EVOLUTIVA | 73 |
| 3.2.1 Representación genética o codificación..... | 76 |
| 3.2.2 Función de evaluación o desempeño..... | 77 |
| 3.2.3 Operadores genéticos | 77 |
| 3.2.4 Mutación | 77 |
| 3.2.5 Recombinación..... | 78 |
| 3.2.6 Selección..... | 79 |
| 3.2.7 Reemplazo poblacional | 79 |
| 3.2.8 Otros aspectos y consideraciones al diseñar algoritmos evolutivos..... | 80 |
| 3.2.9 Criterio de terminación | 80 |
| 3.2.10 Medidas del funcionamiento del algoritmo..... | 80 |
| 3.2.11 Diseño y parametrización del algoritmo | 80 |
| CAPÍTULO 4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO..... | 82 |
| 4.1 ALGORITMOS GENETICOS | 82 |
| 4.1.1 Definición | 82 |
| 4.2 ALGORITMOS GENÉTICOS DENTRO DE PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN | 84 |
| 4.3 MANEJO DE RESTRICCIONES EN UN PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN..... | 84 |
| 4.4 OBJETIVO DEL ALGORITMO..... | 86 |
| 4.5 ESPACIO DE BÚSQUEDA E INDIVIDUOS..... | 86 |
| 4.6 CODIFICACIÓN..... | 87 |
| 4.6.1 Codificación de las variables | 87 |
| 4.6.2 Sistema binario..... | 88 |
| 4.7 EXPLORACIÓN Y EXPLOTACIÓN..... | 89 |

| | |
|---|-----|
| 4.8 FUNCIÓN DE COSTO (SIN MANEJO DE RESTRICCIONES) | 90 |
| 4.9 FACTOR DE APTITUD | 91 |
| 4.10 PROBABILIDAD DE CRUZA | 91 |
| 4.11 FUNCIONES DE REPRODUCCIÓN Y MUTACIÓN..... | 91 |
| 4.12 CONVERGENCIA..... | 93 |
| CAPÍTULO 5. EJEMPLOS DE APLICACIÓN..... | 94 |
| 5.1 CODIFICACIÓN..... | 94 |
| 5.2 GENERACIÓN DE LA POBLACIÓN INICIAL | 96 |
| 5.3 EVALUACIÓN DE LA APTITUD DE CADA UNO DE LOS INDIVIDUOS DE LA POBLACIÓN..... | 96 |
| 5.4 SELECCIÓN PROPORCIONAL..... | 99 |
| 5.5 CRUZA..... | 101 |
| 5.6 MUTACIÓN | 102 |
| 5.7 EJEMPLOS DE APLICACIÓN | 103 |
| 5.7.1 Red 1..... | 104 |
| 5.7.2 Red 2..... | 109 |
| 5.7.3 Red 3..... | 113 |
| 5.7.4 Red 4..... | 118 |
| 5.8 CASO DE ESTUDIO COCOTILÁN, ESTADO DE MÉXICO | 123 |
| CONCLUSIONES | 128 |
| Bibliografía | 129 |
| Anexo | 130 |

INTRODUCCIÓN

Las redes de distribución de agua potable tiene como objetivo el abastecimiento de agua potable a la sociedad, por lo que se requiere de un diseño optimo en el cual se cumpla la demanda y presión mínima necesaria donde el costo sea mínimo. La confiabilidad de una red de agua potable depende principalmente del diseño aunque existen varios métodos ninguno tiene por objetivo la confiabilidad de su funcionamiento ya que existan un variedad de soluciones.

El problema básico de diseño consiste en tener una serie de nodos, donde se conectan los usuarios a la red, y una serie de tuberías uniendo estos nodos entre si y uniendo la fuente de abastecimiento (embalses, pozos, etc.) a la red. Las restricciones que exige la red son mantener un caudal de demanda mínimo en cada uno de los nodos y una presión mínima por lo general que, por lo general, es la misma para toda la red. Esta presión mínima es necesaria para que llegué aniveles más altos que al nivel del nodo de conexión (los pisos más altos de un edificio, por ejemplo).

Una vez disponible la localización de tubos y nodos, conocida como topología (trazado) de la red, el diseño tiene dos variables básicas: material y diámetros de los tubos de la red. Usualmente, el material se fija en función del costo, disponibilidad, o método constructivo. Resta a determinar la combinación de diámetros de la red que permita cumplir con las restricciones de presión y demanda.

El problema no tiene, sin embargo, una solución única. Hay un número considerable del total posible de combinaciones de diámetros que permiten a la red cumplir con las restricciones impuestas. Es así como el enfoque del problema no es encontrar una solución cualquiera que cumpla las restricciones, sino buscar la solución óptima desde el punto de vista de costo y eficiencia. El problema de diseño se tomó por lo tanto en un problema de optimización.

Los algoritmos genéticos se adaptan adecuadamente al objetivo del diseño optimizado de redes y a los métodos de comprobación de diseño existente, ya que dentro de un gran número de posibles soluciones el algoritmo encuentra el mínimo global en función de costo. los algoritmos toman a cada solución(red) como un individuo el cual debe adaptarse a su entorno, el problema a resolver(condiciones de presión y demanda), dentro de un grupo de individuos solo algunos individuos serán capaces de resolver dicho problema, los cuales serán seleccionados para reproducirse(cruza) de esta manera se obtendrán individuos más capaces para resolver el problema los cuales a su vez serán nuevamente reproducidos, hasta llegar a un número máximo de generaciones o hasta encontrar un individuo cuya eficiencia sea la máxima y en función de costo sea la mínima.

OBJETIVOS

Objetivo general:

Dar solución a la red de abastecimiento de agua potable de la población de COCOTITLÁN, ESTADO DE MÉXICO mediante un programa que, dada la topología, material y coeficientes de pérdidas menores de una red de distribución de agua potable cualquiera y teniendo en cuenta las restricciones de demanda, velocidad y presión mínima en los nodos de la red, encuentre un diseño (combinación de diámetros) que se aproxime a la solución de mínimo costo por medio de un ALGORITMO GENÉTICO.

Objetivos específicos:

- Verificar que también se adaptan los algoritmos genéticos al complejo problema de optimización del costo de una red de distribución de agua potable.
- Estudiar la manera de introducir las restricciones de diseño a la red de agua potable (demandas, velocidades, y presiones mínimas) en un algoritmo genético.
- Relacionar, el algoritmo genético, el costo de un diseño determinado con su probabilidad de reproducirse a la siguiente generación.
- Evaluar la efectividad del programa una vez desarrollado.

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES SOBRE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE Y LOS MODELOS NUMÉRICOS PARA DISEÑARLAS.

1.1 GENERALIDADES SOBRE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

1.1.1 Redes de distribución de agua potable

La red de abastecimiento de agua potable es un sistema de obras de ingeniería, que permiten llevar hasta la vivienda de los habitantes de una ciudad, pueblo o área rural relativamente densa, el agua potable.

1.1.2 Fuentes de abastecimiento

Los sistemas de abastecimiento de agua potable se pueden clasificar por la fuente del agua, del que se obtienen:

- Agua de lluvia almacenada en tanques
- Agua proveniente de manantiales naturales, donde el agua subterránea aflora a la superficie (humedales)
- Agua subterránea, captada a través de pozos o galerías filtrantes
- Agua superficial, proveniente de ríos, arroyos, embalses o lagos naturales (lleva un previo tratamiento)
- Agua de mar (esta debe necesariamente ser desalinizada).

Según el origen del agua, para transformarla en agua potable deberá ser sometida a tratamientos, que van desde la simple desinfección y filtración, hasta la desalinización.

1.1.3 Componentes del sistema de abastecimiento

El sistema de abastecimiento de agua potable más complejo, que es el que utiliza aguas superficiales, consta de cinco partes principales:

- Captación
- Almacenamiento de agua bruta
- Tratamiento
- Almacenamiento de agua tratada
- Red de distribución de agua potable abierta o cerrada

1.1.3.1 Captación

La captación de un manantial debe hacerse con todo cuidado, protegiendo el lugar de afloramiento de posibles contaminaciones, delimitando un área de protección cerrada.

La captación de las agua superficiales se hace a través de las bocatomas, en algunos casos se utilizan galerías filtrantes, paralelas o perpendiculares al curso de agua para captar las aguas que resultan así con un filtrado preliminar.

La captación de las aguas subterráneas se hace a través de pozos o galerías filtrantes.

1.1.3.2 Almacenamiento de agua bruta

El almacenamiento de agua bruta se hace necesario cuando la fuente de agua no tiene un caudal suficiente durante todo el año para suplir la cantidad de agua necesaria. Para almacenar el agua de los ríos o arroyos que no garantizan en todo momento el caudal necesario se construyen embalses.

En los sistemas que utilizan agua subterránea, el acuífero funciona como un verdadero tanque de almacenamiento, la mayoría de las veces con recarga natural, sin embargo hay casos en que la recarga de los acuíferos se hace por medio de obras hidráulicas especiales.

1.1.3.3 Tratamiento

El tratamiento del agua para hacerla potable es la parte más delicada del sistema. El tipo de tratamiento es muy variado en función de la calidad del agua bruta. Una planta de tratamiento de agua potable completa generalmente consta de los siguientes componentes:

- Reja para la retención de material grueso, tanto flotante como de arrastre de fondo;
- Desarenador, para retener el material en suspensión de tamaño fino;
- Floculadores, donde se adicionan químicos que facilitan la decantación de sustancias en suspensión coloidal y materiales muy finos en general;
- Decantadores, o sedimentadores que separan una parte importante del material fino;
- Filtros, que terminan de retirar el material en suspensión;
- Dispositivo de desinfección. (cloración, rayos ultravioleta, ozonización etc.)

En casos especiales, en función de la calidad del agua se deben considerar, para rendir estas aguas potables, tratamientos especiales, como por ejemplo:

- La osmosis inversa.
- Tratamiento a través de intercambio iónico.
- Filtros con carbón activado.

Obviamente estos tratamientos encarecen el agua potable y solo son aplicados cuando no hay otra solución.

1.1.3.4 Almacenamiento de agua tratada

El almacenamiento del agua tratada tiene la función de compensar las variaciones horarias del consumo, y almacenar un volumen estratégico para poder satisfacer la demanda requerida. Existen dos tipos de tanques para agua tratada, tanques apoyados en el suelo y tanques elevados, cada uno dotado de dosificador o hipoclorador para darle el tratamiento y volverla apta para el consumo humano.

1.1.4 Red de distribución

La red de distribución está considerada por todo el sistema de tuberías desde el tanque de distribución hasta aquellas líneas de las cuales parten la toma o conexiones domiciliarias.

- Tanques de almacenamiento
- Estaciones de bombeo.
- Tuberías principales, secundarias y terciarias.
- Válvulas que permitan operar la red, y sectorizar el suministro en casos excepcionales, como son: en casos de rupturas y en casos de emergencias por escasez de agua.
- Dispositivos para macro y micro medición. Se utiliza para ello uno de los diversos tipos de medidores de volumen.
- Tomas domiciliarias.

Las redes de distribución de agua potable en los pueblos y ciudades son generalmente redes que forman anillos cerrados. (Red cerrada) Por el contrario las redes de distribución de agua en las comunidades rurales dispersas son ramificadas (Red abierta o red mixta).

1.1.5 Impacto ambiental de un sistema de abastecimiento de agua potable

Los proyectos de agua potable incluyen los siguientes elementos: la construcción, expansión o rehabilitación de represas y reservorios, pozos y estructuras receptoras, tuberías principales de transmisión y estaciones de bombeo, obras de tratamiento y sistemas de distribución; las provisiones para la operación y mantenimiento de cualquiera de las instalaciones arriba mencionadas; el establecimiento o fortalecimiento de las funciones de colocación de medidores, facturación y colección de pagos; y el fortalecimiento administrativo global de la empresa de agua potable.

Si bien un sistema de abastecimiento de agua potable tiene sin lugar a dudas un impacto sumamente positivo en la salud y el bienestar de muchas personas, la construcción de sus diversos componentes acarrea, potencialmente, algunos problemas que son los mismos que se describen en los siguientes artículos:

Manejo de recursos terrestres e hidráulicos

Represas y reservorios

Tuberías de petróleo y gas.

1.1.6 Información requerida para el planteamiento de la red de distribución de agua potable

El primer paso en el diseño de la red de distribución de agua potable es la definición de su trazado en planta, para lo cual es necesario estudiar las características de la vialidad, de la topografía y de la ubicación de los puntos de alimentación. Específicamente es necesario contar, como mínimo, con la siguiente información:

- Proyecto de urbanismo del sector a dotar con la red de distribución. específicamente, es necesaria la configuración de la vialidad que da acceso a las distintas parcelas y edificaciones, dado que el trazado se realizará principalmente siguiendo dicha configuración. esto con miras a garantizar el libre acceso a la infraestructura para eventuales reparaciones y sustituciones por parte de la empresa operadora del sistema.
- Punto(s) de alimentación de la red. la forma en que será alimentada la red establecerá en gran medida la ruta de sus tuberías principales, por lo tanto es necesario tener en cuenta la ubicación de estanques compensadores existentes así como de tuberías matrices de distribución desde la cual se abastecerá la red a diseñar.
- Planos de construcción o catastro de otros servicios existentes en el urbanismo. eventualmente el trazado de la red de distribución de agua potable a diseñar podrá verse influenciado por la existencia de otras tuberías en las vías de comunicación del sector en estudio.

1.1.7 Red de abastecimiento de agua potable abierta o ramificada

Este tipo de red de distribución se caracteriza por contar con una tubería principal de distribución (la de mayor diámetro) desde la cual parten ramales que terminarán en puntos ciegos, es decir sin interconexiones con otras tuberías en la misma red de distribución de agua potable.

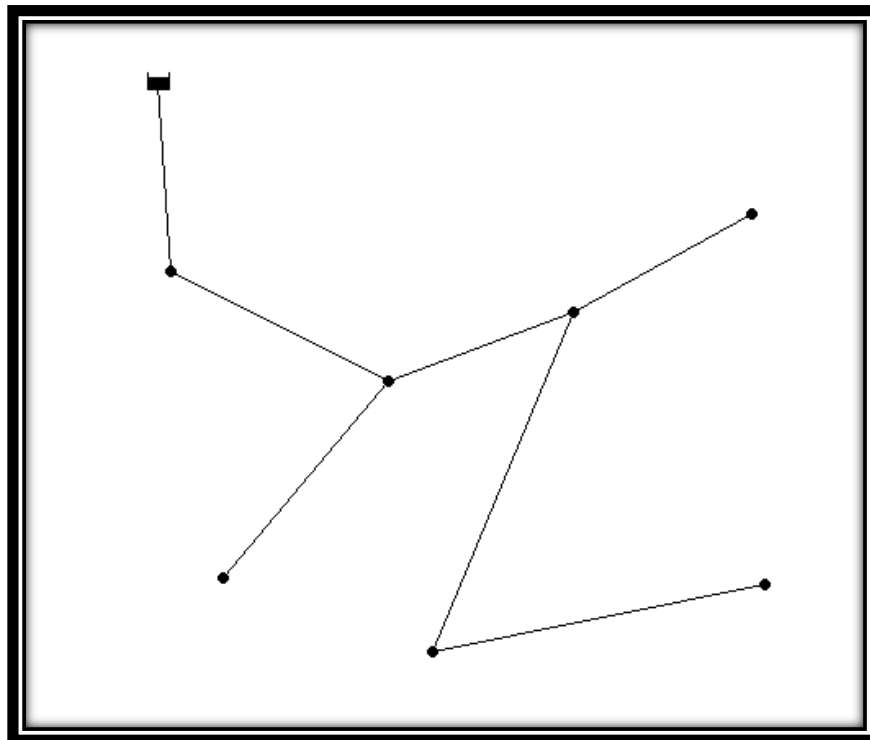


Figura 1. Diagrama de un modelo hidráulico de red abierta

Como vemos en la Figura 1. anterior el uso de redes ramificadas se sucede en desarrollos cuyo crecimiento se ha establecido a partir de una vialidad principal y en la que convergen una serie de calles ciegas, dado que las características topográficas impiden la interconexión entre los ramales para conformar circuitos cerrados.

1.1.7.1 Red de distribución de agua potable cerrada o de malla

En este tipo de red, se logra la conformación de mallas o circuitos a través de la interconexión entre los ramales de la red de distribución de agua potable.

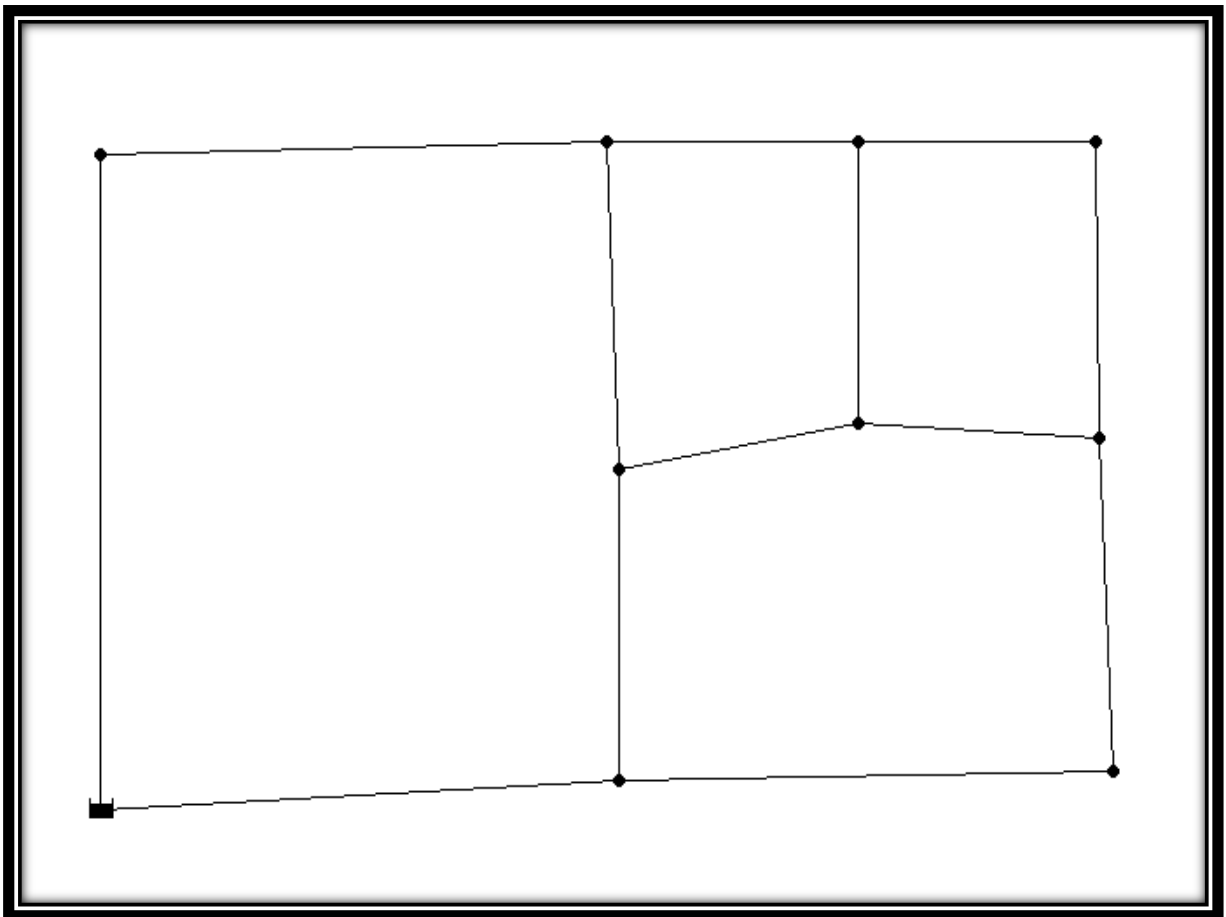


Figura 1.1 Diagrama de un modelo hidráulico de red cerrada

1.1.7.2 Ventajas y desventajas de cada tipo de red

Ante la posibilidad de tener que escoger entre una red de distribución de agua potable del tipo abierta o una del tipo cerrada (Figura 1.1), es conveniente tener en cuenta aspectos como los que referimos a continuación:

- La principal desventaja de las redes del tipo abierto es que, ante la falla o rotura de alguna de las tuberías que la conforman, se tendrá que afectar (dejar sin servicio) a todos los usuarios que estén atendidos desde las tuberías aguas abajo de la rotura, mientras se realiza la reparación necesaria. (Figura 1.2)

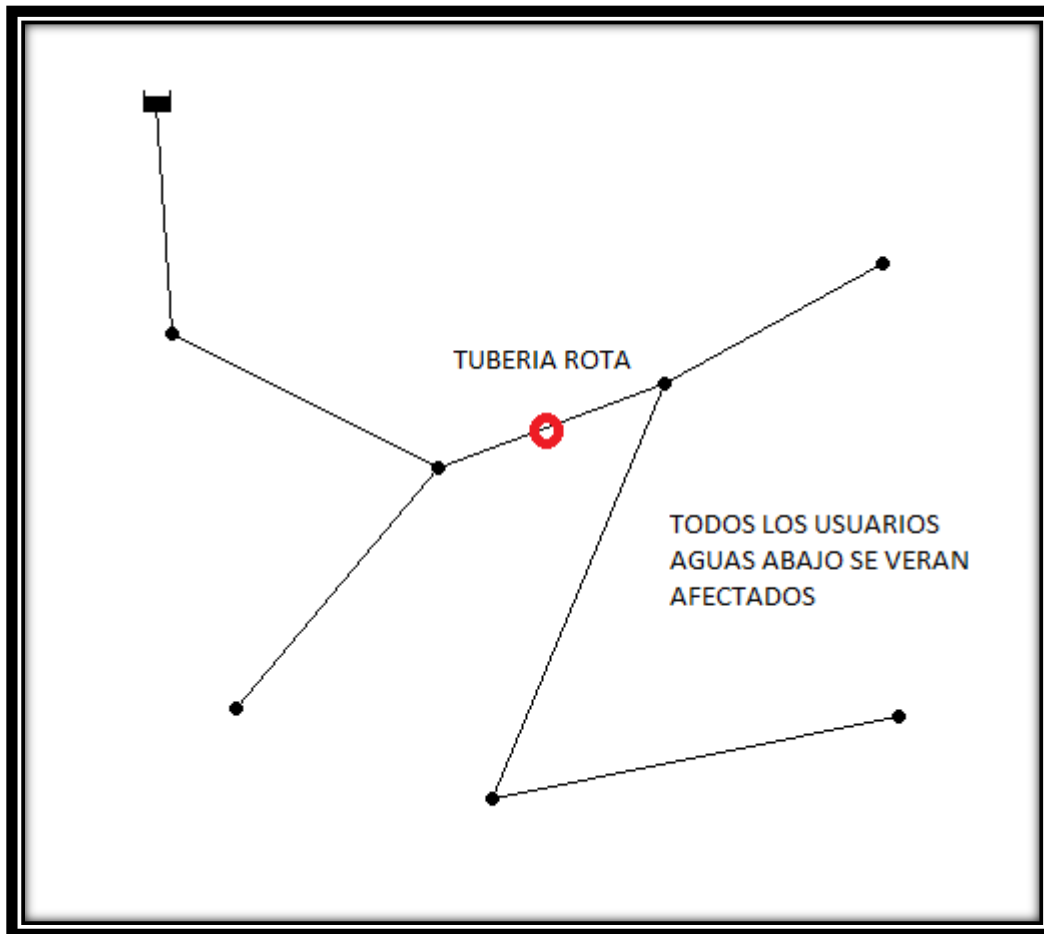


Figura 1.2 Rotura en una red abierta

- Por otro lado, la ventaja principal de las redes cerradas es que este tipo de configuración es el más conveniente desde el punto de vista de eficiencia y de garantía del servicio. es decir, ante la posible rotura de alguna de sus tuberías, se logrará afectar a menor cantidad de usuarios, al establecerse rutas alternas al flujo a través de las mallas que conforman a la red como se muestra en al siguiente Figura 1.3.

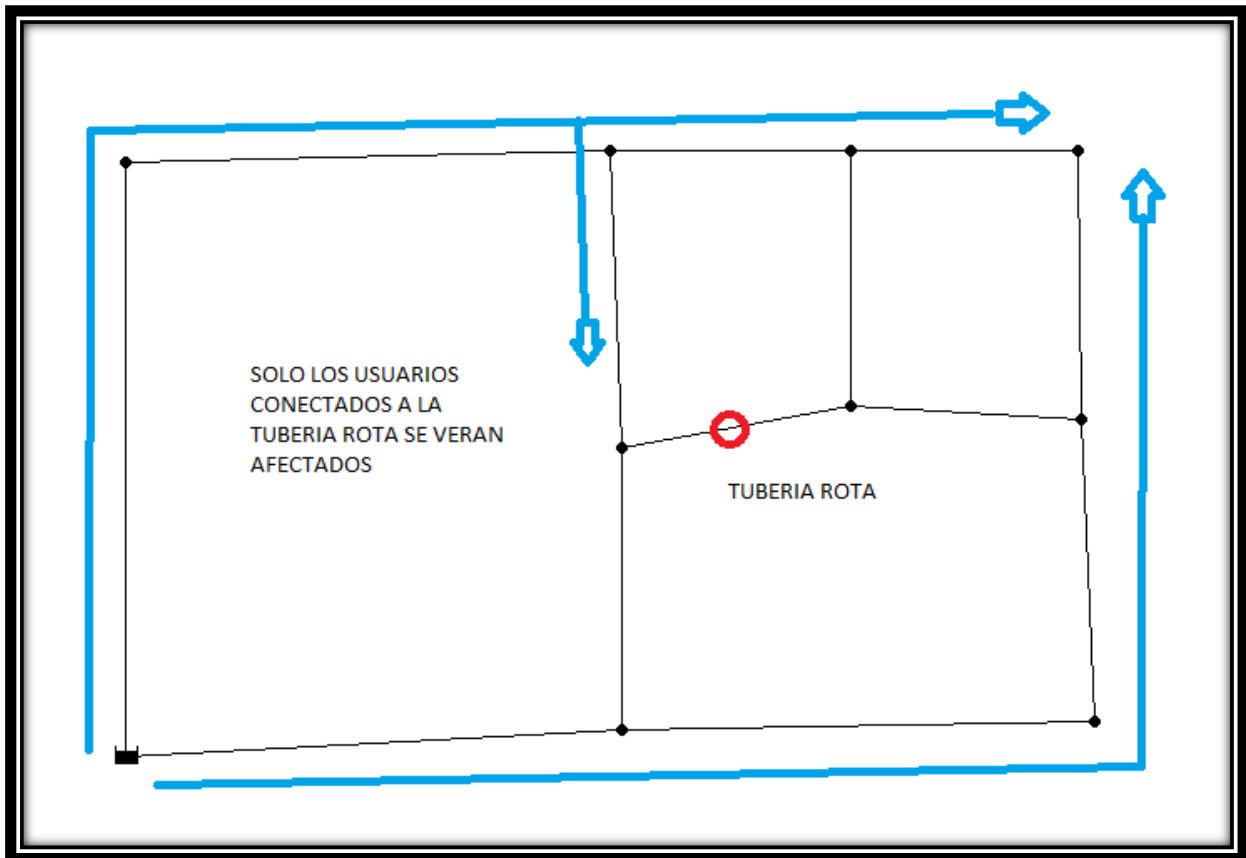


Figura 1.3 Rotura en una red cerrada

- En cuanto a cálculo, una pequeña ventaja que tiene la red de distribución de agua potable del tipo abierta, es que su resolución es directa, limitándose al cálculo de las pérdidas en cada tubería, para los caudales en tránsito, para obtener posteriormente los valores de piezométrica y presión en cada nodo de ella. en el caso de las redes cerradas, es necesario realizar el balance de los caudales en tránsito en las tuberías, dada la relativa complejidad en la forma en que se realiza la distribución, razón por la cual es necesario recurrir a métodos iterativos como el método de Cross, para su resolución.

En realidad, con el estado actual de la tecnología y el desarrollo de programas como EPANET, el cálculo de cualquier tipo de red es en realidad sencillo pero, ciertamente, si hablamos del cálculo manual, la realización de métodos iterativos representa ciertos inconvenientes.

Finalmente hay que destacar que con frecuencia es conveniente, y de permitirlo las características del urbanismo, la colocación en la red de tuberías que no alimentarán de manera directa parcela alguna, de forma tal de “forzar” a que se establezcan alternativas de flujo en caso de falla de algunos de los ramales de la red (conformación de mallas).

Por esta razón, en la mayoría de los desarrollos urbanos, la selección será por la conformación de una red de distribución de agua potable del tipo cerrada, pese a que pueda representar la colocación de mayor cantidad de tuberías, con el correspondiente incremento de costos. En estos casos predomina el criterio operativo o de confiabilidad sobre el económico.

1.2 MODELACIÓN MATEMÁTICA APLICADA A REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

1.2.1 Ecuaciones fundamentales

Ecuación de la energía

La ecuación fundamental para establecer el comportamiento de un sistema de abastecimiento de agua para flujo permanente (constante en el tiempo) es la ecuación de la energía. Se trata de la relación que se establece en términos de la energía específica del fluido. Dicha energía específica se representa como energía por unidad de peso en metros de columna del fluido que se está analizando. Así, en ausencia de aportes de energía, el fluido se desplaza desde posiciones con mayor energía específica hacia posiciones con menor nivel de energía.

Admitiendo que el fluido es incompresible, la energía específica puede expresarse como:

$$H_T = Z + \frac{P}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} \quad (1.1)$$

donde

z la cota geométrica del elemento fluido y representa la energía potencial que posee él mismo por el hecho de tener una cierta elevación sobre el nivel de referencia establecido. Se le denomina carga de posición.

$P/\rho g$ denominada altura o carga de presión del fluido. Se trata de la representación de la energía en forma elástica que posee el fluido, por el hecho de estar confinado a una determinada presión. Habitualmente se considera el valor de la presión manométrica, adoptando como referencia de presión nula, la presión atmosférica. La suma correspondiente a la cota geométrica y a la altura de presión es lo que se denomina la altura piezométrica H ; es decir: $H = z + P / \rho g$

$v^2/2g$ energía cinética o carga de velocidad, correspondiente a la energía cinética específica del fluido en movimiento. El término de altura cinética suele ser pequeño, por lo que la altura piezométrica podría representar la totalidad de la energía disponible en el fluido ρ densidad del agua: 101.93 kg/m³

g aceleración de la gravedad, 9.81 m/s²

La ecuación de la energía establece la relación entre la energía disponible entre dos puntos de una misma línea de corriente. No obstante, puede generalizarse dicha afirmación, para los casos más frecuentes en redes de abastecimiento, a fin de hacerla extensiva a dos secciones cualesquiera 1 y 2 de una conducción, Figura 1.8. La ecuación de la energía se escribe entonces:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_{1-2} \quad (1.2)$$

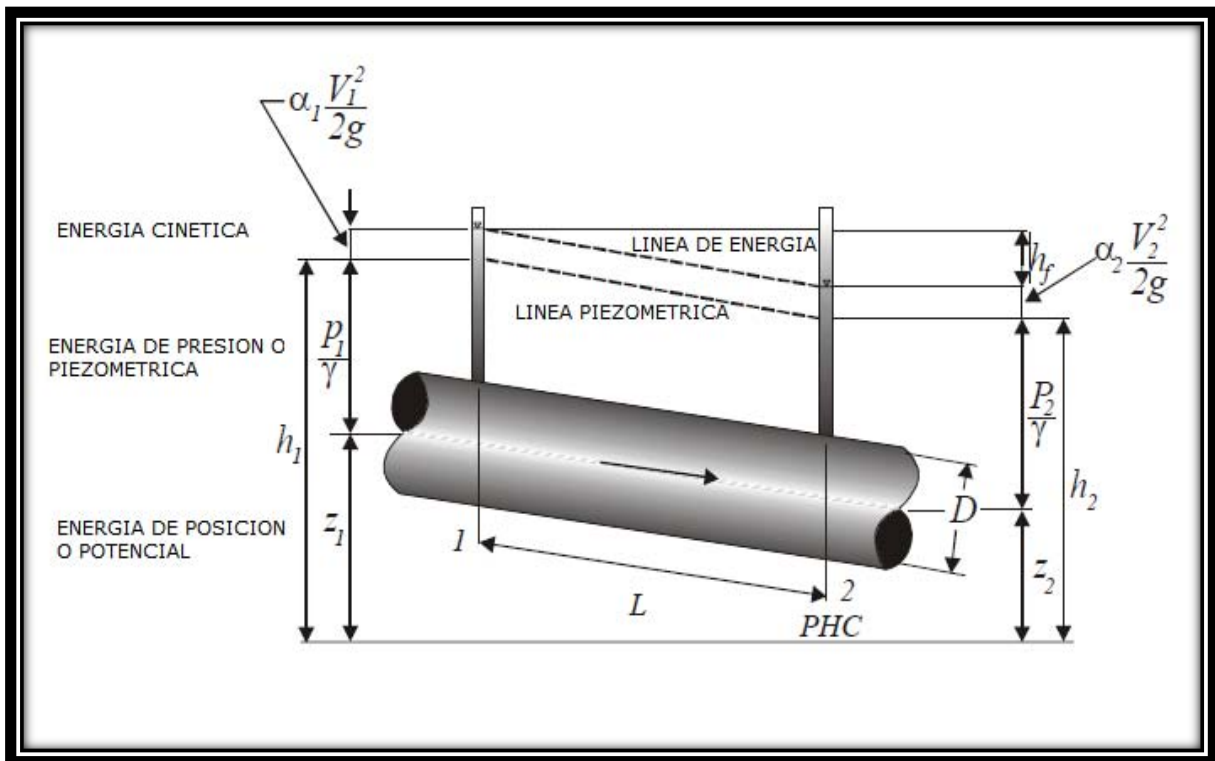


Figura 1.4 Planteamiento de la ecuación de la energía entre dos secciones de tubería.

donde h_{1-2} toma un valor positivo cuando representa una pérdida (si el fluido se desplaza desde el punto 1 al 2), y un valor negativo cuando resulta un aporte de energía.

Cuando el término h_{1-2} de la ecuación 1.2 se refiere a pérdidas de energía, éstas pueden ser de dos tipos:

1. Pérdidas de carga continuas o pérdidas de fricción (h_f). Representan las pérdidas derivadas del rozamiento viscoso de las diferentes capas del fluido entre sí y sobre todo por la fricción entre el fluido y la pared interior del conducto.
2. Pérdidas localizadas (h_m). Se trata de las pérdidas que se originan en discontinuidades localizadas en la conducción tales como estrechamientos, cambios

de dirección, válvulas, etc., ellas se presentan en un tramo de las tuberías donde se ubique la discontinuidad. En general el calificativo de “pérdidas menores” representa el hecho habitual de que en redes de distribución el valor de las pérdidas localizadas son claramente inferiores a las pérdidas de carga continuas.

Teniendo en cuenta los dos tipos de pérdidas definidos, la ecuación de la energía puede escribirse como:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_{f1-2} + h_{fm1-2} \quad (1.3)$$

Asimismo, si se tiene en cuenta la energía aportada por la bomba, representada mediante la altura manométrica H_{bomba} , la ecuación de la energía se escribe:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + H_{bomba} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_{f1-2} + h_{fm1-2} \quad (1.4)$$

1.3 PÉRDIDAS DE ENERGÍA

1.3.1 Pérdidas de carga por fricción

En flujo permanente, la pérdida de carga por fricción en una conducción está relacionada con varios parámetros:

- Geométricos: la pérdida de carga aumenta con la rugosidad de la tubería, ϵ , y disminuye con el aumento del diámetro interior de la misma, D . Lógicamente, si se habla de pérdidas de carga por fricción, éstas serán proporcionales a la longitud total de la conducción, L .
- Cinemáticos: a mayor velocidad de circulación del fluido, v , mayor será la pérdida de carga del sistema.
- Propiedades del fluido: la pérdida de carga también aumentará al hacerlo la viscosidad del fluido, ν .

Existen diferentes expresiones alternativas para representar la pérdida de carga por fricción. Las más empleadas son las siguientes:

1.3.1.2 Ecuación de Darcy-Weisbach

Ecuación de Darcy-Weisbach, propuesta inicialmente por Weisbach en 1845, y posteriormente por Darcy en 1875.

$$hf = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (1.5)$$

donde

| | |
|---|--|
| f | factor de fricción, adimensional |
| L | longitud de la tubería, m |
| V | velocidad del flujo en la tubería, m/s |
| D | diámetro de la tubería, m |
| g | aceleración de la gravedad, m/s ² |

1.3.1.3 Ecuación de Hazen-Williams

La fórmula de Hazen-Williams, fechada en 1903, cuya expresión en unidades métricas está dada por:

$$h = \frac{10.86}{C_H^{1.85}} \frac{Q^{1.85}}{D^{4.85}} L \quad (1.6)$$

| | |
|----|---|
| CH | coeficiente de Hazen-Williams, adimensional |
| Q | gasto que circula por la tubería, m ³ /s |
| D | diámetro de la tubería, m |
| L | longitud de la tubería, m |

1.3.1.3 Ecuación de Manning

La expresión de Manning Strickler Gaukler, más comúnmente conocida como fórmula de Manning (1890).

$$hf = 10.29n^2 \frac{Q^2}{D^{16/3}} L \quad (1.7)$$

| | |
|---|---|
| n | factor de rugosidad de Manning |
| Q | gasto que circula por la tubería, m ³ /s |
| D | diámetro de la tubería, m |
| L | longitud de la tubería, m |

De las expresiones anteriores, sin ninguna duda la más empleada en los análisis de tuberías es la de Darcy, a pesar de que en su manejo incluye determinar el valor del factor de fricción f que es función de dos parámetros adimensionales:

- **El número de Reynolds**, que expresa la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas. Matemáticamente se expresa como la relación entre la velocidad del fluido, el diámetro y la viscosidad cinemática (1.1X10⁻⁶ m²/s para agua a 20° C).

$$Re = \frac{vD}{u} \quad (1.8)$$

- **La rugosidad relativa**, relación entre la rugosidad del material y el diámetro del conducto: $\varepsilon_r = \varepsilon/D$.

Tradicionalmente, se ha calculado el factor de fricción mediante la ecuación de Colebrook y White, ecuación que dibujada, da como resultado el diagrama de Moody, Figura 1.5.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log \left(\frac{\varepsilon_r}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (1.9)$$

Esta ecuación se considera la más completa y exacta de todas las que existen para obtener el factor de fricción f . Sin embargo, la expresión tiene la desventaja de requerir un cálculo iterativo para determinar el valor de f , ya que ésta se encuentra de manera implícita en la ecuación. No obstante, existen fórmulas alternativas con las cuales puede obtenerse el factor de fricción de forma explícita, sin necesidad de iteraciones; la más popular de ellas es la de Swamee y Jain (1976),

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon_r}{3.7D} + \frac{2.51}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (1.10)$$

Válida para $10^{-6} < \varepsilon_r < 10^{-2}$ y $10^3 < Re < 10^8$, con un error relativo de $\pm 1\%$.

1.4 MODELOS DE ANÁLISIS

1.4.1 Tipos de modelos

Una de las características fundamentales de los modelos de análisis de redes hidráulicas a presión es la presencia de la variable temporal. Así, el objetivo de un modelo no es únicamente obtener los valores de las variables significativas (como las presiones en los nodos y los gastos en las tuberías) sino que se busca la obtención de la variación a lo largo del tiempo de éstas. De tal manera que, teniendo en cuenta la presencia o no de la variable temporal, los modelos de análisis se pueden clasificar en:

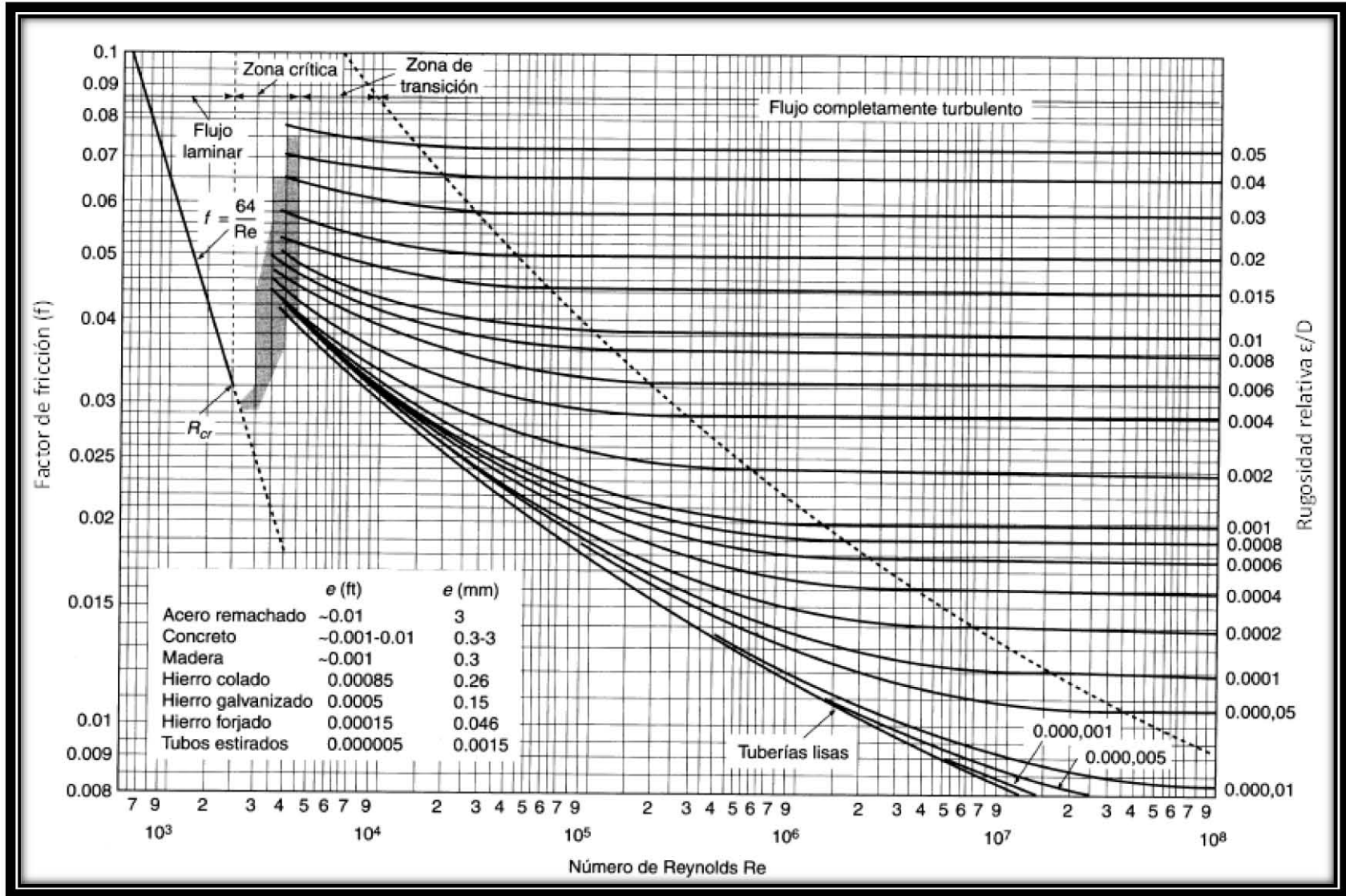
- Modelos de análisis estático: son modelos de análisis en régimen permanente y buscan la determinación de los valores de las variables del sistema para una situación dada, sin tener en cuenta las posibles variaciones temporales que pueden sufrir los parámetros del mismo (consumos, niveles en los tanques de almacenamiento, etc.).
- Modelos de análisis dinámico: también denominados modelos de análisis en régimen transitorio. Son modelos en los que interviene la variación temporal de los

parámetros del sistema que, lógicamente, induce también la variación temporal de las variables de la red.

- Modelos no inerciales
- Modelos inerciales que, a su vez, pueden clasificarse en rígidos y elásticos.

Los modelos antes mencionados se describirán a con más detalle en el siguiente capítulo.

Figura 1.5 Diagrama de Moody



CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE DEL DISEÑO

2.1 ANTECEDENTES

El uso de modelos matemáticos para el análisis de sistemas de distribución de agua potable fue propuesto por vez primera en 1936 [Cross, 1936]. Desde entonces los métodos de solución empleados en los modelos han evolucionado desde el análisis inicial del caudal en redes desarrollado por Hardy Cross, realizado a mano, al desarrollo y extensión de modelos de redes hidráulicos para computadoras en las décadas de los setenta y ochentas, y la aparición de los modelos de calidad del agua en redes de distribución a finales de la década de los ochentas (Figura 2.1).

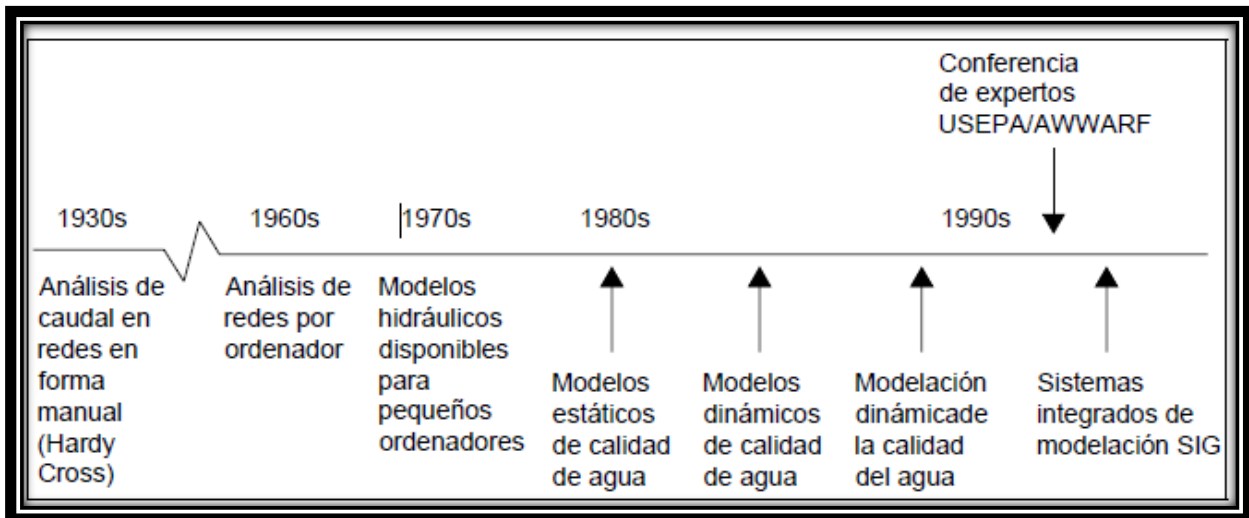


Figura 2.1 Desarrollo histórico de los modelos de simulación matemática aplicados a redes de distribución de agua potable.

Los modelos de simulación actualmente son sistemas completos de fácil manejo permitiendo a usuarios de diferentes niveles, analizar y mostrar los parámetros hidráulicos y de calidad del agua dentro de un sistema de distribución de agua potable.

2.2 TIPOS DE MODELOS

Tomando en cuenta el desarrollo en los últimos años que han experimentado los modelos de simulación, es posible realizar una clasificación de acuerdo al objetivo o criterios que se establezcan.

2.2.1 Aplicabilidad

De acuerdo al grado de aplicación, los modelos se pueden clasificar como de planificación, operacionales y de diseño.

2.2.1.1 Modelos de planificación

Estos modelos se utilizan para evaluar el rendimiento, los impactos económicos o cuantitativos de sistemas propuestos de tuberías, cambios en procedimientos operativos, comportamiento de distintos elementos, como válvulas de control, tanques, etc.

2.2.1.2 Modelos operacionales

Se emplean para predecir el comportamiento hidráulico de variables como la presión y caudales en la red, modificar niveles en tanques de regulación. El objetivo es tener un mejor soporte en la toma de decisiones.

2.2.2 Grado de detalle

En nuestro país este resulta un aspecto de importancia, esto se debe porque en ocasiones se realizan trabajos que no requieren de un nivel de detalle amplio, como en decisiones de planeación.

2.2.2.1 Modelos estratégicos o arteriales

Estos modelos sólo incorporan elementos primordiales como: tuberías primarias y tanques de almacenamiento y regularización. Se emplean como se mencionó con anterioridad como instrumento de planeación y diseño, como puede ser la ampliación de la red de distribución por la incorporación de nuevas colonias.

2.2.2.2 Modelos detallados

Normalmente para cubrir las necesidades de regulación y control de los sistemas de distribución se requiere de un modelo estratégico, sin embargo en ocasiones se necesita de un nivel de detalle mayor. Este tipo de modelos llegan a incluir las tuberías secundarias y en ocasiones hasta las tomas domiciliarias.

2.2.3 Variación en el tiempo

El tiempo es una variable fundamental en la modelación de redes de agua potable. Existen dos tipos de modelación: estáticos y dinámicos.

2.2.3.1 Estáticos o de flujo permanente

En este tipo de modelos se supone que los caudales demandados e inyectados permanecen constantes, no existen variaciones en la operación en la red, y el nivel en los tanques es fijo. Es cierto que las redes de distribución de agua potable no permanecen invariables a lo largo del tiempo, no obstante esta clase de modelos se emplean frecuentemente para analizar el comportamiento de la red con los caudales máximos horarios, y así someterlas a las condiciones más desfavorables. También son empleados como base o condición inicial para otro tipo de modelos de mayor grado de complejidad como son: cuasi-estáticos o de periodos extendidos.

De forma general, un programa o software comercial sobre modelación hidráulica en redes de distribución pide al menos los datos siguientes (Figura 2.2):

- Tuberías (tramos de la red): diámetro, longitud, coeficientes de pérdidas de carga por fricción.
- Válvulas (abiertas, cerradas o semicerradas y en qué grado).
- Conexiones entre las tuberías (topología de la red).
- Nodos: elevación, demanda de agua
- Tanques: nivel de agua (se considera constante en un análisis de flujo permanente)
- Bombas: curvas gasto-carga, nivel de succión, pérdidas de cargas menores.

Con base en estos datos se forma un sistema de ecuaciones no lineales de balance de gastos en los nodos, que tiene como incógnitas las cargas en los mismos. El problema se soluciona iterativamente por el método de Newton-Raphson. En cada iteración se soluciona un sistema de ecuaciones lineales usando técnicas de matrices porosas [George y Liu, 1981]. Posteriormente se calculan los gastos en los tramos.

El programa da una serie de resultados como son: caudal y con ello velocidad en los tramos de tuberías, presión en los nodos, pérdidas de carga, sentido del flujo, nivel en los tanques, mapas de isolíneas de presión, curvas de balance de caudales producido vs consumido (ver EPANET®), comportamiento de la demanda, de los que, en el modelo de calidad del agua, se utilizan los siguientes: los gastos en los tramos y su sentido, así como la velocidad.

El IMTA, ha desarrollado los programas de cómputo Análisis hidráulico, AH, y SCADRED® [Tzatchkov e Izurieta, 1996], para el cálculo hidráulico en redes en condiciones permanentes y no permanentes. También existen en el mercado otros modelos como el EPANET®, WaterCAD®, H2ONET®, entre otros.

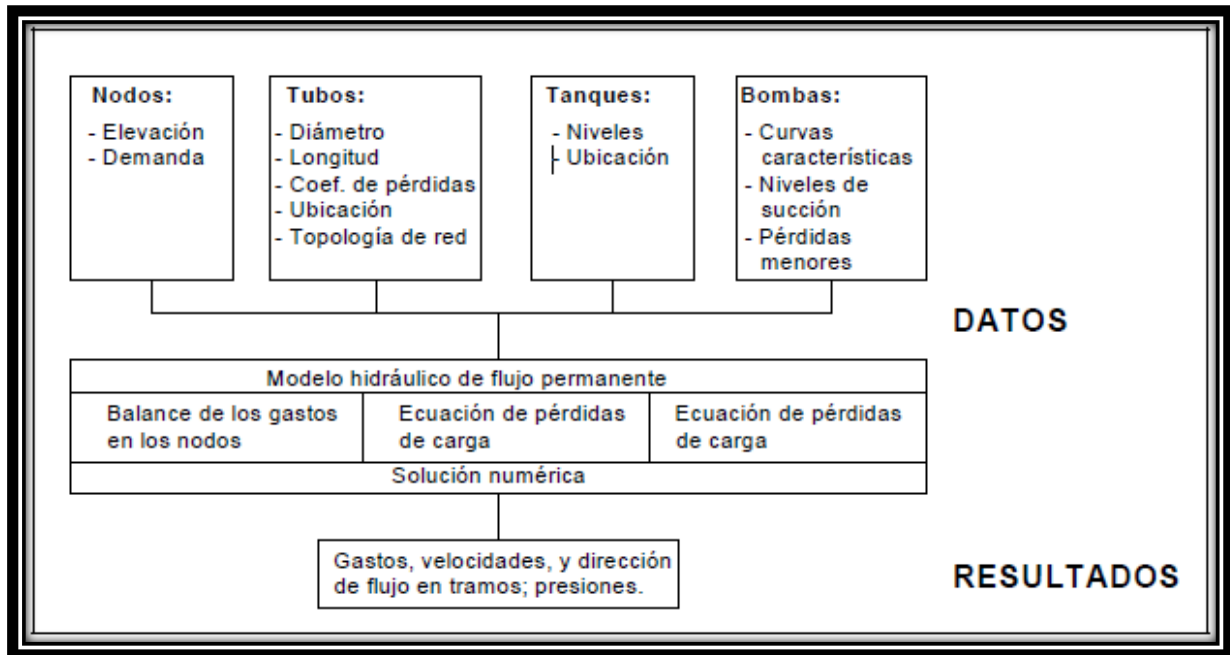


Figura 2.2 Diagrama de un modelo hidráulico de flujo permanente

2.2.3.2 Dinámicos o flujo no permanente

A diferencia de los modelos estáticos, en los modelos de tipo dinámico, se permite la variación temporal de caudales demandados e inyectados, condiciones operativas de la red y de los niveles en los tanques. Esto es considerado bajo ciertas restricciones, simular la evolución temporal de la red, en un intervalo determinado. A su vez dentro de estos modelos existe una clasificación: inerciales y no inerciales.

2.2.3.3 Inerciales

Consideran la inercia del fluido en su movimiento, es decir, la energía que consumen o devuelven los cambios de velocidad. A su vez estos modelos se subdividen en elásticos y rígidos, dependiendo de la inclusión o exclusión de la elasticidad del fluido y de la tubería.

Tienen aplicación en simulaciones que involucran cambios bruscos de velocidad en el sistema, derivados de maniobras repentinas, roturas de tuberías, entre otras.

Cuando la rapidez de estos “cambios” es muy grande, deberán considerarse los efectos elásticos en las tuberías y en el agua, como los modelos elásticos o golpe de ariete, sin embargo si los “cambios” son no tan rápidos, será suficiente incluir y considerar la inercia del fluido que se traduce en tubería indeformable y el agua incompresible como lo es un modelo rígido.

2.2.3.4 No inerciales

Simulan una serie de estados permanentes sucesivos, bajo ciertas condiciones de frontera variables en el tiempo, de hecho éstas le dan el carácter dinámico al modelo.

Este modelo es conocido como cuasi-dinámico, y uso es ampliamente referenciado como simulación en período extendido, (EPS, por sus siglas en inglés, extended period simulation). Se emplean cuando las variaciones de la velocidad del fluido en el interior de las tuberías son muy lentas, y se desprecia la energía que el fluido invierte o recupera al acelerar o desacelerar. Básicamente se aplica para simular la evolución temporal de una red de abastecimiento en condiciones normales de funcionamiento, donde los cambios, por ejemplo en la variación de los consumos en los nodos se presentan de manera gradual. De forma general, el modelo EPS se basa en soluciones consecutivas de flujo permanente para cada hora del día u otro intervalo con la demanda correspondiente y el balance del volumen de agua en los tanques.

Además de los datos iniciales que solicita el modelo de flujo permanente, un programa o software comercial de modelación de flujo cuasi-dinámico, requiere de los siguientes datos (Figura 2.3):

- Dimensiones de los tanques
- Variación de la demanda dentro de las 24 horas del día.

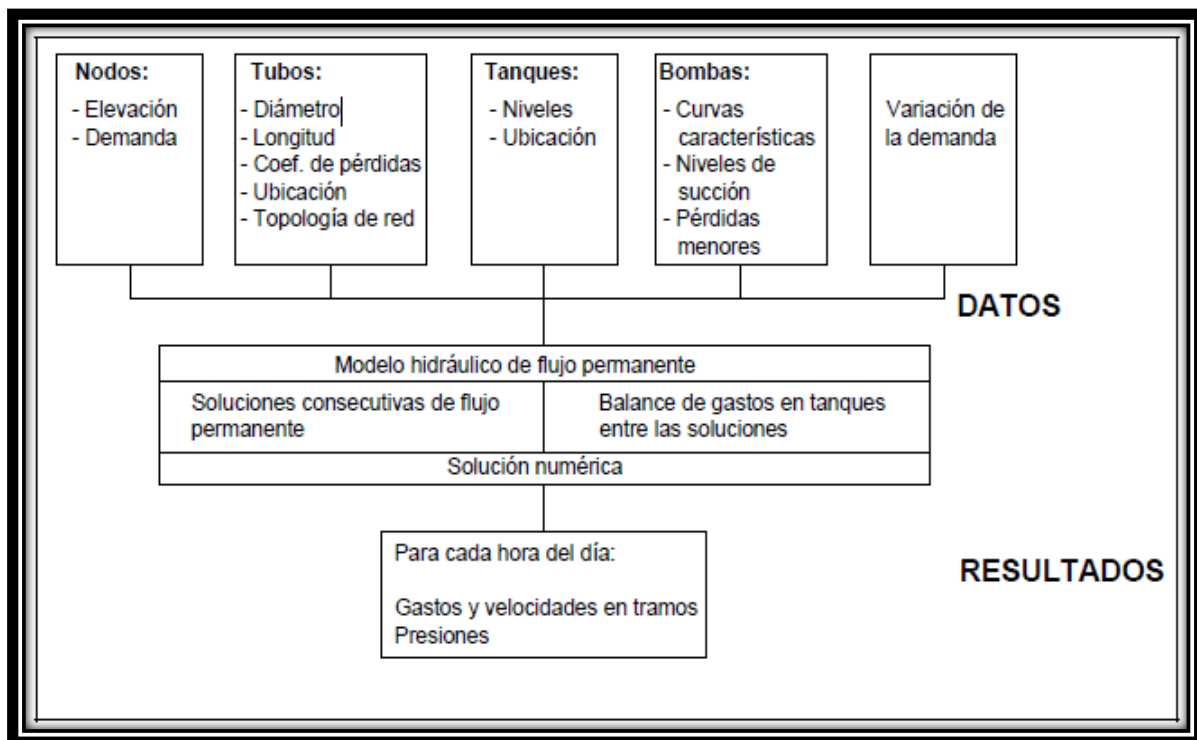


Figura 2.3 Diagrama de un modelo hidráulico de flujo no permanente.

El programa da una serie de resultados de los cuales el modelo de calidad del agua, empleará: los gastos en los tramos y su sentido así como la velocidad. Estos resultados cambian con el tiempo y se presentan para cada intervalo considerado en el análisis. Normalmente los análisis se efectúan para cada hora del día.

2.2.4 Variables del sistema

De acuerdo con el objetivo y las variables de interés se clasifican en: hidráulicos y calidad del agua.

2.2.4.1 Hidráulicos

Estos determinan los caudales y presiones dentro de la red de distribución de agua, bajo condiciones iniciales y de frontera establecidas.

2.2.4.2 Calidad del agua

Los modelos de calidad del agua determinan la variación temporal y espacial de un determinado parámetro físico-químico de calidad del agua, como la concentración de sustancias contaminantes o bien desinfectantes. Aún cuando se conocen como “modelos de calidad del agua”, la aplicación se ha reducido en gran parte a la modelación del cloro residual y flúor.

Es importante mencionar que esta clase de modelos requiere de variables hidráulicas como la velocidad, calculadas previamente con la ayuda de un modelo hidráulico.

2.3 MODELOS HIDRÁULICOS

2.3.1 Etapas en la elaboración de un modelo hidráulico

Las fases de un modelo hidráulico por implementar son las siguientes:

- Determinar el tipo de cuestiones que el modelo ayudará a resolver/responder;
- Representar los componentes de la red de distribución “real”, en términos adecuados para su utilización por el modelo implementado;
- Recopilación de información para caracterizar los componentes incluidos en el modelo;
- Esqueletización de la red, esto es la simplificación de la red de tuberías, según el uso y la información disponible;
- Análisis y asignación de consumos registrados. Se trata de incorporar dentro del modelo, las demandas en los puntos de consumo para cada período de tiempo analizado.

Atendiendo a las etapas anteriores, se dispone de un modelo hidráulico sin validar de la red de distribución. Las siguientes etapas se dedican a la corrección y ajuste de los parámetros de la red, en otras palabras la fase de calibración del modelo. En la calibración del modelo se siguen de manera general los siguientes pasos:

- Mediciones de presión y caudal, las cuales se realizan en algunos puntos de la red, para diferentes estados de carga;
- Ajuste del modelo. Se reproducen con el modelo los estados de carga de las mediciones. Se comparan los valores de presión y caudal medidos en la red con los

obtenidos por el modelo de simulación hidráulico, y se ajustan los diferentes parámetros como el coeficiente de rugosidad de las tuberías, y la demanda;

- Resultados y conclusiones.

Al final del proceso se obtiene un modelo hidráulico calibrado, que permitirá realizar simulaciones con cualquier estado de demanda en la red.

Es importante mencionar que las redes de distribución sufren de constantes cambios, por esta razón el modelo hidráulico calibrado, deberá ser actualizado y recalibrado de forma periódica.

2.3.1.1 Recopilación de información

La obtención de información confiable y precisa de los elementos que componen el sistema de distribución por simular es parte fundamental en la construcción de un modelo hidráulico.

- Los elementos que componen un sistema de distribución son:
 - Nodos
 - Tuberías
 - Válvulas
 - Bombas
 - Depósitos o tanques de almacenamiento y regularización
 - Pozos
 - Plantas potabilizadoras
 - Todos los elementos que sirvan para reproducir el comportamiento hidráulico de la red.

En esta fase de recopilación se revisarán y actualizarán las fuentes de información sobre la red de distribución analizada. Este trabajo requiere de una importante colaboración del personal del organismo operador. Este último apoyo se debe a que la gente del organismo operador trabaja diario en la red que se incluirá en el modelo.

2.3.1.2 Topología de la red

La topología de la red (Figura 2.4) se expresa por la forma en que están conectados los diferentes elementos que la componen. Toda esta información se obtiene a partir de los planos de la red otorgados por el organismo operador local. Las uniones entre las tuberías se llaman nodos. Estos podrán representar diferentes elementos como: tanques, bombas, uniones entre tuberías, cambios de dirección, válvulas, pozos, etcétera.

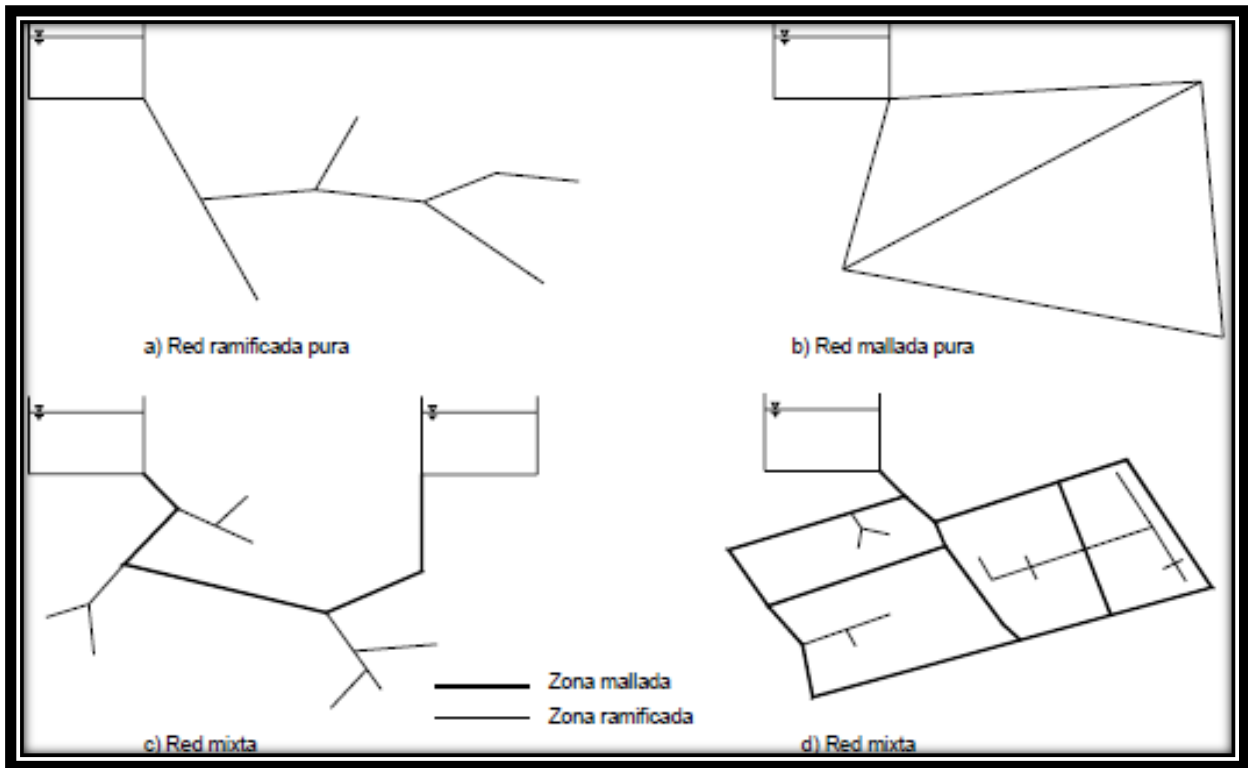


Figura 2.4 Tipos de red de acuerdo con su topología

En condiciones de simulación hidráulica en estado permanente, los nodos generalmente requieren de dos datos: cota de terreno y demanda (si es el caso).

Para las simulaciones en períodos extendidos, se requiere de la curva de la variación de la demanda.

2.3.1.3 Tuberías

Es importante conocer de las tuberías sus características geométricas tales como:

- Nodo inicial y final
- Diámetro
- Longitud
- Coeficiente de rugosidad
- Conectividad o topología
- Pérdidas de carga por cortante y localizadas
- Material
- Edad de la misma
- Estado de conservación.

De forma similar que para el caso de la topología, la obtención de esta información de forma preliminar se realiza a partir de los planos de la red existentes. Sin embargo, es

conocido también que las redes de distribución de agua sufren cambios continuos, como reparaciones o trabajos de mantenimiento, por esta razón, se deberá acudir al departamento de operación y mantenimiento para localizar y conocer la información respectiva.

Con respecto al diámetro de las tuberías, deberá considerarse que la información histórica disponible sólo refleja el tamaño de la tubería en el momento de su instalación; sin embargo con el paso de tiempo, puede haberse reducido como consecuencia de incrustaciones. El efecto de esta reducción en el cálculo de caudales y pérdidas de carga normalmente es agrupado junto con las modificaciones realizadas al coeficiente de rugosidad de la tubería durante el proceso de la calibración del modelo hidráulico de simulación.

Es importante mencionar que aunque esto funciona bastante bien para la modelación hidráulica, el uso de un diámetro incorrecto de tubería puede ocasionar dificultades cuando se modela la calidad del agua, esto se debe a que dentro de este tipo de simulación se calculan los tiempos de viaje del agua a través de las tuberías, que está en función del diámetro.

2.3.1.4 Bombas y/o estaciones de bombeo

Para esto será necesario conocer en cada uno de los equipo de bombeo existente lo siguiente:

- Ubicación dentro de la red de distribución
- Potencia
- Curva característica (carga – caudal)(Figura 2.5)
- Rendimiento
- Horas de funcionamiento
- Modo de operación (arranque/paro)
- Pérdidas de carga en la estación de bombeo
- Caudal correspondiente a las pérdidas de carga
- Elevación del nivel del agua en la toma
- En algunos programas es necesario colocar dos nodos (inicial y final) para representar la estación de bombeo. El nodo inicial será el “reservorio” o el lugar el cual se extraerá el agua, y el nodo final representa la bomba.

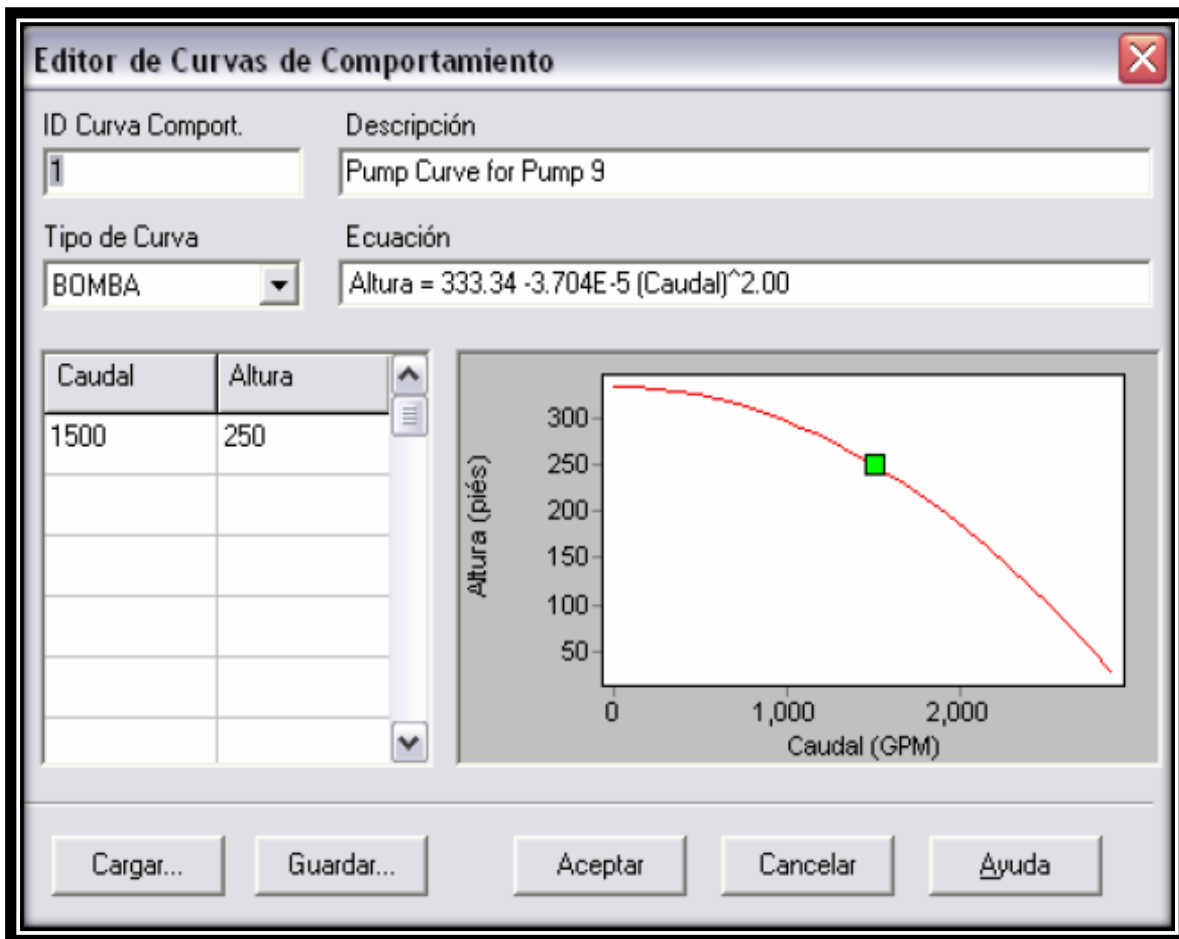


Figura 2.5 Curva característica o de comportamiento incluido dentro del programa EPANET®.

Debido a que el rendimiento de la bomba puede variar con el tiempo, deberán realizarse ensayos de forma periódica para evaluar el funcionamiento real de la misma.

Cuando no se conoce la curva característica de la bomba, un método empleado para representarla consiste en asumir una potencia constante. Sin embargo, en casos cuando se realizan simulaciones de periodos extendidos se deberá tomar con cierta cautela, porque las combinaciones resultantes de altura-caudal pueden en ocasiones no corresponder a la realidad. Cabe señalar que este punto no es posible llevarla en todos los modelos, como el SCADRED®.

Generalmente este tipo de información requerida por el modelo, se obtiene por la experiencia del personal encargado de operación, además de éstos normalmente poseen los manuales o la información sobre las características de los equipos instalados en la red de distribución.

Para aquellos casos donde no se tiene información alguna sobre las bombas, de forma inicial y aproximada se puede realizar lo siguiente:

- Representar la bomba como un caudal de inyección asignado a un nodo (signo negativo)
- Representar la bomba como tanque (carga hidráulica conocida)

El primer caso es cuando se tiene algún conocimiento sobre el caudal que inyecta la bomba hacia la red. Esto puede ser precisado con mediciones de caudal en la tubería que sale (efluente) del equipo de bombeo.

El segundo caso recordar que en la colocación de un tanque dentro de un modelo de simulación es necesario conocer el nivel estático del agua. Para ello se deberá tener un conocimiento sobre la presión (carga hidráulica) a la salida que tiene el equipo de bombeo actual. Habrá que considerar que durante los resultados de las simulaciones preliminares, se deberá cotejar los resultados del caudal que inyecta el tanque a la red de distribución, con los que posiblemente pudiera estar inyectando la bomba. Es probable que el caudal calculado sea mayor o incluso menor de lo que pudiera suministrar la bomba.

2.3.1.5 Elementos de regulación o válvulas

Uno de los puntos que afectan considerablemente, la predicción de los caudales y las presiones dentro de la red de distribución, es el conocimiento preciso del estado de las válvulas. Los datos que se requieren de forma inicial para iniciar el proceso de simulación son: ubicación y condición actual (abierta o cerrada) (Figura 2.6).

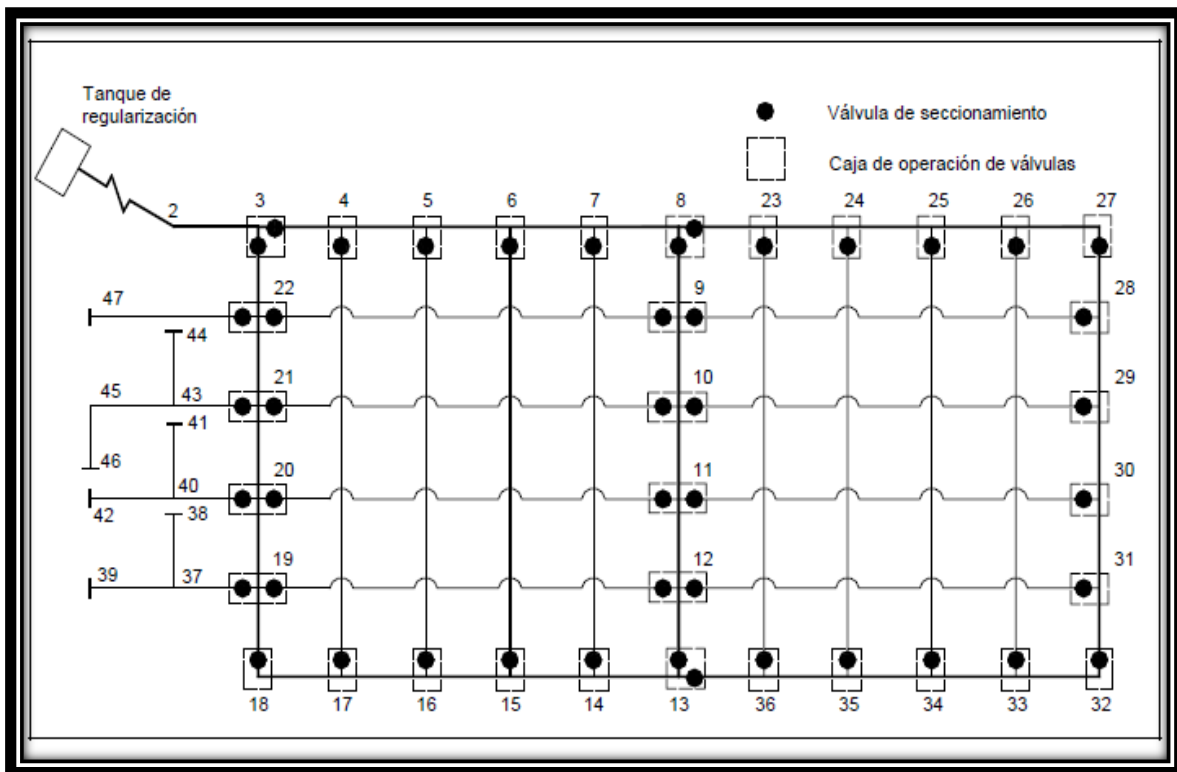


Figura 2.6 Ubicación de válvulas dentro de la red de distribución (red secundaria en dos planos, Tzatchkov e Izurieta, 1994).

Dentro de las válvulas existen varios tipos que podrán ser considerados, como son las válvulas reguladoras y reductoras de presión. En este tipo de válvulas generalmente se insertará dentro del modelo de simulación la presión que se desea aguas abajo de la misma. Otro tipo de válvulas son las limitadoras de caudal, que restringen el caudal de paso a través de la válvula a un valor prefijado. Generalmente los modelos de simulación emiten un mensaje de advertencia si no puede conseguirse dicho caudal, a no ser que hubiera un aporte de energía (esto es, si el caudal a válvula abierta fuera inferior al de consigna). Las Válvulas Limitadoras de Caudal son unidireccionales, y deben orientarse según el sentido del flujo a limitar. Si se especifica un caudal negativo para una Válvula Limitadora de Caudal, ésta se comporta como una bomba de caudal prefijado, [Rossman, 1994]

2.3.1.6 Depósitos y/o tanques de almacenamiento y regulación

De estos elementos se requiere de la información siguiente:

- Ubicación
- Tipo (Elevado o superficial)
- Capacidad
- Geometría
- Cota de plantilla

- Elevación de los niveles (máximo y mínimo) o nivel del agua
- Curva de nivel-volumen (en caso de ser necesario).

Un ejemplo se muestra en la Figura 2.7

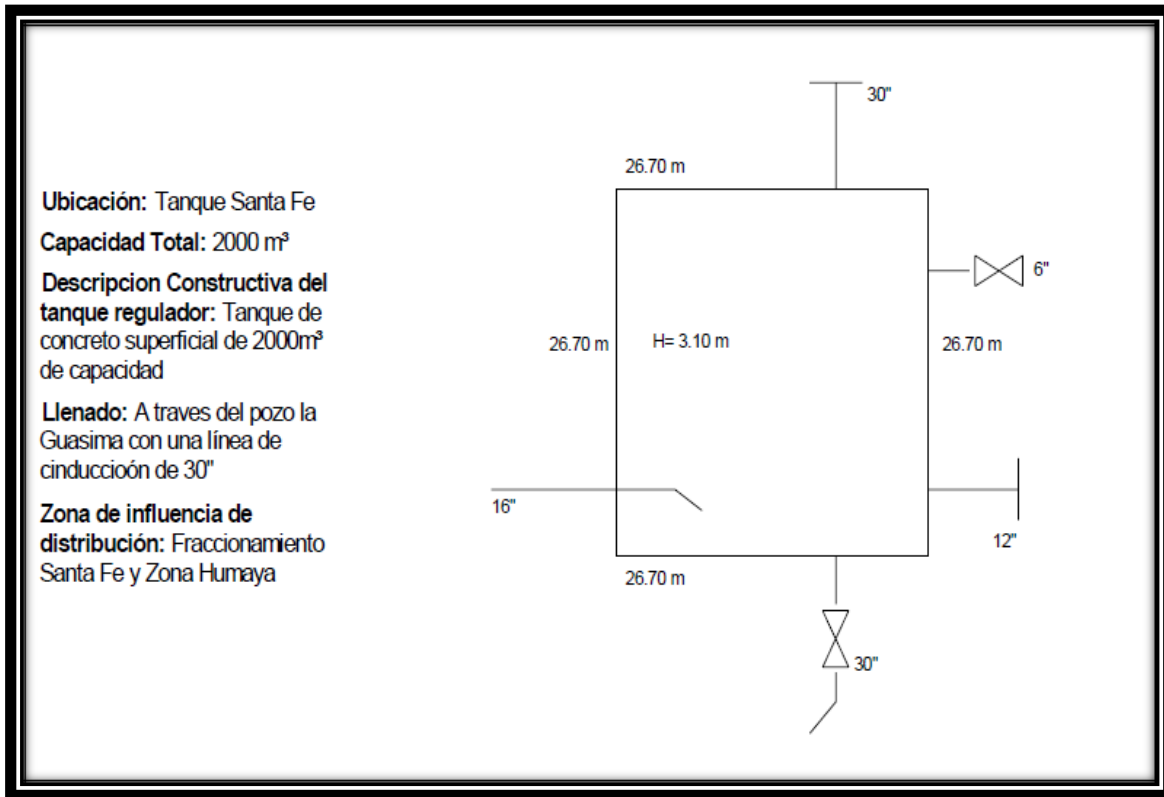


Figura 2.7 Dimensiones del tanque Santa Fé, [Alcocer, et al, 2003].

2.3.1.7 Nodos de consumo

En este tipo de nodo requiere de la cota de terreno, tipo de consumo, conectividad a la red, sector de consumo al que pertenece, niveles de fugas en la zona de influencia del punto, usuarios o número de viviendas que se abastecen del nodo, tipo de suministro (alimentación a través de un aljibe o directamente de la red).

Un ejemplo de lo anterior pueden ser los denominados “grandes consumidores”. Estos generalmente están asociados a la industria, comercios, tiendas departamentales, escuelas, centros comerciales, entre otros. Dentro del modelo de simulación se coloca el consumo promedio que demandan este tipo de usuarios y se ubicarán en el nodo con proximidad, o bien se inserta un nuevo nodo a la red de distribución.

2.3.1.8 Puntos de inyección

Son aquellos en los que se introduce agua en la red de distribución, y no son depósitos ni estaciones de bombeo. Estos normalmente son puntos que sustituyen a una estación de bombeo por dos razones:

- a) El modelo no se extiende hasta la estación;
- b) No se va modelar como tal.

En ambos casos se requiere conocer su cota, registros históricos del caudal inyectado, curva de variación diaria y horaria del caudal inyectado y concentración de reactivos para el caso de simular un modelo de calidad del agua.

2.3.2 Esqueletización de la red

En ocasiones tener todos los elementos del sistema de distribución como se encuentran físicamente y posteriormente introducirlos en un modelo hidráulico de simulación resulta un inconveniente para abordar. Por lo anterior, es necesario depurar o simplificar los datos que hemos recopilado de manera que se convierta en información útil para ser introducida en el modelo.

La Esqueletización consiste en una simplificación de la red de distribución, y una esquematización de los restantes elementos de la red.

Algunos programas de simulación tienen este tipo de herramientas de forma automatizada, como el WaterCAD® y el WaterGEMS® con su módulo llamado “Skelebrator Skeletonization”, [WaterGEMS®, User’s Guide, 2003].

De forma general la esqueletización de la red se traduce en los tres puntos siguientes:

- Unificación de nodos próximos, donde debido a la corta longitud de las tuberías que los unen, se tendrá un mismo valor de la presión;
- Eliminación de ramificaciones y demandas, sustituyéndolas por su consumo en el punto de conexión con la red, Figura 2.8;
- Eliminación de tuberías de diámetro pequeño.

2.3.2.1 Recomendaciones

Una vez realizado el proceso de esqueletización de la red, al final se tiene un modelo formado por un conjunto de líneas y nodos.

Una de las recomendaciones que será importante aclarar, es que el diámetro a partir del cual se van a eliminar las tuberías depende del tipo de modelo y del tamaño de la red, como se describe en el capítulo anterior. Como se recordará en modelos estratégicos y de planificación sólo se consideran las tuberías principales con mayor caudal. Caso contrario se presenta en los modelos de calidad del agua, donde será necesario contemplar en el modelo, tuberías de distribución de pequeño diámetro, que es donde el agua sufre mayor deterioro en su calidad.

Sin embargo en ocasiones, algunas tuberías con diámetro pequeño se localizan en las zonas de mayor antigüedad de la ciudad y tienen una capacidad de transporte importante, por esta

razón se deberán tomar en cuenta éstas en el proceso de esqueletización de la red. Asimismo existen casos que para mantener la conectividad de algunas tuberías de mayor diámetro, es necesario incluir alguna tubería más pequeña.

Otra situación que vale la pena mencionar es que puede haber tuberías, que en condiciones normales de operación de red, tienen poca influencia sobre el resto de la red, sin embargo, podrán llegar a tenerla cuando por rotura o falla, se obligue a cerrar alguna tubería importante cercana. Por ello en conclusión, durante el proceso de esqueletización de la red, siempre será mejor añadir una tubería de más que eliminar alguna de ellas, porque podrá llegar a tener importancia de forma posterior.

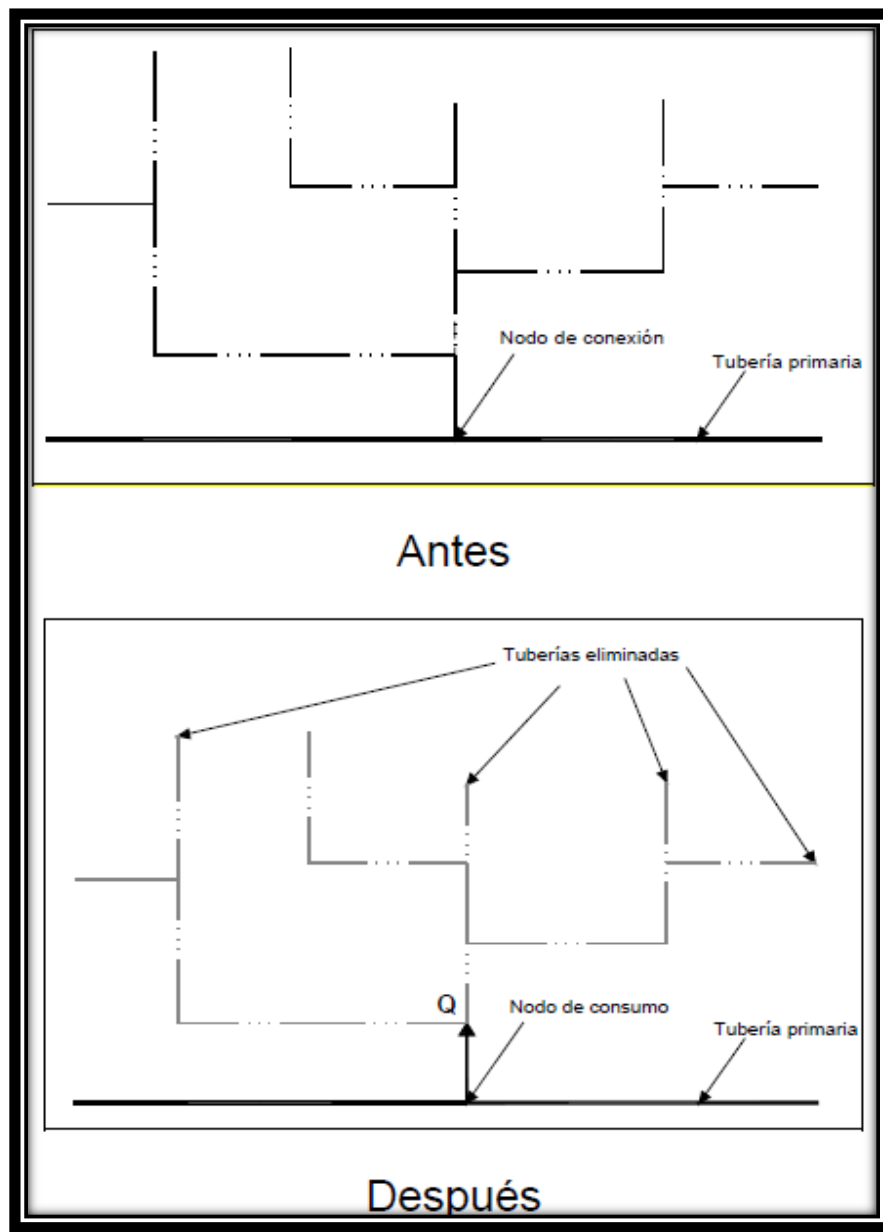


Figura 2.8 Eliminación de ramificaciones

Es importante que en la actualización y mantenimiento del modelo, se tenga constancia de las simplificaciones realizadas, además de conservar los elementos eliminados en otro archivo.

2.3.2.2 Estaciones de bombeo

El proceso de esqueletización también incluye las estaciones y equipos de bombeo, así como los elementos de regularización y/o almacenamiento de agua. Se pretende reproducir el comportamiento de la estación de bombeo sin llegar a incluir detalladamente todos los elementos que la componen. En el caso de flujo permanente, las estaciones de bombeo se pueden incluir dentro de un modelo como un punto de inyección de caudal a la red de distribución.

Dentro de los modelos dinámicos, lo anterior no será posible, porque se deberá tener conocimiento del gasto de la bomba ante diferentes situaciones. Por lo anterior a continuación se describen ciertos casos reales donde se involucran las estaciones de bombeo y su incorporación al modelo de simulación.

- Si el bombeo se realiza a un depósito o tanque de regularización se podrá modelar la estación de bombeo como dicho tanque (Figura 2.9), la altura piezométrica en el nodo de la bomba corresponde con la del depósito. La estación y la red de distribución trabajarán y estarán sujetas a la altura piezométrica que imponga el tanque, razón por la cual se podrá eliminar la estación de bombeo.
- Para el caso en que el tanque funcione como excedencias, la presión en la red depende del caudal que entra y sale del tanque, por lo que es importante incluir la estación de bombeo. Asimismo en caso de tener un bombeo directo hacia la red, se deberá incluir la estación de bombeo.

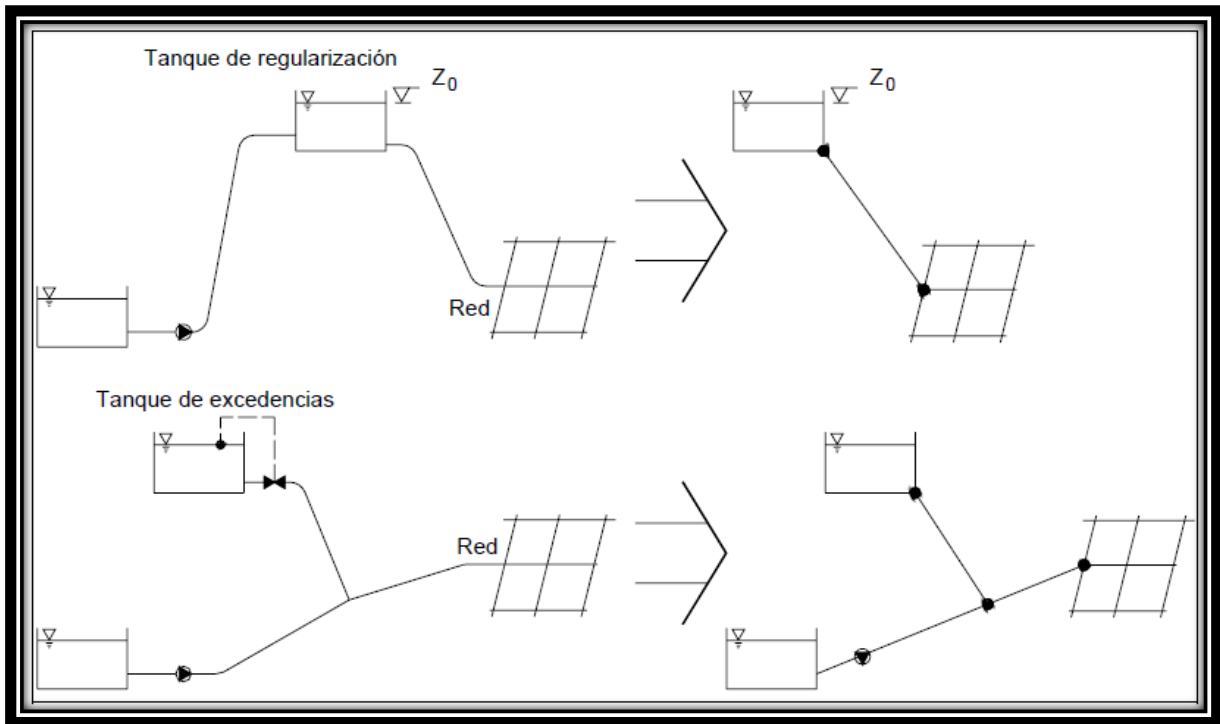


Figura 2.9 Casos que involucran estaciones de bombeo y tanques de regularización y excedencias, [López, G., 2000].

2.3.3 Estudio de consumos y asignación de demandas

La bondad de un modelo de simulación hidráulica, cuando éste representa una red de distribución en servicio, depende del ajuste que se realice de los parámetros que definen el comportamiento de los diferentes elementos.

Los parámetros que tienen mayor importancia dentro de una simulación son tres:

1. Diámetro de las tuberías;
2. Rugosidad de las tuberías;
3. Demanda en los nodos de consumo.

Es cierto que el diámetro y la rugosidad son parámetros con una incertidumbre elevada, por diversos factores como la antigüedad de la red, topología, composición química del agua, sin embargo es la demanda en los nodos de consumo, la variable que más incidencia tendrá en la respuesta del modelo.

En resumen, existen tres aspectos por considerar dentro del consumo de agua que deberán ser resueltas cuando se construye un modelo de simulación hidráulica:

- ¿Cuánta agua se va a usar?
- ¿Dónde están localizados los puntos de consumo?
- ¿Cómo varía el consumo en función del tiempo?

Inicialmente se realiza un estudio de demanda promedio, sobre la cual se aplicarán los coeficientes de variación horaria para el caso de las simulaciones estáticas y las curvas de variación de la demanda en simulaciones de períodos extendidos.

Para el estudio de las demandas del modelo cabe distinguir entre los modelos estáticos y los dinámicos.

En el modelo estático se analiza la red para un único estado de demanda. Este estado deberá ser lo suficientemente significativo para el uso que se le dará al modelo, generalmente se analizan la situación de máximo consumo donde se presentan las presiones más bajas en la red de distribución, y, la de mínimo consumo cuando las presiones son mayores, y se pueden producir fallas en las tuberías, generalmente esto se presenta durante la noche, debido a los usos y costumbres de la población.

Para el caso de la asignación de demandas en un modelo dinámico, habrá que considerar una curva de variación horaria de la demanda, y por ello será más difícil la asignación de demandas al modelo. Para su utilización en simulaciones de período extendido, la curva de variación de la demanda se discretiza en intervalos regulares de tiempo, normalmente de una hora de duración (Figura 2.10).

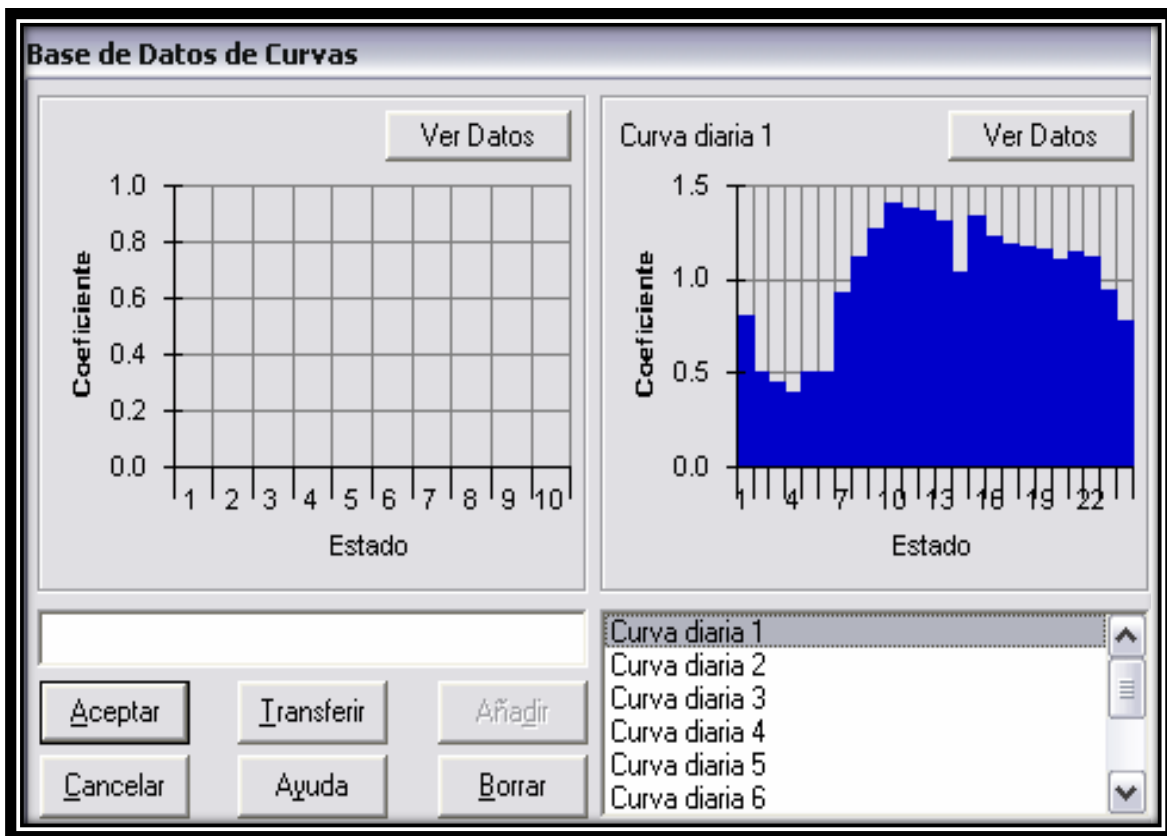


Figura 2.10 Curva de la variación de la demanda dentro del modelo español, SARA®.

2.3.3.1 Estimación de la demanda

La información requerida para determinar la demanda promedio se obtiene de diferentes fuentes de información.

Primeramente se utilizan los registros del propio abastecimiento relacionados con la producción de agua en las fuentes, caudal o volumen de agua bombeado, caudal inyectado en los diferentes puntos de alimentación de la red, variación de niveles en tanques o depósitos de almacenamiento y/o regularización. Por otro lado se obtienen las lecturas de los micromedidores de los usuarios que sirven de base para la facturación. Estos volúmenes facturados podrán ser convertidos a caudales promedio.

La información obtenida debe ser convenientemente tratada para poder determinar las demandas en los nodos de consumo. Existen dos posibles formas de proceder:

- De arriba hacia abajo
- De abajo hacia arriba

Ambos métodos están basados en conceptos generales de balance de masa (Figura 2.11).

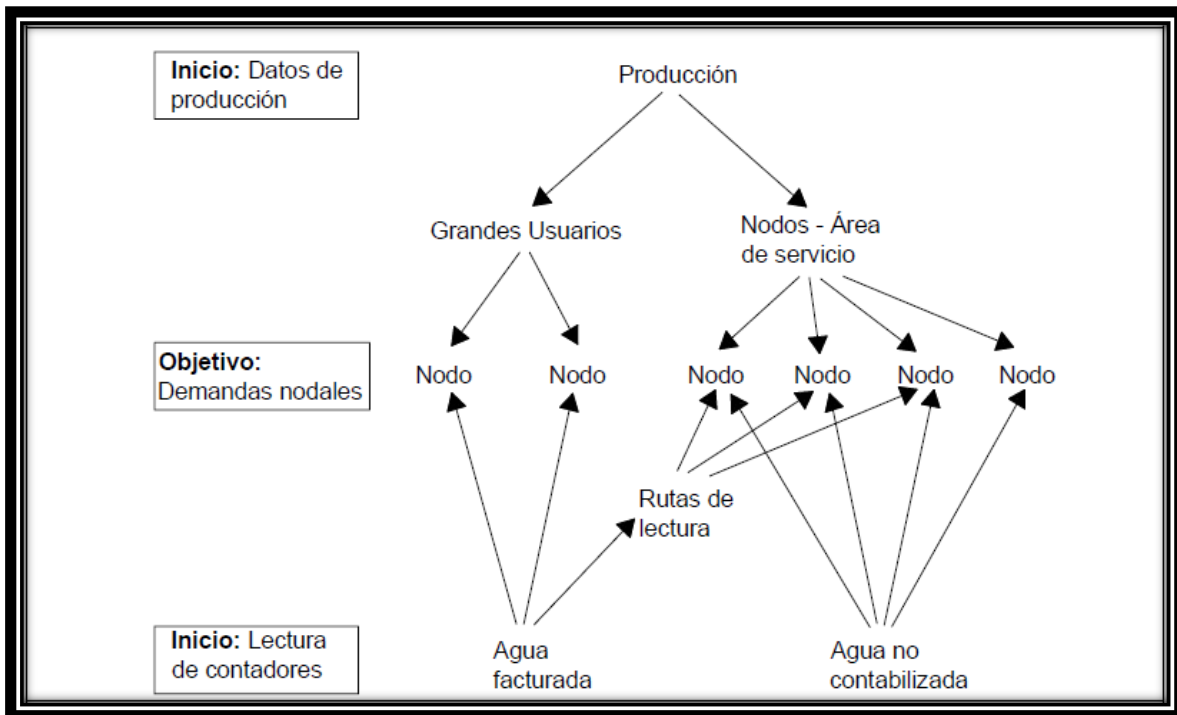


Figura 2.11 Estimación de la demanda o carga del modelo

La determinación de la demanda de arriba hacia abajo supone comenzar desde las fuentes de abastecimiento y descender hasta las demandas nodales. Con el conocimiento sobre la

producción de agua y los principales consumidores de agua, el resto de la demanda es desagregada entre el resto de los consumidores.

El procedimiento de abajo hacia arriba parte de los registros individuales de facturación de los usuarios, agregando diferentes consumos para obtener las demandas nodales.

Sin embargo, la mayoría de los métodos empleados para asignar la demanda a un modelo son una combinación de ambos procedimientos. De hecho, la determinación del agua no contabilizada se calcula como la diferencia entre la producción de agua y el volumen de agua medido a los usuarios, repartiendo posteriormente dicha diferencia entre los nodos según un determinado criterio de repartición o asignación.

2.3.3.2 Tipos de consumo

En la asignación de consumos existen dos tipos: contabilizados y no contabilizados.

Se denominan consumos contabilizados aquellos que son controlados tanto en valor como en ubicación. Normalmente serán los que se facturan al usuario del servicio de distribución.

Se consideran consumos no contabilizados los que quedan fuera del control del organismo operador. Principalmente se deben a errores en los micromedidores, fugas en la red, tomas clandestinas, tomas para servicios municipales, entre otros.

2.3.3.2.1 Consumo contabilizado

Los consumos contabilizados provienen fundamentalmente de las facturaciones de los usuarios al servicio.

El proceso de asignación de demandas consiste en pasar los consumos facturados de cada usuario a la demanda en el nodo del modelo. El método dependerá de la estructura en la información por parte del organismo operador.

2.3.3.2.2 Consumo no contabilizado

Es aquél consumo que no se tiene controlado, como son: errores de lectura, fugas en la red de distribución, errores en los equipos de medición de caudal, tomas clandestinas, entre otros.

2.3.3.3 Criterios de asignación

Existen diferentes formas de realizar la asignación de demanda cuando se parte de las facturaciones de los usuarios, las cuales se citan a continuación.

2.3.3.3.1 Asignación nodo por nodo

Este proceso consiste en relacionar cada usuario con un nodo del modelo y asignar su consumo a dicho nodo, buscando siempre referirlo al más cercano, o con el nodo que se puede considerar que abastece al usuario.

La demanda en el nodo se obtiene sumando el consumo de todos los usuarios incluidos en el sector.

Para este tipo de asignación de consumo se emplean dos bases de datos: padrón de usuarios y el registro de facturación de los mismos. Estas se obtienen a partir de la información recopilada por el organismo operador.

2.3.3.3.3 Asignación de consumos unitarios por calle

Este proceso inicia identificando las tuberías de la red de distribución y calculando los metros lineales de éstas dentro de las calles. Por su parte, a través de los datos de los usuarios del servicio se obtiene el consumo por calle y el consumo unitario por calle.

Con la longitud de cada tubería que se localiza en cada calle se multiplica por el consumo unitario se obtiene el consumo por tubería. Multiplicando dicho consumo unitario por los metros de tubería que existen en la calle, se obtiene un consumo por tubería, y utilizando la planimetría dentro del modelo esqueletizado, éste consumo por tubería se convierte en consumo por línea trazada del modelo.

En este método, la demanda de los nodos se obtiene repartiendo los consumos por línea trazada calculada del modelo entre los nodos extremos, y sumándolos a los consumos propios de los nodos.

Este tipo de asignación tiene bastante precisión por considerar la ubicación real de las tuberías en la red.

Con los procedimientos descritos con anterioridad, se asigna la demanda media a los nodos de consumo, lo que corresponderá a un estado medio de carga de la red de distribución.

2.3.3.4 Recomendaciones en la asignación de consumos en modelos matemáticos

Los procesos de asignación de consumos anteriormente expuestos tienen una serie de recomendaciones. Dentro de éstas se deberán distinguir de acuerdo al tipo de simulación que se trate: estática y dinámica.

2.3.3.4.1 Asignación de consumos en modelos estáticos

A continuación se describen una serie de recomendaciones en caso de considerar un modelo de simulación estática:

- A través de los métodos mencionados anteriormente, se asigna una demanda media en los nodos del modelo que corresponde a un estado medio de demanda en la red de distribución.
- En caso de considerar un enfoque estático, se deberá adaptar el estado medio de demanda en la red a la que se produce el instante de la simulación.
- A su vez la demanda instantánea depende de varios factores como son:
- Tipo de consumo (comercial, doméstico, industrial, público)

- Nivel socioeconómico del usuario del servicio
- Hábitos de consumo
- Las características anteriores muestran que existirán diferencias entre un sector de consumo y otro, incluso en nodos del mismo sector.
- En caso de abordar problemas de diseño, el consumo medio será corregido por un coeficiente de variación máximo, dependiente de número de usuarios.

Estos coeficientes máximos diarios u horarios son valores específicos de cada sistema de distribución. En México, a través de publicaciones emitidas por la Comisión Nacional del Agua como el Manual de Datos Básicos, [CNA, 2004], se publicaron los valores de los coeficientes variación diaria y horaria, soportados a través de un estudio que incluyeron diferentes ciudades del país.

Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 2.1 Valores de los coeficientes de variación diaria y horaria, [CNA, 2004]

| CONCEPTO | VALOR |
|--|-------|
| Coefficiente de variación diaria, CVd | 1.40 |
| Coefficiente de variación horaria, CVh | 1.55 |

Sin embargo se recomienda que a través de los registros de producción de agua de las fuentes de abastecimiento y niveles en tanques del sistema analizado se determinen estos coeficientes para el sistema de distribución analizado.

2.3.3.4.2 Asignación de consumos en modelos dinámicos

Además de las recomendaciones anteriores, dentro de los modelos de simulación dinámica se deberá reproducir una curva de variación de la demanda en los nodos a lo largo de la simulación. Por lo anterior se deberán atender las siguientes recomendaciones:

Para simular en cada instante el estado de demanda real en la red de distribución, se multiplica la demanda media de los nodos por un coeficiente que relacione el consumo instantáneo con el medio.

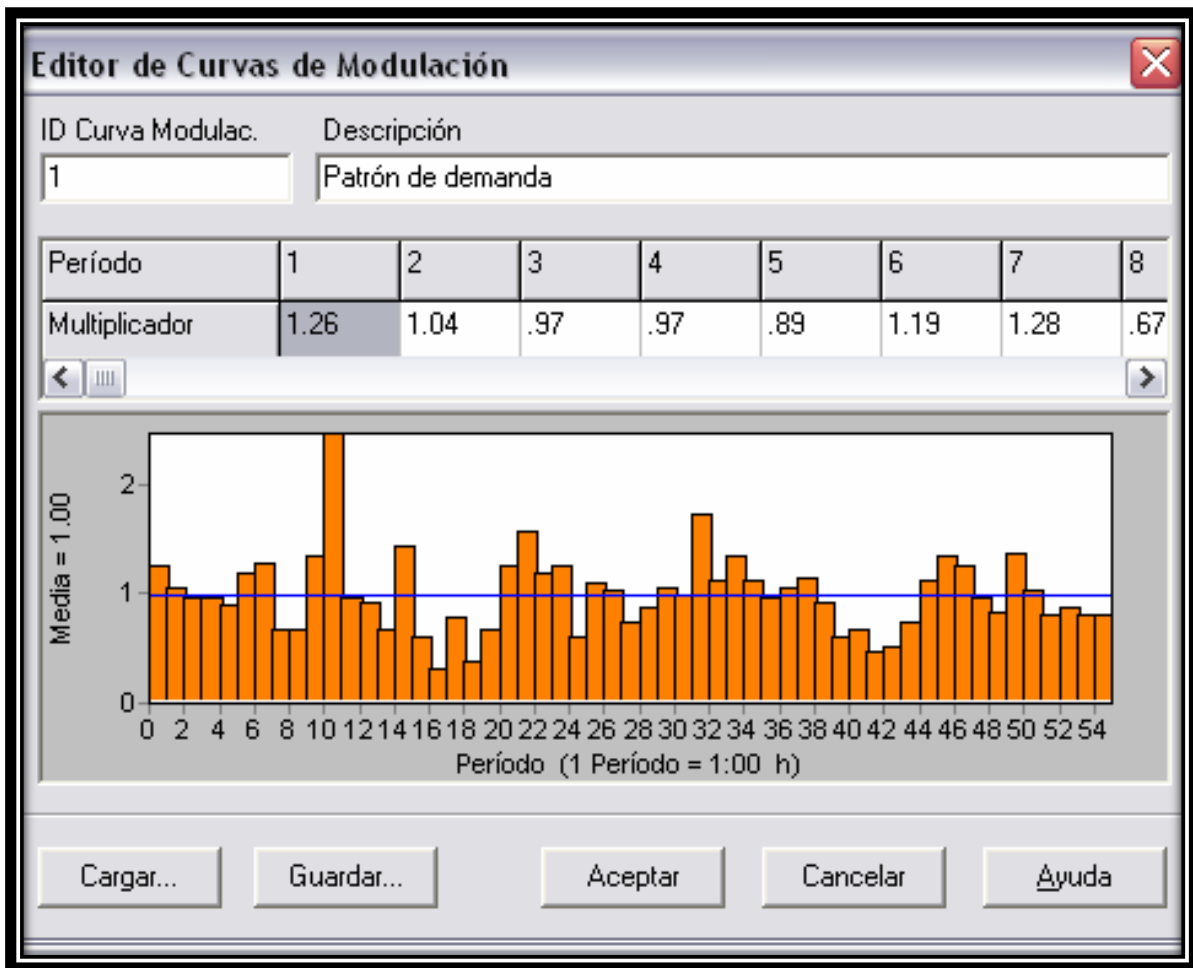


Figura 2.13 Editor de curva de variación o modulación de la demanda dentro del modelo EPANET®.

El proceso de asignación de cargas incluye también dentro de los nodos la variación de la demanda en cada uno de ellos.

La variación de la demanda para el consumo doméstico depende del nivel socioeconómico, hábitos de consumo, edad de los usuarios, etc.

- La curva de la variación de la demanda difiere totalmente de una red de distribución a otra. Por lo anterior es conveniente realizar mediciones tendientes a caracterizar la curva que se introducirá dentro de un modelo de simulación.
- En los usuarios del sector comercial e industrial, la curva de la variación está adaptada a los horarios de actividad. Dentro de éstos el consumo es prácticamente constante, mientras que fuera de ellos es nulo.
- Las curvas de variación de la demanda varían en días laborables y festivos, de acuerdo a la estación del año, por lo que habrá que considerar esto en el momento de la simulación.

- Las diferencias estacionales del consumo de agua están relacionadas con los cambios climáticos, tales como la temperatura y la precipitación.

Hay ocasiones en que existen usuarios cuyos patrones de demanda difieren significativamente del patrón de demanda típico asignado al grupo que pertenecen, sin embargo, la repercusión que tienen tales diferencias sobre el modelo resultan insignificantes. Caso contrario ocurre para otros usuarios, como son las industrias, donde los errores en el patrón de consumo pueden tener un impacto mayor sobre el modelo.

Normalmente entre mayor sea el consumo individual de un usuario, más importante será obtener una caracterización adecuada de su patrón de consumo respectivo.

2.3.3.5 Otros factores por considerar

El desconocimiento del valor y localización de los consumos no contabilizados como las fugas en la red de distribución, los errores en los micromedidores, caudal no contabilizado, entre otros, añaden incertidumbre al proceso de asignación de la demanda en los nodos. Sin embargo las fugas son el factor predominante en este rubro, a continuación se describe con mayor detalle algunas experiencias al incorporarlas dentro de un modelo.

2.3.3.5.1 Fugas en la red de distribución

Estudios realizados en México [Ochoa y Bourguett, 2001] han mostrado que dentro de las redes de agua potable de las ciudades mexicanas se pierde en promedio un 36.40% del caudal suministrado en las fuentes, principalmente en numerosas fugas que se presentan en las conexiones domiciliarias y en las tuberías de la red. Varios estudios realizados en el extranjero [Germanopoulos, 1985; Goodwin, 1980; Martínez, et al, 1999] han mostrado que las fugas en las redes de agua potable son directamente proporcionales a la presión que opera en la red, esto es, a mayor presión en la misma se tienen más fugas y viceversa. Una de las posibles medidas para reducir las pérdidas de agua potable consiste en reducir las presiones excesivas.

La reducción de la presión normalmente se realiza a través de:

- Reubicación de tanques en zonas más bajas;
- Sectorización de la red de tal manera que no se tenga un desnivel topográfico importante y que cada sector sea abastecido por su propio tanque, [Ochoa, et al, 2002; Cortez et al, 2003];
- Instalación de válvulas reductoras de presión o cajas rompedoras de presión en la red de distribución;
- Entre otras.

La técnica de usar válvulas reductoras de presión en la red con fines de reducir las fugas, ha sido usada principalmente en países de Europa y en los últimos años se ha propuesto aplicarla en México.

Con objeto de obtener una disminución de las fugas rentable y adecuada a las condiciones particulares de la red, cualquier estudio o proyecto de control de fugas por medio de la presión debe de considerar las posibles formas de reducir la misma, de manera que el ahorro de agua que se obtenga soporte las inversiones necesarias para hacer los arreglos y sus necesidades de mantenimiento.

2.3.3.5.2 Modelación numérica de fugas y consumo

Para llevar a cabo este análisis se requiere de un modelo matemático de la red capaz de considerar de qué forma las fugas y el consumo en la red cambian con la presión. Los programas existentes para el cálculo hidráulico de redes, como el EPANET®, SCADRED®, WaterCAD®, SARA®, entre otros, consideran este proceso de modelar las fugas e incluso algunos de ellos incluyen en los tutoriales de los programas como introducir los valores para realizar la simulación, sin embargo no se indican con detalle la teoría que soporta este desarrollo y los valores que deben introducir dentro de la interfaz.

2.3.3.5.3 Relación presión-fugas

Dada la naturaleza de las fugas, éstas se consideran en el modelo matemático por medio de la ecuación de descarga a través de un orificio, que tiene la forma siguiente:

$$q_{fugas} = C p^e \quad (2.1)$$

donde:

| | |
|-------------|---|
| q_{fugas} | gasto perdido en fugas |
| p | presión en los nodos; |
| C | constante cuyo valor se determina con base en el área del orificio y demás condiciones de descarga; |
| e | constante que depende del tipo de descarga. |

En los modelos de redes de agua potable, la presión p se obtiene en los nodos de la red, por lo tanto la ecuación (3.1) será aplicada a cada nodo y se obtendrá un valor para las fugas en cada uno de ellos. La constante C será en general diferente para los diferentes nodos (mayor para aquellos donde hay mayor volumen de fugas), y el exponente e tendrá el mismo valor para todos los nodos. La ecuación de descarga de un orificio de área constante corresponde a la ecuación (3.1) con $e = 0.5$.

Esta ecuación de descarga de un orificio de área constante se utiliza de manera indirecta en algunos programas de cómputo que no pueden modelar las fugas directamente, en los que se pueden simular las fugas conectando a cada nodo un tubo ficticio que descarga a otro nodo ficticio de cota piezométrica igual a la cota del nodo. En algunos estudios dirigidos a

la reducción de las pérdidas de agua, que usan el programa EPANET®, se emplea esa forma de simular las fugas [Capella, 2005].

La manera más certera para definir el valor de coeficiente e , es de forma experimental, esto es someter la red a diferentes presiones de operación y medir las fugas que se producen para cada nivel de presión en la red. Los resultados de los estudios realizados en el extranjero a través de la metodología anterior [Goodwin, 1980; Germanopoulos, 1985] muestran que el exponente e , tiene un valor mayor a 0.5 e incluso llega a ser igual a 1.18.

Recientemente otros investigadores [Tucciarelli et al, 1998], proponen y aplican un método numérico para determinar las constantes C y e . Los valores de e que se obtienen a partir de estos trabajos son mayores de 1, y con un promedio también cercano a 1.18.

En conclusión el valor internacionalmente establecido es 1.18, [Tzatchkov y Noda, 2002].

El valor de 1.18, tiene un significado físico, relacionado con el hecho que las fugas corresponden a una descarga de orificio de área variable. Al subir la presión, el tamaño de las aberturas que producen las fugas se incrementa, y esto hace que se pierda más agua (Figura 2.14 y Figura 2.15).

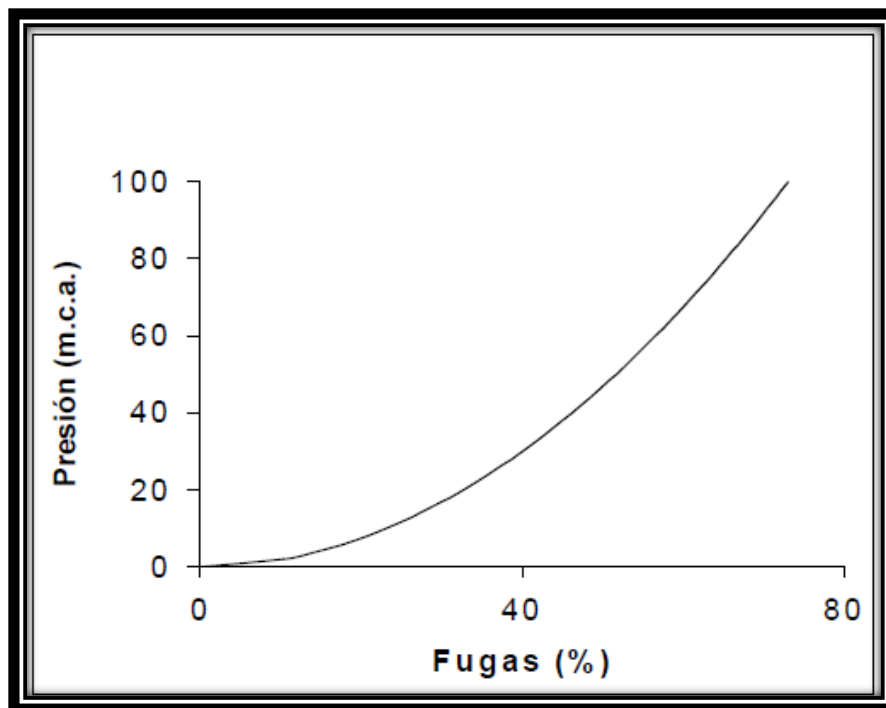


Figura 2.14 Relación presión-fugas para $e = 0.50$.

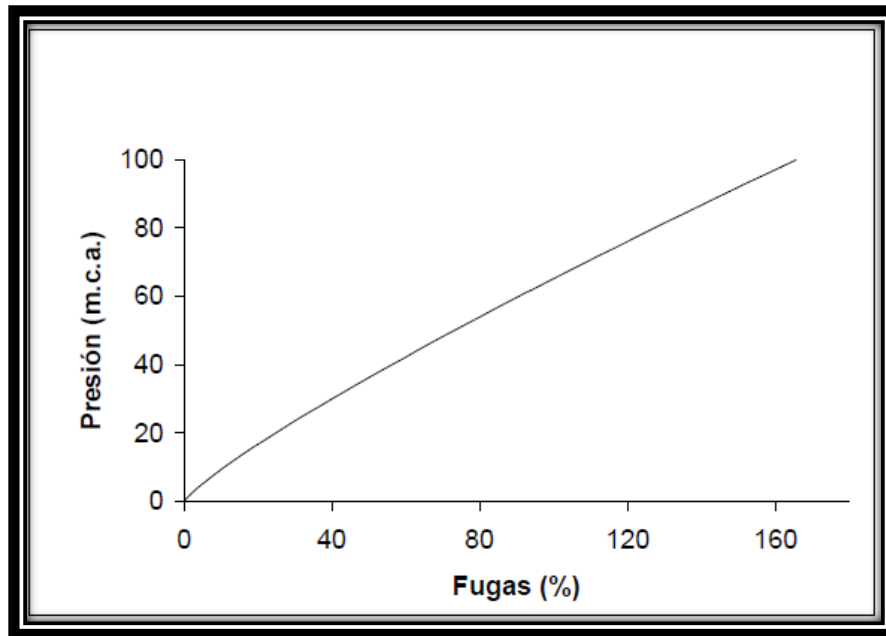


Figura 2.15 Relación presión-fugas para $e = 1.50$.

Para la Figura 2.14, el caudal aumenta en menor medida al subir la presión comparado con la Figura 2.15, y para presiones altas el caudal de las fugas de la Figura 2.15, será mucho mayor que el caudal de la Figura 2.14.

2.3.3.5.4 Relación presión-consumo

En los cálculos hidráulicos de redes de agua potable normalmente se asume que el consumo no depende de la presión en la red. Se determina el consumo, se asigna a los nodos de la red y se corre el modelo para obtener las presiones correspondientes a ese consumo. De esta manera el problema se reduce a revisar si se tendrían ciertas presiones mínimas en los nodos, supuestamente necesarias para que se pueda suministrar la demanda de agua potable requerida.

Prácticamente todos los programas conocidos para cálculo hidráulico de redes de agua potable, incluyendo EPANET®, manejan ese modelo de consumo prefijado que no depende de la presión. En ocasiones esos programas obtienen presiones negativas en algunos nodos, algo que es físicamente imposible.

El consumo real de agua potable sin embargo depende de la presión. Esta influencia es más fuerte cuando la presión no es suficiente, dado que los usuarios no pueden usar toda el agua que quisieran por tener poca presión. El consumo incluso llega a ser cero cuando la presión es igual a cero.

La presión demasiado alta también genera un consumo elevado (más de lo normal), aparte de las fugas, por la facilidad de tener el agua y su abundancia.

La relación del consumo de agua potable con la presión puede ser modelada con una ecuación similar a la ecuación (2.1), es decir,

$$q = C_1 p^{e_1} \quad (2.2)$$

donde:

- Q consumo;
- p presión en los nodos;
- C_1 y e_1 constantes.

De manera similar a la ecuación (2.1), la constante C_1 será diferente para cada nodo (mayor para los nodos donde hay más consumo), y el exponente e_1 tendrá el mismo valor para todos los nodos.

Martínez et al. (1999) han llevado a cabo estudios que indican un valor de 0.21 para el exponente e_1 . La Figura 2.16 muestra la relación expresada por la ecuación (2.2) para $e = 0.21$, en el supuesto que para una presión de 10 m.c.a. se tiene el consumo normal de 100 por ciento.

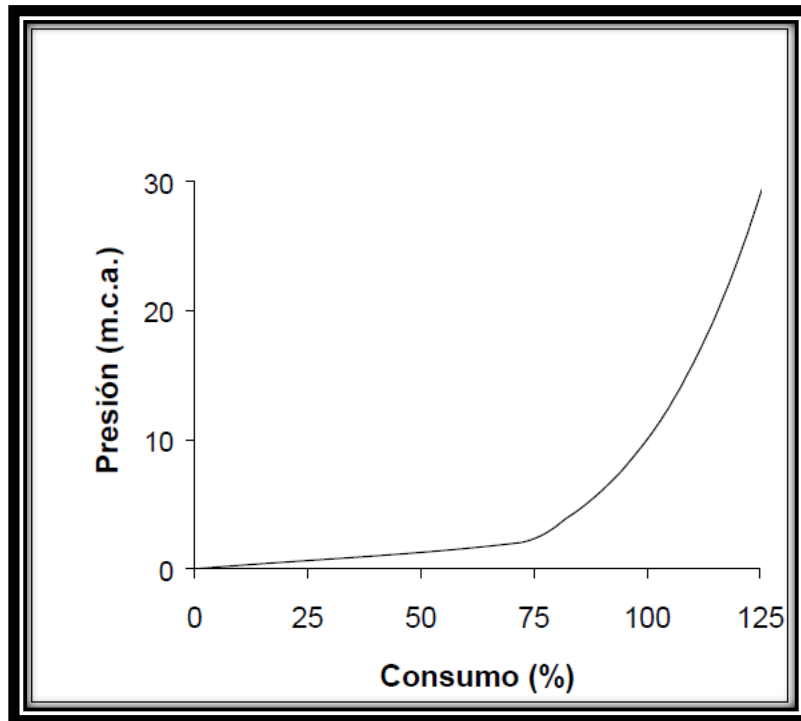


Figura 2.16 Relación presión-consumo de agua para $e = 0.21$, en el supuesto que para una presión de 10 m.c.a., se tiene el consumo normal (100%).

Para dar una idea de lo que esto puede significar, se puede suponer que en la red de la ciudad de México el valor de “e” sea de 1 (aunque suele ser mayor en muchas de sus zonas), lo que quiere decir que las fugas serían directamente proporcionales a la carga hidráulica en la red.

En algunas zonas de la red, con materiales flexibles, en las tuberías de distribución o en las acometidas, el valor de “e” puede ser más alto, hasta de 2.5. Con un valor de 2, por ejemplo, un aumento de presión al doble significaría un aumento de fugas de cuatro veces, [Capella, 2005].

El coeficiente de descarga C por su parte, puede variar con el número de Reynolds y con la forma del orificio. En algún estudio sobre el coeficiente de descarga, hecho con un orificio en un material muy rígido se obtuvo la siguiente ilustración, con datos tomados de [Lambert, 2000].

Allí se muestra esta dependencia a partir de valores experimentales para un orificio de 1 mm de diámetro, con un número de Reynolds.

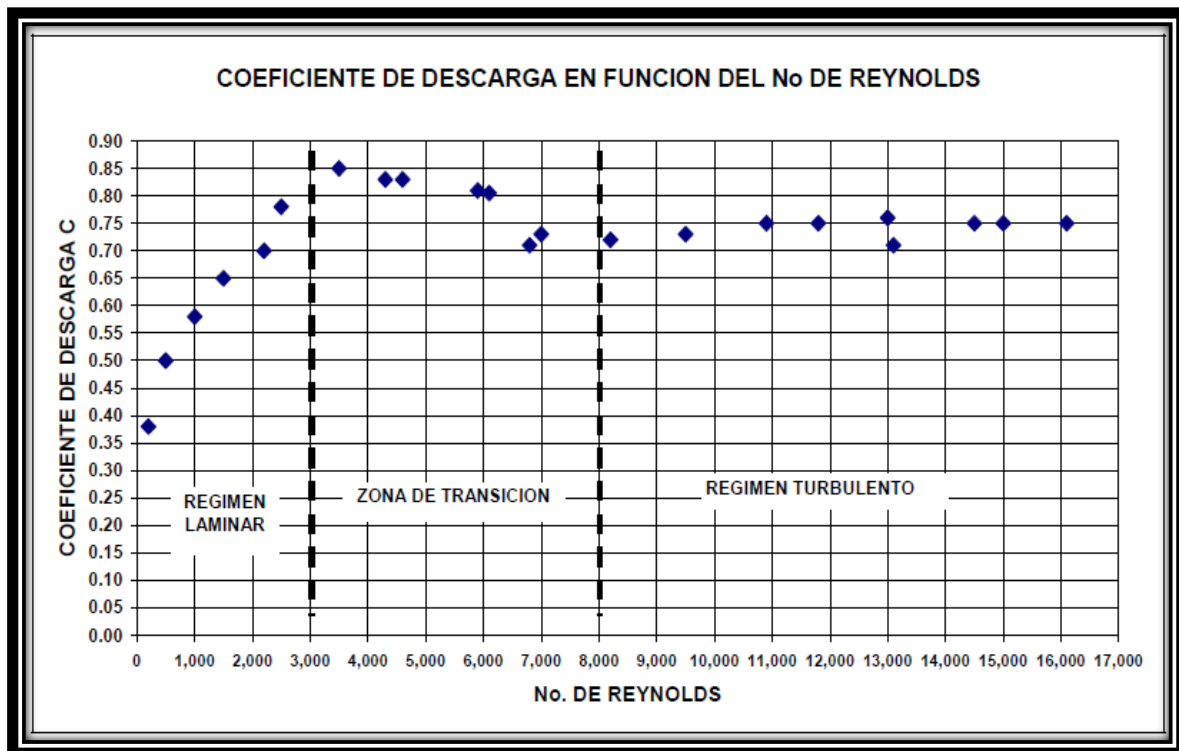


Figura 2.17 Valores del coeficiente de descarga en función del número de Reynolds.

2.3.4 Calibración del modelo hidráulico

La calibración es el proceso de realizar ajustes en los parámetros del modelo, para conseguir que el modelo reproduzca las mediciones observadas a un grado razonable de precisión.

Algunos parámetros pueden ser comparados por medición directa en la red, por ejemplo, curvas características de bombas y válvulas. Otros por su parte son difíciles de medir con exactitud como la rugosidad de las tuberías, pérdidas localizadas y la demanda de los nodos. Por lo que se tienen que realizar algunas mediciones indirectas para poder ajustarlos, y son generalmente los que suelen añadir mayor incertidumbre al modelo [Bhave, 1988].

El modelo simula el comportamiento de la red. Como resultado de la simulación se obtendrá la presión en los nodos de consumo y los caudales que circulan por las tuberías. Será válido el modelo si los valores de presión y caudal obtenidos en la simulación coinciden con los medidos en la red de distribución.

Se puede clasificar al proceso de calibración en dos tipos o niveles. El primer nivel sirve para comprobar que el modelo está produciendo resultados razonables, aunque no necesariamente precisos. En esta fase, se revisan algunos problemas como son:

- Presiones excesivamente bajas (negativas en algunos casos) o altas (aquellas superiores a las alturas piezométricas en los puntos de inyección);
- Bombas funcionando fuera del rango admisible o paradas por esta razón;
- Tanques que continuamente se están vaciando o llenando;
- Nodos desconectados de cualquier fuente a causa de tuberías o válvulas cerradas, o a causa de bombas paradas. En algunos programas de simulación a este proceso se conoce como ARMADO DE LA RED;
- En el modelo SCADRED®, por ejemplo, armado de la red consiste inicialmente en leer los archivos de los datos numéricos generados para los tramos de tubería introducidos por el usuario en el modelo. Posteriormente calcula la demanda distribuida y la asigna en los nodos de la red de distribución. Por último, se generan los archivos de datos de la red, estos se usan en el cálculo hidráulico.

Cualquiera de las condiciones indicadas, reflejará que existe un problema durante este proceso.

En lo que se podría llamar un segundo nivel de calibración, se realizan los ajustes a los parámetros del modelo, aquí se pretende conseguir la mejor representación del comportamiento de la red de distribución. En general esta fase se conforma de lo siguiente [García, 2003]:

- Realización de mediciones en la red de distribución;
- Evaluación de los resultados del modelo;
- Precalibrado del modelo;
- Análisis de sensibilidad;
- Ajuste detallado del modelo.

2.3.4.1 Caracterización de la red

El primer paso antes de analizar y diseñar una red de distribución por medio de un programa computacional, es representar la configuración geométrica y física del sistema de tal modo que pueda ser reconocido por el programa. Generalmente para representar la geometría del sistema se utiliza la notación de nodos o crucesos interconectados (Figura 2.18). En este caso, los enlaces representan las secciones individuales de tubería con características geométricas y físicas definidas, y los crucesos son los puntos de conexión de una o varias tuberías.

2.3.4.2 Requisitos de los datos de la red

Los componentes de la red (tuberías, nodos y dispositivos) deben ser identificados e introducida cada una de sus características como son el diámetro, rugosidad, longitud además su elevación y gasto, lo anterior para el caso de tuberías y nodos respectivamente. Aunque se sabe que el gasto en las tuberías responde a una variación en el tiempo a través de la diferentes conexiones del servicio a lo largo de las mismas, generalmente se agrupa la demanda entre el nodo aguas arriba y aguas abajo (Figura 2.18)

Para el caso de dispositivos adicionales de la red como tanques, bombas, tanques, deben ser igualmente identificados y definidas sus características físicas, geométricas, hidráulicas y de operación. Una vez especificados todos los datos necesarios para el programa, deberán introducirse en un formato compatible con el programa.

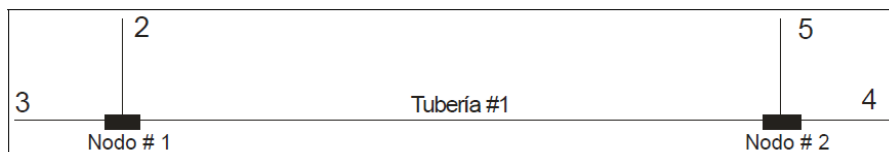


Figura 2.18 Esquema de enlace para los nodos.

2.3.4.3 Parámetros del modelo

Finalizada la recopilación de datos de la red, debe procederse a la calibración del modelo. Calibrar según una de las definiciones es llevar un dispositivo a su estado óptimo de funcionamiento, es decir, ajustar los parámetros del modelo de tal modo que reproduzca el funcionamiento del sistema observado.

Se define como parámetros del modelo, a las variables físicas que por lo general controlan las respuestas obtenidas por el modelo.

Los parámetros principales para la calibración de un modelo de simulación de redes de agua potable son la rugosidad y las demandas nodales. Es difícil obtener medidas fiables y económicas de ambos parámetros, por lo que se procede a estimar los valores de la rugosidad y de la demanda en los nodos, a través de un proceso de calibración que reproduzca de manera acertada la realidad y las condiciones de funcionamiento de la red observadas.

El proceso de calibración se representa como:

- Identificar el uso del modelo;
- Determinar estimaciones iniciales de los parámetros del modelo;
- Recoger datos de calibración;
- Evaluar resultados del modelo;
- Calibrar el modelo y su sensibilidad.

2.3.4.4 Identificación del uso del modelo

Al usar un modelo hidráulico para redes es importante identificar previamente los objetivos o el uso del programa, es decir, definir que tarea se llevará a cabo con la ayuda del modelo de cómputo (por ejemplo; estudios de planeación, estudios de calidad del agua, entre otros) adicionalmente se debe definir el tipo de análisis hidráulico requerido en función del uso deseado (permanente o de periodo extendidos).

El uso deseado del modelo y el tipo de análisis hidráulico es necesario para delimitar el tipo y la calidad de los datos requeridos para la calibración, lo anterior es un aspecto influyente en el costo económico de la calibración y en general en la aplicación del modelo para el estudio y análisis de la red.

Los modelos para aplicaciones de estado permanente pueden calibrarse utilizando múltiples observaciones estáticas de caudales y presiones recogidas en distintas horas del día bajo condiciones de operaciones variables. Por otra parte, para el caso de periodos extendidos se requiere de datos de mediciones en periodos largos y continuos, esto requiere de un mayor esfuerzo físico y por ende, económico.

2.3.4.5 Determinar estimaciones de parámetros del modelo

Antes de comenzar el proceso de calibración del modelo es muy importante estimar los valores iniciales para los parámetros del modelo, en el caso hidráulico para redes tenemos el valor inicial de la rugosidad en los tramos de la red y la demanda en los nodos.

La selección del coeficiente de rugosidad y la demanda como parámetros del modelo se sustenta en que ambos presentan generalmente un alto grado de incertidumbre y campañas minuciosas de medición o bien la estimación de ambos resulta costosa.

A continuación se presentan procedimientos para estimar los valores iniciales del modelo para el coeficiente de rugosidad y las diferentes distribuciones de demanda en los nodos.

2.3.4.5.1 Valores de la rugosidad de la tubería

Los valores iniciales del coeficiente de rugosidad pueden determinarse de diferente forma:

Valores reportados en la literatura. Una primera estimación del coeficiente de rugosidad es a través de valores reportados en la literatura, varios investigadores y fabricantes han

obtenidos tablas de valores de rugosidad para tuberías en función de algunas características, como el material, diámetro, y la edad de la misma (Tabla 2.2, Wood, 1991).

Tabla 2.2 Coeficientes típicos de Hazen – Williams para rugosidad de tuberías.

| Material del tubo | Edad (años) | Diámetro | Coefficiente C de rugosidad |
|------------------------------|-------------|-------------------|-----------------------------|
| Fundición | Nuevo | Todos los tamaños | 130 |
| | 5 | >380 mm (15 in) | 120 |
| | | >100 mm (4 in) | 118 |
| | 10 | >600 mm (24 in) | 113 |
| | | >300 mm (12 in) | 111 |
| | | >100 mm (4 in) | 107 |
| | 20 | >600 mm (24 in) | 100 |
| | | >300 mm (12 in) | 96 |
| | | >100 mm (4 in) | 89 |
| | 30 | >760 mm (30 in) | 90 |
| | | >400 mm (16 in) | 87 |
| | | >100 mm (4 in) | 75 |
| | 40 | >760 mm (30 in) | 83 |
| | | >400 mm (16 in) | 80 |
| | | >100 mm (4 in) | 64 |
| Hierro dúctil | Nuevo | | 140 |
| Cloruro de polivinilo | Medio | | 140 |
| Fibrocemento | Medio | | 140 |
| Madera | Medio | | 120 |

La aplicabilidad de estos coeficientes disminuye con la edad, debido a efectos como biopelícula, química del agua, y similares. Por lo anterior, los valores del coeficiente de rugosidad inicial para tuberías con edad considerable, deberían provenir de pruebas de campo.

Es recomendable verificar el valor del coeficiente de rugosidad por métodos de estimación en campo, debido a que el valor del coeficiente representa factores secundarios como son las pérdidas por accesorios.

Otra forma de estimar el valor de la rugosidad es por medio de nomogramas.

Gráfico de rugosidad de la tubería. Puede desarrollarse un nomograma tipo de rugosidad para un sistema particular de distribución de agua utilizando el siguiente procedimiento; Para obtener las estimaciones iniciales de rugosidad del tubo a través de pruebas de campo, se divide el sistema en zonas homogéneas basadas en la edad del material de la tubería (Figura 2.19). A continuación varias tuberías de diferentes diámetros deben probarse en cada zona para obtener estimaciones individuales de la rugosidad de la tubería (Figura

2.20); una vez construido el nomograma tipo de la rugosidad (Figura 2.21), puede usarse para asignar valores de rugosidad para el resto de tuberías de sistema.

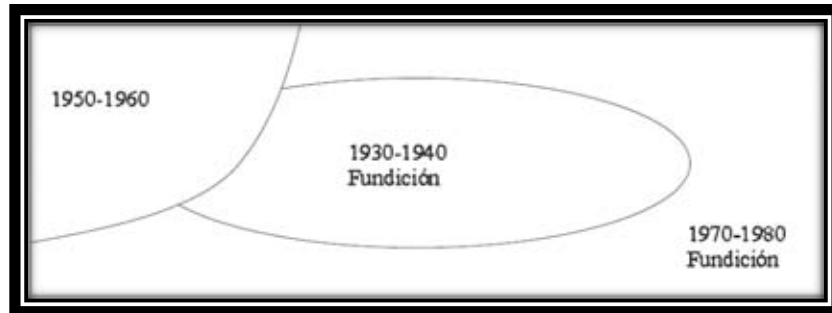


Figura 2.19 Red subdividida en zonas homogéneas de edad similar y material.

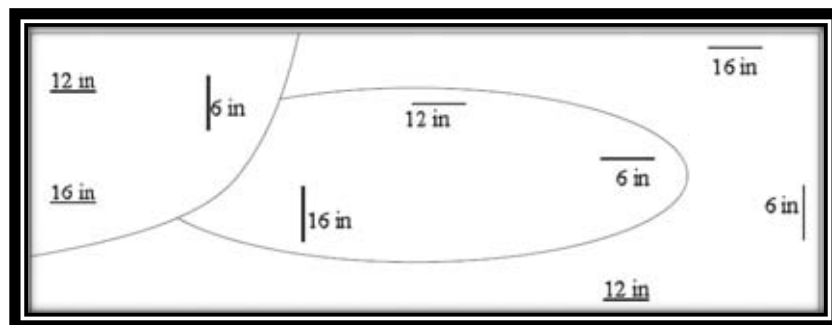


Figura 2.20 Red subdividida en zonas homogéneas de edad similar y material.

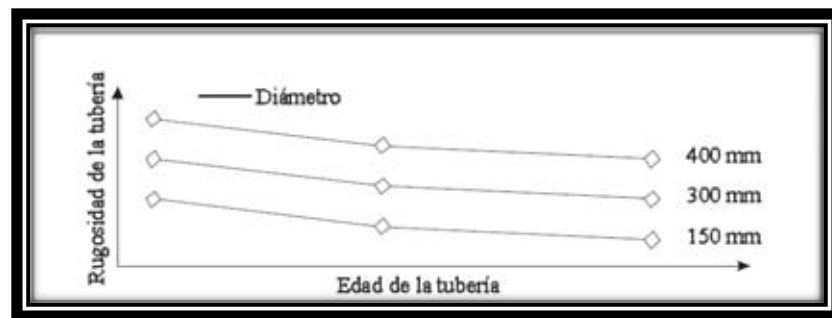


Figura 2.21 Rugosidad asociada en función del diámetro y la edad de la tubería.

Existen otras formas de estimar los valores de la rugosidad de las tuberías de una red, Prueba de campo de rugosidad, este se desarrolla para un tramo recto de tubería que contenga un mínimo de tres hidrantes, luego a través de los métodos de Walski (1984): 1) Método de la tubería en paralelo o 2) El método de los hidrantes. En general cada método determina la longitud del tramo y el diámetro, luego se aísla el tubo y se toman lecturas de presión mediante manómetros y caudal, la forma de aproximar el coeficiente de rugosidad es por medio de la ecuación de Hazen- Williams o Darcy-Weisbach. Sin embargo este

método es difícil de aplicarse debido a que en países como México, se carece de servicio continuo y de hidrantes en la vía pública.

2.3.4.5.2 Distribución de demandas nodales

El segundo parámetro necesario para la calibración del modelo, es la distribución de demandas asignadas a los nodos, en forma general la distribución de la demanda en los nodos está relacionada de manera directa al tipo de análisis hidráulico. Demanda media para estado permanente o una variación temporal en los nodos para periodos extendidos.

Distribución espacial de la demanda. Se considera una distribución espacial cuando el análisis hidráulico se realiza para un instante de tiempo, es decir, las demandas exigidas a la red responden a una distribución media en el espacio y es constante en el tiempo.

Generalmente la tubería de alimentación se calculará para que a través de ella se tenga el gasto máximo horario correspondiente a la zona de servicio respectiva, para el caso extraordinario de tener varias líneas de alimentación, la suma de los gastos que escurran a estas líneas será igual al gasto máximo horario; de igual forma la demanda que corresponde a la red de distribución obedece al gasto máximo horario.

Gasto por unidad de área: Si solamente se conoce la superficie que atenderá y todavía no se ha notificado, el gasto total se divide por el área total neta. El gasto unitario que resulta se multiplica por el área neta que sirve cada nodo, para lo cual el área por servir se divide en áreas de influencia para los diferentes nodos, como se muestra en la Figura 2.22

Los gastos de los grandes consumidores concentrados, como industrias, hospitales, baños públicos, etc., se consideran en forma directa. Con este objetivo, en el esquema de la red se señalan como nudos en los puntos de ubicación de estos consumidores.

Del gasto máximo horario $Q_{\text{máx,hor}}$ se resta la suma de todos los consumidores concentrados ΣQ_{conc} . De esta forma se obtiene el gasto Q_{dist} que se demanda en la red a través de las tomas distribuidas.

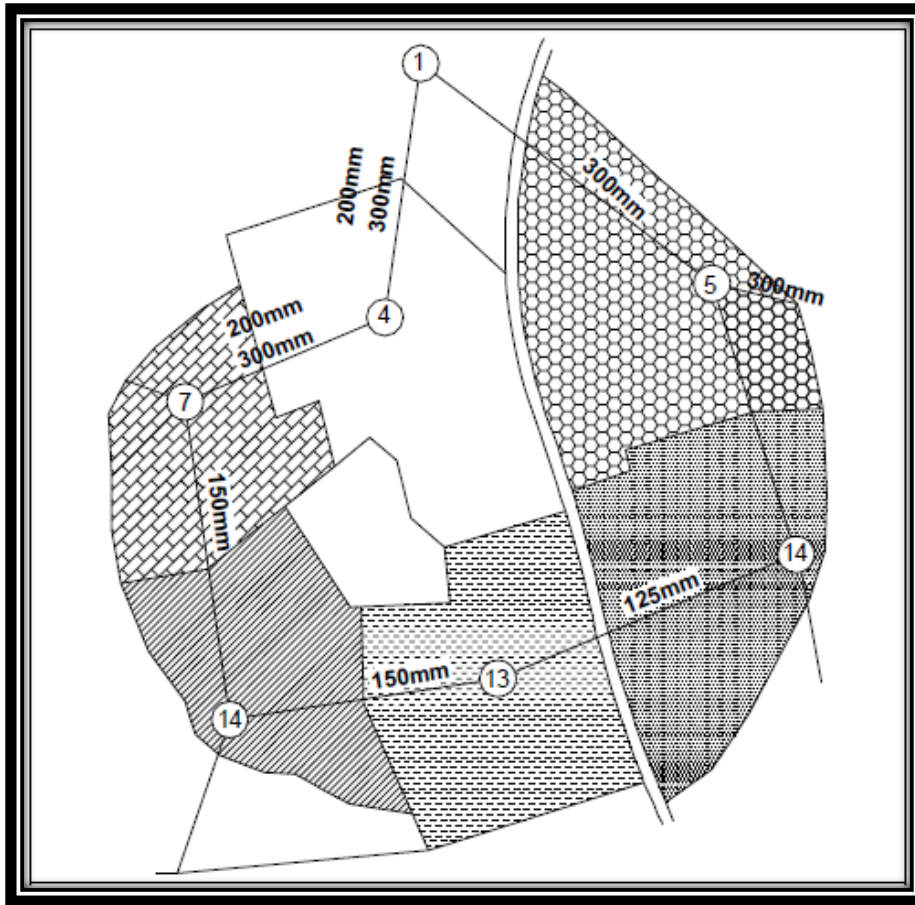


Figura 2.22 Áreas de influencia de los nodos.

$$Q_{dist} = Q_{max,hor} - \Sigma Q_{con} \quad (2.3)$$

El gasto unitario se obtiene dividiendo Q_{dist} por el área neta total. Gasto por lote o toma. Si se conoce el número de habitantes promedio por lote, se calcula el caudal requerido por lote multiplicando este número por la dotación; de manera similar se estima el consumo para usos no habitacionales. El caudal que entrega un tramo se compone por la suma de los caudales de los lotes atendidos por el tramo, como se muestra en la Figura 2.23.

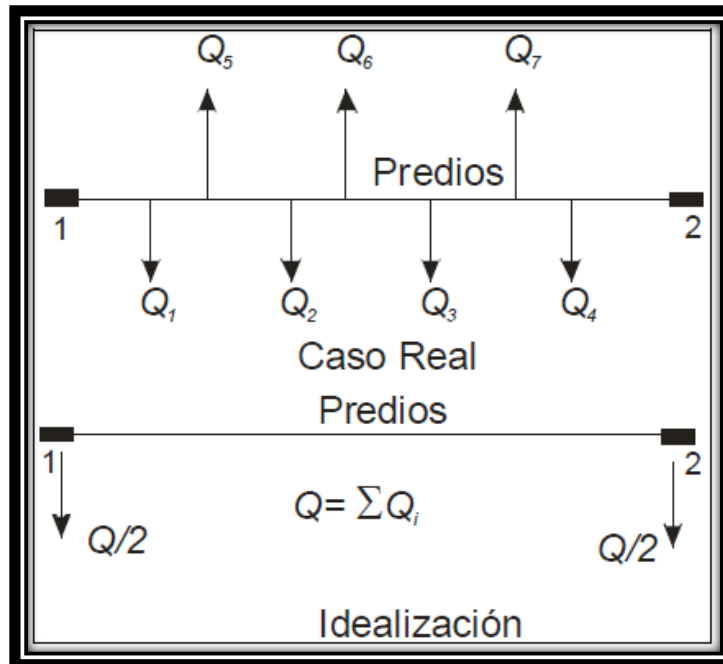


Figura 2.23 Consideración de la demanda por lote.

Efectuando este proceso en cada uno de los tramos, se obtienen los caudales de demandas en los nodos. Si en la red existen grandes consumidores concentrados, como industrias, hospitales, etc., éstos se representan a través de nodos con la demanda propia correspondiente.

Gasto por unidad de longitud: Cuando no se conocen con certeza las superficies que atenderá cada tramo, se divide el gasto total de la red entre la suma de las longitudes de todos los tramos. El gasto unitario resultante se multiplica por la longitud de cada tramo. Este procedimiento, aunque poco preciso, puede usarse en proyectos de redes para abastecer a zonas habitacionales. Sin embargo, en zonas industriales se recomienda utilizar los dos primeros métodos.

Es posible determinar un coeficiente gasto por unidad de longitud, dividiendo el gasto máximo horario entre la "longitud virtual" de toda la red. Un tramo de tubería que abastezca predios de un solo lado, como el A-B que se muestra en la Figura 2.24, distribuye menos gasto que el tramo C-D de la misma figura, debido a que este último abastece de agua a predios ubicados a cada lado del mismo. Si se trata de una zona con población uniformemente distribuida, resulta el tramo C-D distribuirá el doble el doble de gasto que el tramo A-B. La correlación de los gastos con las longitudes, es similar a considerar que el tramo C-D tuviera una longitud dos veces superior a la del tramo A-B, siendo que en realidad los dos tramos tienen la misma longitud. De acuerdo con esto, el tramo tiene una longitud real de 100 m, pero virtualmente tiene una longitud de 200 m. Para el tramo A-B, la longitud real será igual a la longitud virtual. En resumen:

- Para líneas de alimentación $L_{virtual}=0$
- Para tuberías que abastecen de agua a predios localizados a un solo lado de la línea:
 - $L_{virtual} = L_{real}$
- Para tuberías que abastecen de agua a predios localizados a ambos lados de la línea:
 - $L_{virtual} = 2 L_{real}$

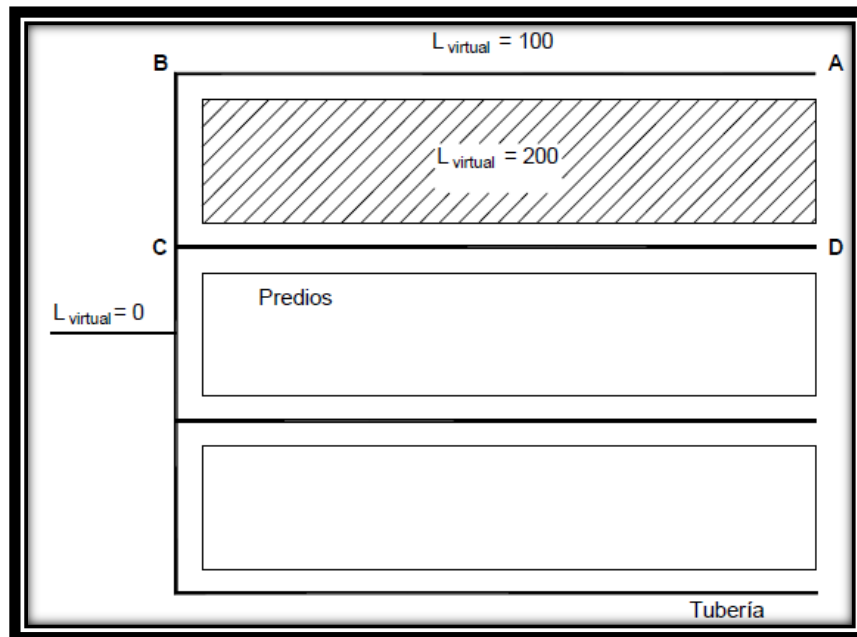


Figura 2.24 Tramos que abastecen precios a un solo lado (A-B) y a ambos lados (C-D).

Sumando las longitudes virtuales tramo a tramo de la red, se obtiene entonces el gasto unitario (gasto por metro de tubería) q , con la expresión siguiente:

$$q = \frac{Q_{m\acute{a}x,hor}}{\sum L_{virtual}} \quad (2.4)$$

donde:

q es el coeficiente de gasto por metro (L/s/m).

$Q_{m\acute{a}x, hor}$ es el gasto máximo horario (L/s).

$\sum L_{virtual}$ es la sumatoria de las longitudes virtuales de los tramos de la red (m).

Si al dividir la ciudad por zonas, se tienen concentraciones de población diferentes de una de otra, también el coeficiente de gasto por metro difiere de acuerdo con la zona.

De la misma forma variará dependiendo del tipo de usuarios (domésticos o industriales). Por tanto, los coeficientes de gasto se determinan usando las dotaciones y poblaciones de las zonas a las que alimenta el tramo considerado.

Al utilizar el gasto por unidad de longitud, la demanda se concentra en los nudos de la red de la siguiente manera:

- Del gasto máximo horario $Q_{\text{máx, hor}}$ se resta la suma de todos los consumidores concentrados ΣQ_{conc} . De esta forma se obtiene el gasto Q_{dist} que demanda la red mediante las tomas distribuidas.

$$Q_{\text{dist}} = Q_{\text{max,hor}} - \Sigma Q_{\text{con}}$$

- Se calcula la suma de las longitudes virtuales de todos los tramos de la red en los que hay o va a haber tomas.
- Se calcula el gasto máximo unitario q máximo horario.
- En cada tramo, en que se distribuye agua en tomas, se multiplica el gasto unitario q por la longitud virtual del tramo. El resultado se divide por dos y lo obtenido se suma a la demanda concentrada en los dos nudos del tramo.

Después de aplicar el proceso así descrito a todos los tramos, se obtienen las demandas concentradas en los nudos como una suma de los consumidores concentrados y las aportaciones de demanda distribuida en los tramos.

Generalmente algunos modelos de simulación (SCADRED®) integran este tipo de asignación de demanda dentro de ellos, por lo tanto, el usuario, no le será necesario realizar el procedimiento descrito anteriormente.

2.3.5 Realización de mediciones en la red

Para comparar los resultados del modelo con la realidad es necesario medir una serie de parámetros que permitan realizar la simulación para cada instante de tiempo. Estos son:

- Presión
- Caudal
- Niveles en los tanques
- Caudal inyectado a la red
- Operación de las estaciones de bombeo.

2.3.5.1 Número de mediciones

Antes de comenzar a definir el número necesario para poder realizar un proceso de calibración adecuado, será importante distinguir que existen dos formas de puntos de medición: Localización fija como son los puntos con telemetría instalada que sirven para control y operación de la red, y aquellos con localización móvil como son los realizados durante campañas de muestreo de presión y caudal dentro de la red de distribución.

Como se mencionó, un proceso fundamental es la determinación del número necesario de puntos de medición. Supóngase que se obtuvieran las medidas de presión en todos los nodos y en tramos las caudal, sería posible empleando un método determinista, ajustar los resultados de la simulación con los valores observados. Aun así, el sistema sería indeterminado, porque existiría más de una incógnita por tubería (rugosidad y fugas en el tramo) y otra por nodo (demanda).

Aunque de entrada se sabe que resulta prácticamente imposible, medir en todos los puntos de la red y de forma simultánea.

La calibración de puntos de medición aleatorios va a permitir aprovechar al máximo el limitado número de los aparatos de medición. Es importante establecer la localización de los puntos de medición, así como de la forma de éstas, buscando siempre la máxima facilidad de calibración con el mínimo de puntos de medición.

2.3.5.2 Medición de presión

De forma general existen una serie de recomendaciones realizadas por diferentes autores sobre cuántos y dónde se deberán realizar las mediciones de presión dentro de la red de distribución. A continuación se describen algunas de ellas:

- Como norma realizar mediciones de presión en al menos un 20% de los nodos de la red, o del sector considerado, [López, 2000];
- Las medidas de presión son más fáciles de realizar en comparación con las de caudal. Es importante mencionar que es difícil que su ubicación coincida exactamente con un nodo del modelo dado que cada uno éstos representan un determinado número de casas. Por lo anterior se buscará tomar lecturas de presión en un puntos próximos al nodo;
- Realizar las mediciones de presión preferentemente en tuberías porque así no se presentará una distorsión de esta variable, aunque se conoce que la mayoría de las mediciones se realizarán en las tomas domiciliarias;
- Realizar un levantamiento topográfico preferentemente en la red de distribución para obtener con precisión las cotas de terreno de los nodos y con ello alcanzar una mayor exactitud en los cálculos. O bien, de forma práctica un plano con las curvas de nivel de la zona donde se aplicará el modelo de simulación. Dependerá el grado de detalle que tenga el plano, será la precisión que se obtendrá en el modelo de simulación.
- En caso de tener sectorizada la red, se recomienda aprovechar ello y realizar las mediciones a la entrada de los mismos sectores. Con esto se reduce el número de puntos de medición;
- Situación opuesta al punto anterior, se presenta cuando la red no está sectorizada. En este caso no se conoce el balance de caudales en los sectores y con ello aumentará el número de puntos de medición de presión;

- La medición registrada por el registrador o data logger, puede presentar irregularidades, debido a numerosas causas como efectos transitorios, disminución de presión por arranque de algunos equipos, entre otros (Figura 2.25). Por lo anterior para poder trabajar con los datos obtenidos será necesario realizar un filtrado de la señal emitida por los equipos.
- El filtro consiste en eliminar del espectro de la señal las frecuencias menos significativas y considerar aquellas que son importantes.

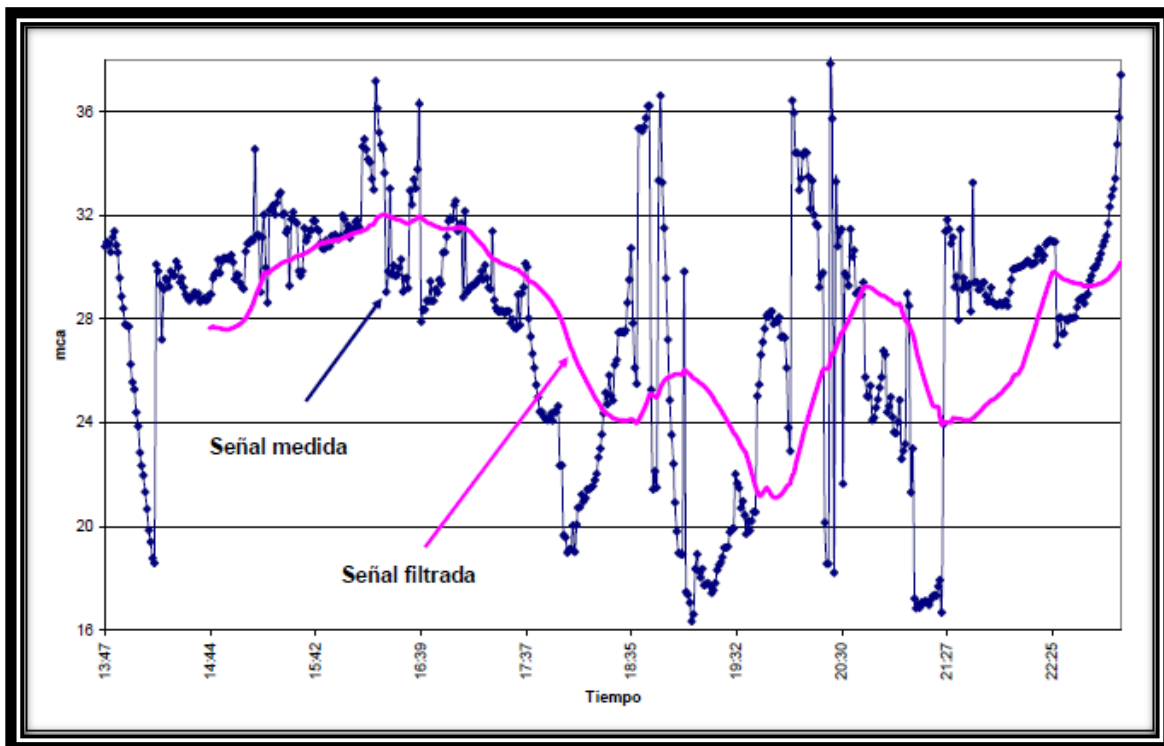


Figura 2.25 Evolución de presión medida con el datalogger y señal posteriormente filtrada, [Alcocer et al, 2003].

2.3.5.3 Mediciones de caudal

Resulta más difícil efectuar medidas de caudal en la red. La instalación de medidores ultrasónicos, electromagnéticos y volumétricos implica aislar el tramo de tubería donde se realiza la medición o bien tener un espacio adecuado dentro de una caja de válvulas. Esto puede implicar costo de excavación y dejar sin servicio zonas de la red por cierto tiempo. Por lo anterior una serie de recomendaciones para realizar este tipo de mediciones se enlistan a continuación:

- Realizar medición de caudal a través de equipos localizados en los puntos de inyección o a la entrada de los sectores de consumo;

- Como mínimo se requiere conocer el caudal que se inyecta desde cada una de las fuentes de abastecimiento (pozos, plantas de tratamiento, norias, entre otros) y el balance de caudal en los sectores de la red.

Si se analiza la expresión de la pérdida de carga, por ejemplo a través de la ecuación de Darcy-Weisbach, escrita en la siguiente forma:

$$h_f = \frac{8fl}{\pi^2 g d^5} Q^2 \quad (2.5)$$

donde:

| | |
|----------------|--|
| H _f | pérdidas de carga, (m); |
| F | coeficiente de fricción o cortante (adimensional); |
| L | longitud de la tubería, (m); |
| G | aceleración de la gravedad (m/s ²); |
| D | diámetro de la tubería (m); |
| Q | caudal sobre la tubería, (m ³ /s); |

Se observa que la pérdida de carga en las tuberías es más sensible al caudal que circula por ellas que a su rugosidad, siempre y cuando se mantenga constante el diámetro de la tubería.

Por esta razón, para el proceso de calibración será mejor realizar el ajuste con base a medidas de caudal que de presión y además normalmente se buscará inicialmente ajustar los caudales en los puntos donde conozcamos los caudales. Esto asegura que posteriores ajustes sean fiables.

2.3.5.4 Datos de telemetría

Estos datos generalmente son empleados durante la calibración de un modelo de periodos extendidos. El tipo de datos más común incluirá datos de caudal, niveles de agua en tanques y presiones en puntos específicos como plantas de bombeo, una válvula reductora de presión y otros. Dependiendo del nivel de instrumentación se obtendrá este tipo de datos. Normalmente la mayoría de los sistemas miden y registran los niveles en tanques y los caudales de las estaciones de bombeo en intervalos de una hora.

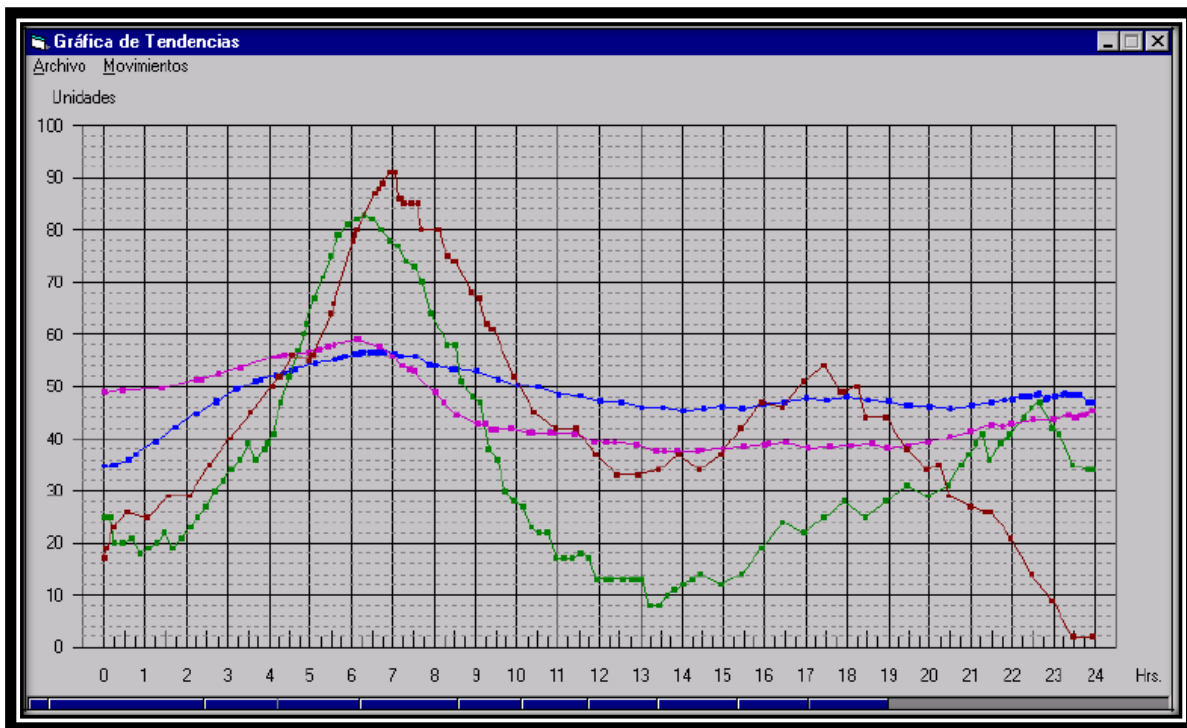


Figura 2.26 Registro de niveles a través de un sistema de telemetría en un tanque de regularización de Culiacán, Sin. [JAPAC, 2003].

Generalmente estos datos obtenidos a partir de equipo de telemetría, como el mostrado en la ilustración anterior, reflejan la evolución de la demanda y fugas en la zona. Vale la pena mencionar que deberá comprobarse primero la precisión de los datos, antes de usarlos para la calibración.

Asimismo en caso de no tener disponibles este tipo de datos deberán instalarse temporalmente medidores de presión o caudal para poder obtenerlos. En ocasiones en ausencia de medidores de caudal en las tuberías que llegan a los tanques, los caudales de entrada o salida pueden ser inferidos a partir de las lecturas de los niveles de agua en el tanque.

2.3.5.5 Datos de calidad del agua

En los últimos años se han utilizado sustancias conservativas, como trazadores para determinar el tiempo de viaje que le implica al flujo desplazarse de un lugar a otro en las distintas partes de la red de distribución, [Grayman, 1998].

Como se ha comentado, los modelos de calidad del agua dependen directamente de los modelos hidráulicos, es por ello que se deberá tener especial detalle en los datos proporcionados durante la simulación hidráulica, como son la presión y el caudal, ya que incidirán en los resultados de calidad del agua. Por lo anterior, se precisa que se requiere de

una calibración hidráulica con mayor detalle para casos donde se realizan simulaciones de calidad del agua de forma posterior.

Es importante considerar que la mayoría de los modelos de calidad del agua pueden ser empleados para representar sustancias conservativas y no conservativas, sin embargo el empleo de sustancias conservativas es más apropiado para la calibración de modelos hidráulicos. Esto se debe simplemente a que no se requiere realizar un cálculo sobre el decaimiento de la sustancia como se verá con mayor detalle en el capítulo cinco.

El trazador más empleado es el flúor. Controlando la velocidad de inyección en una fuente, normalmente la planta de tratamiento, se puede inducir un pulso de caudal y con ello sea monitoreado en cualquier punto del sistema, determinando el tiempo de viaje relativo desde la fuente hasta el punto de muestreo.

El tiempo de viaje proporciona otro elemento más en la calibración del modelo hidráulico de una red.

2.3.6 Evaluación de resultados del modelo hidráulico

Si bien no existe un criterio que pueda ser aplicado de forma universal, se tiene una serie de criterios aplicables en otros Países [Water Research Center (WRc), 1989]. Para modelos estáticos son los siguientes:

- Los caudales deberán coincidir hasta un 5% del caudal medido en campo. O bien, para caudales con tolerancia de 10% o menor, estos deberán representar menos de un 10% del total de la demanda.
- Las presiones deben coincidir hasta un 0.50 m o el 5% de la pérdida de carga para el 85% de las mediciones, hasta 0.75 m o 7.50% de la pérdida de carga para el 95% de las mediciones, y hasta 2 m o 15% de la pérdida de carga para el 100% de las mediciones.

En Estados Unidos por ejemplo, a través de la experiencia se ha sugerido una serie de criterios mínimos de calibración hidráulica, de acuerdo al objetivo que se presente (Tabla 2.3). Asimismo se describe el nivel de detalle en la Tabla 2.4

Tabla 2.3 Criterios de calibración hidráulica aplicados a redes de distribución de agua, [Haestad, 1999].

| Objetivo | Nivel de detalle | Tipo de simulación | Numero de lecturas de presión | precisión en las lecturas de presión | Numero de lecturas en caudal | Precisión de lecturas en caudal |
|-----------------|------------------|--------------------------------|-------------------------------|---|------------------------------|---------------------------------|
| Planeación | bajo | Estática o periodos extendidos | 10% de los nodos | +/- 3.50 mca para el 100% de las lecturas | 1% de las tuberías | +/- 10% |
| Diseño | Medio a alto | Estática o periodos extendidos | 2%-5% de los nodos | +/- 1.40 mca para el 90% de las lecturas | 3% de las tuberías | +/- 5% |
| Operación | Bajo a alto | Estática o periodos extendidos | 2%-10% de los nodos | +/- 1.40 mca para el 90% de las lecturas | 3% de las tuberías | +/- 5% |
| Calidad de agua | alto | Periodos extendidos | 2% de los nodos | +/- 2.10 mca para el 70% de las lecturas | 5% de las tuberías | +/- 2% |

Tabla 2.4 Nivel de detalle en lecturas de presión, [Haestad, 1999]

| Nivel de detalle | Numero de lectura de presión |
|------------------|------------------------------|
| Bajo | 10% de los nodos |
| Medio | 10% de los nodos |
| Alto | 10% de los nodos |

Es importante señalar que no son normas los anteriormente expuestos, sino simples sugerencias como lo ha mencionado el Comité de Aplicaciones Computacionales a la Ingeniería (Engineering Computer Applications Committee).

En general en Estados Unidos por ejemplo NO EXISTEN estándares en cuanto modelación se refiere. Algunos “modeladores” coinciden y determinan que de acuerdo al objetivo que se requiera será el nivel de modelación, como lo presentado en la Tabla 2.4. [Ormbee y Lingireddy, 1997; Cesario et al, 1996; Walski, 1995].

Para el caso de modelos de períodos extendidos, se requiere que sean realizadas tres calibraciones estáticas separadas para diferentes períodos de tiempo, además de las recomendaciones señaladas anteriormente.

Las diferencias entre los resultados del modelo y las mediciones se pueden deber a múltiples factores, entre los que se pueden citar los siguientes, [García, 2003]:

- Parámetros del modelo inexactos (rugosidades de las tuberías y distribución de las demandas nodales);
- Datos de la red erróneos, como son dimensión en diámetros, longitud de tuberías, ubicación de las mismas, entre otros;
- Topología incorrecta, existiendo tuberías conectadas a nodos equivocados, en ocasiones debido a la presencia de válvulas cerradas;
- Errores en los horarios de operación en los equipos (bombas que arrancan y paran en instantes diferentes a la realidad);
- Errores en los equipos de medición, por ejemplo, manómetros sin calibrar o mal calibrados;
- Errores en la medición, esto es, lecturas erróneas de los equipos de medición.

Los errores en los equipos de medición y en lecturas pueden ser minimizados desarrollando e implementando un cuidadoso programa de mediciones. Sin embargo, la mayoría de los factores que afectan los resultados del modelo requieren de la aplicación de las fases del proceso de calibración:

- 1) Precalibrado del modelo,
- 2) Análisis de sensibilidad,
- 3) Ajuste fino del modelo.

2.3.7 Precalibrado del modelo

Si uno o más de los valores medidos de las variables del modelo difiere en un orden de magnitud excesivo con respecto a las mediciones realizadas, esto mayor a un 30%, la causa normalmente no se debe a la estimación de la rugosidad de las tuberías o a las demandas nodales. Las causas de estas diferencias pueden tener su origen en los factores mencionados con anterioridad.

Sin importar la causa, hasta que los resultados del modelo y las mediciones en la red de distribución no tengan una diferencia razonable, esto es menor al 20% de error, no se podrá pasar a un ajuste fino del modelo.

La única forma de tratar adecuadamente estos errores es revisar los datos asociados con el modelo y compararlos con los datos de campo, para así asegurarse de la precisión del modelo.

Normalmente el responsable de la modelación identifica cuales son los datos con menor confiabilidad, lo que puede proporcionar un punto de inicio para tratar de identificar el problema de las enormes diferencias.

Adicionalmente se pueden realizar análisis de sensibilidad en cada una de las variables involucradas en el modelo y con ello a través de otro procedimiento identificar el origen de las diferencias.

2.3.8 Análisis de sensibilidad

Antes de realizar un ajuste “fino” del modelo, es útil realizar un análisis de sensibilidad del modelo para identificar el origen de los errores observados.

El análisis de sensibilidad consiste en variar los diferentes parámetros del modelo con distintos valores, y con ello medir el efecto asociado. Examinando estos resultados, se pueden empezar a identificar qué parámetros tienen un impacto más significativo en los resultados del modelo.

2.3.9 Ajuste fino del modelo

Una vez realizados los procesos de precalibrado y análisis de sensibilidad, se deberá realizar un ajuste con mayor detalle del modelo de simulación hidráulica.

Los dos parámetros que se incluyen en esta fase de calibración serán el coeficiente de rugosidad y las demandas nodales.

Normalmente este tipo de ajuste se orienta hacia los dos tipos de modelos que se ha venido comentando: estático y de períodos extendidos. Para el caso de la calibración estática, los parámetros del modelo se ajustan para que se cumplan las presiones y caudales asociados con observaciones estáticas. Por su parte en la calibración de períodos extendidos, los parámetros se ajustan para que se verifiquen las presiones y caudales variables en el tiempo, así como las trayectorias de los niveles en tanques o depósitos.

Es importante mencionar que la calibración estática es más sensible a cambios en el coeficiente de rugosidad de las tuberías. Las demandas en los nodos por su parte, hará que la calibración de períodos extendidos sea más susceptible. La mayoría de los responsables de la simulación de una red, históricamente han empleado un método empírico a prueba y error. Esto trae como consecuencia que el proceso de calibración sea lento y a la vez frustrante.

De forma resumida se puede describir el proceso de calibración hidráulica de la forma siguiente:

- Se proponen valores iniciales en los parámetros;
- Se realiza una simulación con el modelo, considerando los parámetros del punto anterior;
- Se hacen mediciones en la red de distribución;

- Se comparan los valores obtenidos en campo y gabinete, y en los casos en que las diferencias son importantes se modifican los parámetros de entrada del modelo (ver inciso uno);
- Del inciso dos al cuatro se repiten hasta obtener una tolerancia aceptable con base en las recomendaciones expuestas en la Tabla 2.3 y Tabla 2.4.

Habrá que recordar que generalmente los parámetros que se calibran son los siguientes: demanda y coeficiente de cortante (fricción). Y los que se miden son gasto, presión y niveles del agua en tanques o depósitos. Lo anterior será independientemente del modelo o programa de simulación elegido.

Sin embargo, diversos investigadores han propuesto diferentes algoritmos para su uso en modelos de redes calibrados automáticamente. Estos generalmente se basan en técnicas con ecuaciones analíticas [Walski, 1983], modelos de simulación [Boulos y Ormsbee, 1991] y métodos de optimización [Meredith, 1983]. La mayoría de ellos no obstante resultan ser teóricos, por lo que no han encontrado aplicación. En Tabla 2.5 se resume el estado del arte sobre este proceso, desde los años setenta [Kapelan, et al, 2000].

Tabla 2.5 Modelos de calibración hidráulica aplicados a redes de distribución, [Kapelan, et al, 2000]

| Referencias | No. de tanques | No. de fuentes | Modelo hidráulico | Modelo de demanda | Algoritmo de control | Política de control E | Comentarios |
|-----------------------------|----------------|----------------|--|-------------------|--------------------------------------|-----------------------|---|
| De Moyer y Horowitz (1975) | Uno | Una | Hidráulica simplificada | Global | Programación dinámica (PD) | Explícita | Combinación de bombas determinadas en un modelo PD con una representación hidráulica simplificada (modelo macroscópico) |
| Sterling y Coulbeck (1975b) | Múltiple | Múltiple | Balance de materia | Global | Programación lineal cuadrática (LQP) | Implícita | Combinación de bombas determinadas en un modelo PD con una representación hidráulica simplificada (modelo macroscópico) |
| Sterling y Coulbeck (1975a) | Uno | Múltiple | Balance de materia | Global | PD | Implícita | Combinación de bombas determinadas en un modelo PD con una representación hidráulica simplificada (modelo macroscópico) |
| Fallside y Perry (1975) | Múltiple | Múltiple | Balance de materia (ecuación hidráulica linealizada) | Global | LQP | Implícita | Combinación de bombas determinadas en un modelo PD con una representación hidráulica simplificada (modelo macroscópico) |

Tabla 2.5 Modelos de calibración hidráulica aplicados a redes de distribución, [Kapelan, et al, 2000] (continuación)

| Referencias | No. de tanques | No. de fuentes | Modelo hidráulico | Modelo de demanda | Algoritmo de control | Política de control E | Comentarios |
|--|----------------|----------------|--------------------------------|-------------------|------------------------------|-----------------------|--|
| Joalland y Cohen (1980); Carpentier y Cohen (1984) | Múltiple | Múltiple | Balance de materia | Global | PD | Implícita | Combinación de bombas determinadas en un modelo PD con una representación hidráulica simplificada (modelo macroscópico) |
| Coulbeck (1984) | Uno | Una | Hidráulica simplificada | Global | PD | Explícita | Aproximación para un sistema de tipo fuente-resistencia-depósito con hidráulica en línea. Simplificación similar a DeMoyer y Horowitz (1975). Extendido a casos especiales de sistemas multifuente y multitanque |
| Sabet y Helweg (1985) | Uno | Múltiple | Regresión no lineal | Proporcional | PD | Implícito | Utiliza una sola fuente de bombeo pero desprecia la interacción entre bombas al calcular relaciones hidráulicas |
| Whaley y Hume (1986) | Múltiple | Múltiple | Ecuación no lineal del sistema | Proporcional | Programación no lineal (NPL) | Explícita | Algoritmos de sistema de basado en gradiente NPL ponderado con penalidades. |
| Solanos y Montoliu | Múltiple | Múltiple | Balance de materia | Global | PD/LQP | Implícita | Controles globales optimizados se determinan en una aproximación óptima de control PD. |

Tabla 2.5 Modelos de calibración hidráulica aplicados a redes de distribución, [Kapelan, et al, 2000]

| Referencias | No. de tanques | No. de fuentes | Modelo hidráulico | Modelo de demanda | Algoritmo de control | Política de control E | Comentarios |
|-----------------------------|----------------|----------------|--------------------|-------------------|--|-----------------------|--|
| Chen (1988a) | Ninguno | Múltiple | Balance de materia | Global | NPL | Implícita | Determina la situación de la demanda entre fuentes usando una función de Lagrange. |
| Jowitt y otros (1988) | Múltiple | Múltiple | Balance de materia | Global | Programación líneas (PL) | Explícita | Se determina el tiempo de funcionamiento de las bombas |
| Tatejewski (1988) | Múltiple | Múltiple | Balance de materia | Global | LQP | Implícita | Aproximación de dos niveles con caudales de estación de bombeo determinadas a un nivel superior usando aproximaciones de coste continuas. |
| Coulbeck y otros (1988 a,b) | Múltiple | Múltiple | Balance de materia | Global | NPL/Programación explícita integral (IP) | Explícita | Modelo de tres niveles que fija trayectorias de tanque por NPL en el nivel superior. Ésta pasa a los niveles inferiores para seleccionar combinaciones de bombas en un IP. |

Tabla 2.5 Modelos de calibración hidráulica aplicados a redes de distribución, [Kapelan, et al, 2000] (continuación)

| Referencias | No. de tanques | No. de fuentes | Modelo hidráulico | Modelo de demanda | Algoritmo de control | Política de control E | Comentarios |
|----------------------------|----------------|----------------|-------------------------------|-------------------|------------------------|-----------------------|---|
| Ormsbee y otros (1989) | Uno | Múltiple | Regresión no lineal | Proporcional | PD | Explícita | Se determina la trayectoria óptima de los tanques para determinar combinaciones exactas de bombas usando curvas de regresión para el modelo del coste e hidráulico. |
| Lannuzel y Ortelano (1989) | Uno | Múltiple | Ecuación de sistema no lineal | Distribuido | Heurística | Explícita | La heurística de la operación se captura en un sistema ligado a un simulador. |
| Little y McCrodden (1989) | Ninguno | Una | Hidráulica simplificada | Ninguna | Mezcla integral (PIML) | Explícita | Los tiempos de operación de bomba para un sistema de suministro a altura constante de tanque via tubería se determinan en un modelo de PL integrado. |
| Zessler y Shamir (1989) | Múltiple | Múltiple | Balance de materia | Global | PD | Implícita | El sistema de suministro regional se descompone espacialmente con un solo depósito y demanda de nodo equivalente en cada subsistema. Se determinan los caudales óptimos por PD y se convierten mediante lógica a operaciones discretas. |

Tabla 2.5 Modelos de calibración hidráulica aplicados a redes de distribución, [Kapelan, et al, 2000] (continuación)

| Referencias | No. de tanques | No. de fuentes | Modelo hidráulico | Modelo de demanda | Algoritmo de control | Política de control E | Comentarios |
|-------------------------------|----------------|----------------|--------------------------------|-------------------|-------------------------|-----------------------|---|
| Chase y Ormsbee (1989, 1991) | Múltiple | Múltiple | Ecuación del sistema no lineal | Distribuido | NPL | Explícita | Modelo de simulación optima ligada utilizando tiempos de bombeo como decisiones para intervalos de tiempo fijos (Chase y Ormsbee, 1989) y variable (Chase y Ormsbee, 1991). |
| Jowitt y Germanopoulos (1992) | Múltiple | Múltiple | Simplificada | Distribuido | PD | Explícita | Los tiempos de bombeo son decisiones con salida hidráulica de bomba constante debido a la diferencia de altura entre fuente y usuario. |
| Awumah y Lansey (1992) | Único | Múltiple | Regresión no lineal | Proporcional | PD | Explícita | Operaciones discretas de bombeo con límite de conexión y desconexión de bomba. |
| Ormsbee y Lingireddy (1995a) | Múltiple | Múltiple | Ecuación del sistema no lineal | Distribuido | Heurística | Explícita | Usa un algoritmo heurístico basado en un algoritmo de optimización. |
| Ormsbee y Lingireddy (1995b) | Múltiple | Múltiple | Red neuronal | Distribuido | Algoritmo Genético (GA) | Explícita | Relaciona un algoritmo de optimización genética con un modelo de red neuronal de respuesta del sistema. |

**Tabla 2.5 Modelos de calibración hidráulica aplicados a redes de distribución,
[Kapelan, et al, 2000] (continuación)**

| Referencias | No. de tanques | No. de fuentes | Modelo hidráulico | Modelo de demanda | Algoritmo de control | Política de control E | Comentarios |
|-----------------------|----------------|----------------|---------------------------------|-------------------|----------------------|-----------------------|--|
| Lansey y Zhong (1990) | Múltiple | Múltiple | Sistema de ecuación no lineal | Distribuido | NPL | Explícita | La simulación ligada a la optimización determina la optima energía añadida en la estación de bombeo. Se convierte a operaciones discretas en un modelo PD. |
| Ulanicki y Orr (1991) | Múltiple | Múltiple | Balace de masa | Distribuido | NPL/PIML | Explícita | El modelo de dos niveles selecciona tiempos de bombeo para cumplir con caudales de nivel superior en el depósito. Se usa el modelo aproximado de balance de materia para el nivel superior y un sistema global de ecuaciones para el nivel inferior. |
| Brion y Mays (1991) | Múltiple | Múltiple | Sistema de ecuaciones no lineal | Distribuido | NPL | Explícita | Extensión de Chase y Ormsbee (1989) para considerar gradientes analíticos |

2.4 RESUMEN

Es importante mencionar que los criterios de calibración hidráulica aplicados a redes de distribución mostrados con anterioridad, son considerados como una serie de recomendaciones. Lo anterior se manifiesta al no existir normas de calibración de redes de distribución aún en países desarrollados.

Asimismo se tiene que considerar que dentro de la literatura internacional existen formas o métodos de calibración que resultan prácticamente imposibles de aplicar en países como el nuestro, como son a través de hidrantes. Esto se debe a que en nuestro país no existe el nivel de operación que se tiene en otros, predominando el servicio discontinuo y presiones de operación más bajas.

CAPÍTULO 3. FUNDAMENTOS DE LA COMPUTACIÓN EVOLUTIVA, ALGORITMOS GENÉTICOS

3.1 FUNDAMENTOS

La computación evolutiva es una rama de la computación y la inteligencia artificial que comprende métodos de búsqueda y aprendizaje automatizado inspirados en los mecanismos de la evolución natural. Diversos enfoques a la computación evolutiva han sido propuestos: las estrategias evolutivas, los algoritmos genéticos, la programación genética y los clasificadores genéticos entre otros. A estos métodos se les denomina de manera colectiva como *algoritmos evolutivos*, entre los cuales los más conocidos son probablemente los *algoritmos genéticos*. Estos algoritmos han sido aplicados exitosamente en la resolución de problemas en distintas ramas de la ingeniería, el diseño, la industria, la economía y las ciencias naturales.

3.2 LA COMPUTACIÓN EVOLUTIVA

La computación evolutiva emula a la evolución natural en el diseño e implementación de herramientas computacionales para la resolución de problemas. A partir de 1960, varios modelos de computación evolutiva han sido propuestos y estudiados, a los cuales se les denomina colectivamente como algoritmos evolutivos (Eiben y Smith, 2003). Estos algoritmos han sido aplicados a una amplia variedad de problemas encontrados tanto en la industria y el comercio, como en la investigación científica de punta. Es suficiente decir que los algoritmos evolutivos emulan a la evolución natural y comprenden:

- Una representación o codificación de las soluciones potenciales al problema bajo estudio
- Una población (conjunto de individuos) de estas soluciones potenciales
- Mecanismos para generar nuevos individuos o soluciones potenciales al problema estudiado, a partir de los miembros de la población actual (los denominados operadores de mutación y recombinación)
- Una función de desempeño o evaluación (del inglés *fitness function*) que determina la calidad de los individuos en la población en su capacidad de resolver el problema bajo estudio
- Un método de selección que otorgue mayores oportunidades de sobrevivir a las buenas soluciones

Tabla 3.1 Analogías entre aspectos de la evolución natural y los algoritmos evolutivos

| Naturaleza | Algoritmos Evolutivos |
|-------------------------------|--|
| Individuo | Solución al problema |
| Población | Conjunto de soluciones |
| Adecuación (<i>fitness</i>) | Calidad de la solución |
| Cromosoma | Representación o codificación de una solución |
| Gen | Parte o componente de la representación de una solución |
| Mutación y recombinación | Operadores de búsqueda |
| Selección natural | Preservación o re-utilización de buenas soluciones (o sus componentes) |

La Tabla 3.1 muestra las analogías entre la evolución natural y los algoritmos evolutivos, mientras que la Figura 3.1 ilustra el esquema general de un algoritmo evolutivo. Una población de M individuos es inicializada y sujeta a evolución simulada de una generación a la siguiente a través de la aplicación sucesiva de los operadores de selección de progenitores, recombinación, mutación, evaluación de la función de desempeño y selección de sobrevivientes. Este ciclo es interrumpido luego de un número fijo de iteraciones (generaciones), o cuando la solución encontrada es de calidad aceptable para el problema bajo estudio.

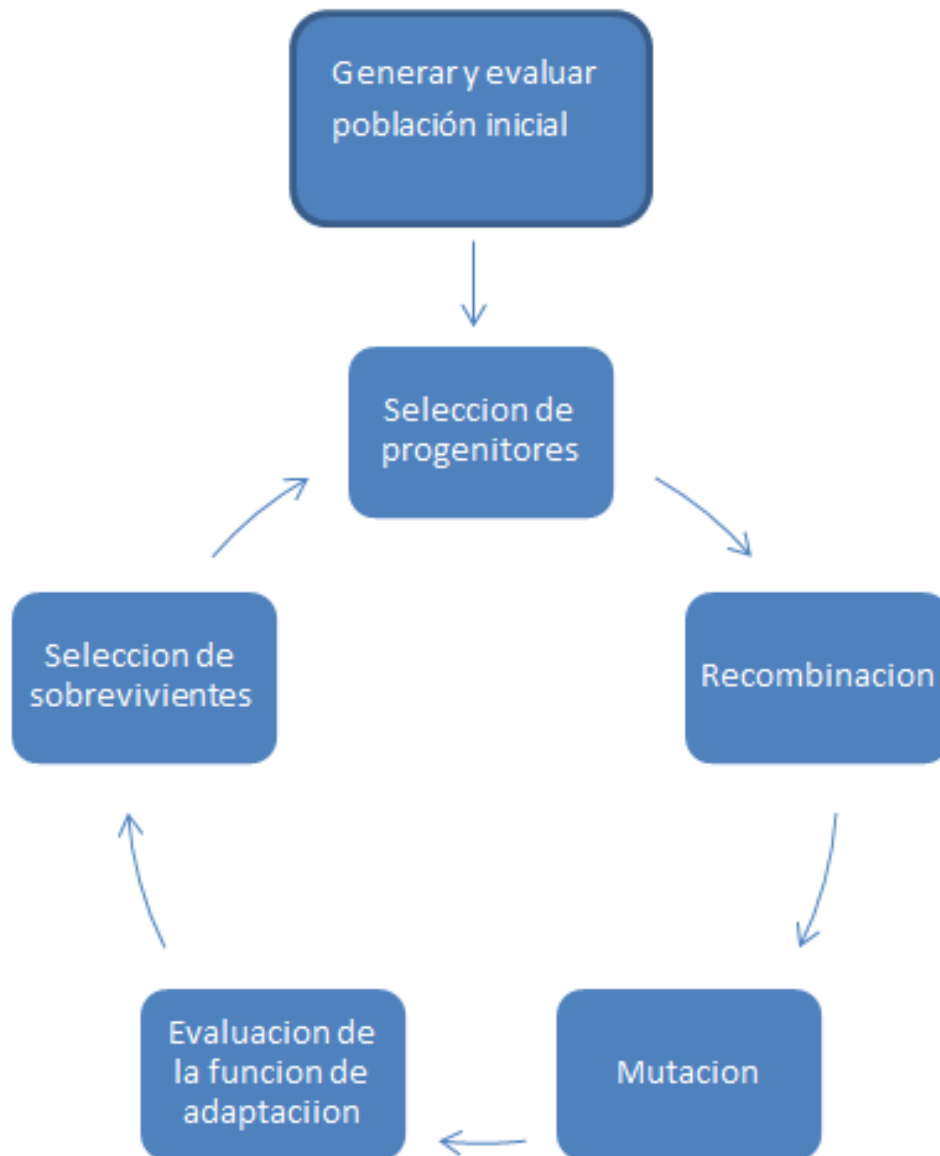


Figura 3.1 Esquema general de un algoritmo evolutivo

Históricamente, existen tres enfoques bien definidos, con origen independiente, a la computación evolutiva: la programación evolutiva (Fogel, Owens, y Walsh, 1966), las estrategias evolutivas (Rechenberg, 1973) y los algoritmos genéticos (Holland, 1975). Aunque similares a nivel conceptual, estos enfoques difieren en la manera de implementar el algoritmo evolutivo. Estas diferencias tocan distintos aspectos del algoritmo incluyendo la manera de representar los individuos, los mecanismos de selección, y el énfasis y tipo de operadores de variación genética utilizados. Aunque no es posible hacer en este capítulo una revisión rigurosa de todos los enfoques recientes a la computación evolutiva, cabe mencionar los algoritmos genéticos con representación ordinal (Goldberg, 1989), los clasificadores genéticos (Holland, 1986) y la programación genética (Koza, 1992), como

ramificaciones de los algoritmos genéticos que se han desarrollado y aplicado ampliamente. Los algoritmos genéticos con representación ordinal se utilizan en la resolución de problemas de optimización combinatoria, donde el espacio de búsqueda se compone de permutaciones (ordenamientos de los números enteros), como por ejemplo el famoso problema del agente viajero (que debe recorrer una ruta de varias ciudades, volviendo a la ciudad de origen, mientras minimiza la distancia o el costo de la ruta). En este caso los individuos se codifican como permutaciones de los números enteros y los operadores genéticos (Ej. Inversión y reordenamiento) deben diseñarse de manera de producir permutaciones. Los sistemas clasificadores genéticos utilizan un algoritmo evolutivo para explorar el espacio de reglas de producción de un sistema de aprendizaje capaz de inducir nuevo conocimiento y generalizar. Finalmente, la programación genética aplica búsqueda evolutiva en el espacio compuesto por programas de computadora en un lenguaje de programación que puede modificarse utilizando operadores de mutación y recombinación. Cabe mencionar que en la actualidad hay gran interacción y comunicación entre los investigadores de los distintos enfoques a la computación evolutiva; las fronteras entre estos métodos han desaparecido hasta cierto punto.

A continuación se presenta una descripción más detallada de los algoritmos evolutivos más comúnmente utilizados, los denominados algoritmos genéticos:

3.2.1 Representación genética o codificación

Para poder aplicar algoritmos genéticos a un problema dado, es necesario poder representar a las soluciones potenciales al mismo como un conjunto de parámetros o componentes (llamados genes). Estos parámetros o componentes se juntan para formar una secuencia o cadena que representa una solución o individuo; a la que se denomina también cromosoma o genotipo. Nótese que la terminología de las ciencias biológicas es utilizada para denominar los componentes análogos (ampliamente simplificados) en los algoritmos genéticos. Tradicionalmente, la representación en los algoritmos genéticos consiste en cadenas de caracteres binarios. Esta cadena de dígitos binarios o bita es posteriormente decodificada para constituir los parámetros o componentes del problema en cuestión (Figura 3.2). Sin embargo, muchas otras representaciones, como las mencionadas permutaciones, conjunto de reglas, estructuras ramificadas, vectores de números reales, programas por computadora, etc. han sido utilizadas exitosamente.

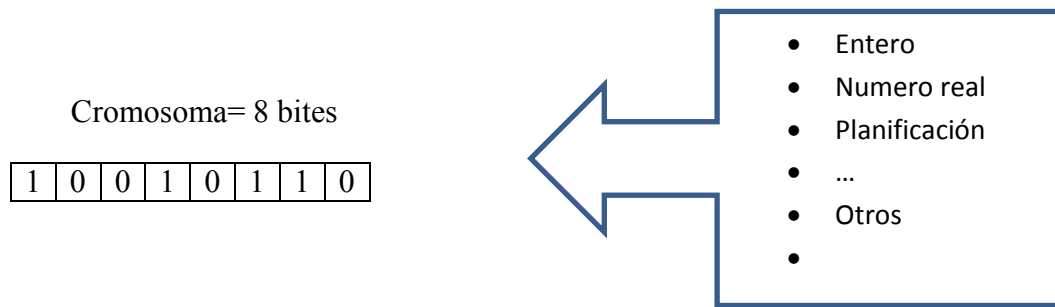


Figura 3.2 La representación genética puede basarse en valores discretos; binarios, enteros u otro sistema o alfabeto con un conjunto discreto de valores. El cromosoma o genotipo es posteriormente decodificado en los parámetros o componentes asociados al problema bajo estudio (fenotipo).

3.2.2 Función de evaluación o desempeño

Una función de desempeño (también llamada función de evaluación, función objetivo o función de fitness) debe diseñarse para cada problema a ser resuelto. El propósito de esta función es el de medir la calidad de los cromosomas en su capacidad de resolver el problema bajo estudio. Para algunos problemas (Ej. La optimización de funciones reales o la optimización combinatoria) la definición de la función objetivo resulta evidente y sencilla, pero esto no es así en aplicaciones del mundo real, donde la definición de la función de desempeño puede requerir la implementación de un complejo modelo de simulación.

3.2.3 Operadores genéticos

Los operadores genéticos introducen diversidad genética en la población; su propósito es generar nuevos individuos a partir de los individuos existentes en la población actual. Los algoritmos genéticos contienen dos tipos principales de operadores: la recombinación y la mutación los cuales están inspirados en los mecanismos análogos de la reproducción en la naturaleza. Cada operador tiene un parámetro asociado que controla la probabilidad de su aplicación en cada iteración (generación) del algoritmo. El cómo asignar estos parámetros es todavía tema de investigación, ya que es conocido que el funcionamiento del algoritmo es muy sensible a los valores de los mismos.

3.2.4 Mutación

Cuando la representación genética consiste en una cadena de bits, el operador de mutación simplemente altera un bit, es decir, lo cambia de 0 a 1 o viceversa. La probabilidad de que un bit sea alterado depende de un parámetro: la probabilidad o tasa de mutación. Los bits de la cadena son mutados de manera independiente, es decir, la mutación de un bit no altera la probabilidad de mutación de los otros bits (Figura 3.3). Para representaciones distintas a las cadenas de bits, otros operadores de mutación deben ser diseñados. La idea detrás de un operador de mutación es la de realizar una alteración o perturbación pequeña al genotipo,

para generar un individuo ligeramente distinto pero relacionado con el progenitor. Tradicionalmente, la mutación se considera como un operador secundario en los algoritmos genéticos, cuyo rol es el de restaurar el material genético perdido, siendo la recombinación el principal operador de búsqueda. Sin embargo, algunos investigadores sostienen que un método basado en mutación y selección resulta un algoritmo de búsqueda poderoso; y que el rol de la mutación en los algoritmos genéticos ha sido sub-estimado mientras que el de la recombinación sobre-estimado.

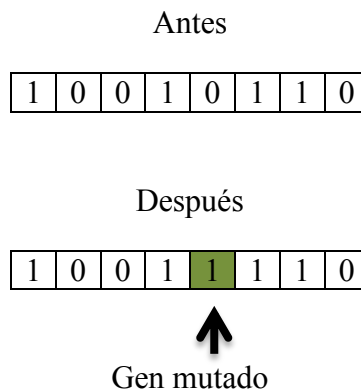


Figura 3.3 El operador de mutación sobre cadenas de bits, se aplica con probabilidad p_m para cada bit

3.2.5 Recombinación

La recombinación o crossover se considera el operador de búsqueda principal en los algoritmos genéticos. Este operador produce individuos descendientes a partir de combinar o mezclar el material genético de dos (o más) individuos progenitores. La motivación detrás de este operador es que la mezcla de sub-partes de los progenitores puede crear nuevos individuos con combinaciones favorables de genes. La aplicación de la recombinación es controlada por un parámetro (la probabilidad o tasa de cruce). Varios operadores de recombinación han sido propuestos en la literatura. Los más conocidos son los de un punto, dos puntos, múltiples puntos y uniforme. En la recombinación de un punto, un único punto de corte es seleccionado aleatoriamente en los progenitores; luego los segmentos antes y después del punto de corte son intercambiados. La recombinación de múltiples puntos es una generalización de esta idea que introduce varios puntos de corte e intercambia los segmentos entre dichos puntos. En la recombinación uniforme, los segmentos intercambiados se reducen a bits únicos. En lugar de puntos de corte, se sortea aleatoriamente de cual progenitor proviene cada bit. La Figura 3.4 ilustra la operación de la recombinación de dos-puntos (izquierda) y uniforme (derecha) sobre cadenas de bits. Varios trabajos han comparado el desempeño de los distintos operadores de recombinación, sin embargo, no hay evidencia concluyente sobre cuál es mejor. Es probable que la elección del operador más adecuado sea dependiente del problema. Parece haber, sin embargo, un consenso general respecto a las ventajas de los operadores de dos puntos y uniforme sobre

el operador de un punto. Tal como ocurre con la mutación, para representaciones genéticas distintas de las cadenas de bits, operadores de recombinación especializados y capaces de preservar la estructura genética, deben ser diseñados.

| | | | | | | | | |
|-----------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| P2 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| H1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| H2 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |

| | | | | | | | | | | |
|-----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| P2 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| T | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| H1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| H2 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |

Figura 3.4: Ilustración de los operadores de recombinación más comúnmente utilizados para la representación binaria. Izquierda: recombinación de dos puntos, se seleccionan 2 puntos de corte, y se intercambian los segmentos entre ellos. Derecha: recombinación uniforme, se intercambian bits, para cada bit del hijo se selecciona aleatoriamente de qué padre procede.

3.2.6 Selección

La selección se encarga de asignar oportunidades de reproducción a cada uno de los miembros de la población. Mientras más alto sea el valor de la función de desempeño de un individuo, más oportunidades tendrá de reproducirse. En los algoritmos evolutivos, la selección debe ser balanceada con los operadores de variación (mutación y recombinación). Todo algoritmo de búsqueda debe balancear estas dos fuerzas opuestas: la exploración de nuevas zonas en el espacio de búsqueda, y la explotación de zonas promisorias del mismo que ya han sido descubiertas. La selección es el componente que determina principalmente las características del proceso de búsqueda. Si la selección es muy fuerte, individuos de calidad sub-óptima pueden dominar la población y por lo tanto reducir la diversidad genética requerida para el cambio y el avance; por otro lado, una selección muy débil puede resultar en un proceso evolutivo muy lento. Varios esquemas de selección han sido propuestos en la literatura: selección proporcional, por escalamiento, por torneo, basada en rango, etc. No existe consenso respecto a cuál esquema es preferible, aunque algunos son más sencillos conceptualmente que otros, y por tanto más fáciles de implementar.

3.2.7 Reemplazo poblacional

Pueden distinguirse dos modelos básicos para realizar el reemplazo de una población simulada de una generación o iteración del algoritmo a la siguiente: en el modelo generacional, toda la población es reemplazada en cada generación; mientras que en el modelo de estado-estacionario, solo pocos individuos son reemplazados en cada generación (típicamente uno o dos). Entre estos dos extremos, se encuentra el llamado “gap” (brecha)

generacional, el cual define un porcentaje (gap) de los individuos que serán reemplazados cada generación.

3.2.8 Otros aspectos y consideraciones al diseñar algoritmos evolutivos

Para culminar esta sección, nos referimos a algunos componentes adicionales y consideraciones a la hora de diseñar e implementar algoritmos genéticos (o evolutivos).

3.2.9 Criterio de terminación

El ciclo evolutivo debe interrumpirse en algún momento para obtener las soluciones al problema estudiado; tradicionalmente el denominado criterio de terminación en los algoritmos genéticos consiste en un número fijo de iteraciones o generaciones del algoritmo. Frecuentemente un número fijo de evaluaciones de la función objetivo es considerado en lugar de un número fijo de generaciones. Esto permite la comparación en cuanto al desempeño de algoritmos bajo el modelo generacional y el modelo de estado-estacionario, así como la comparación de los algoritmos evolutivos con otros métodos heurísticos. Otros criterios de terminación comúnmente utilizados son:

- (i) cuando se alcanza un mínimo de diversidad genética en la población,
- (ii) un tiempo de cómputo fijo,
- (iii) cuando ha transcurrido cierto número de generaciones sin ninguna mejoría en la función de desempeño.

3.2.10 Medidas del funcionamiento del algoritmo

En vista de que los algoritmos evolutivos tienen un componente estocástico, el desempeño de los mismos no puede basarse en una única corrida. Generalmente deben considerarse estadísticas adecuadas a partir un número suficientemente grande de corridas del algoritmo. Las medidas de calidad del algoritmo son requeridas cuando quieren hacerse comparaciones entre distintos algoritmos, variaciones del mismo algoritmo (incluyendo distintos valores de los parámetros). Distintas medidas se han propuesto para evaluar la calidad de las soluciones obtenidas, así como para medir la velocidad de convergencia de los algoritmos.

3.2.11 Diseño y parametrización del algoritmo

Considerando las diversas posibilidades para los mecanismos de selección, esquemas de reemplazo poblacional, operadores genéticos, criterios de terminación y valores de los parámetros evolutivos; el algoritmo genético no es un algoritmo único sino una familia de posibles algoritmos. Para complicar aún más el asunto, existen pocos resultados teóricos y sugerencias concretas sobre cómo tomar las decisiones de diseño y asignar los valores de los parámetros evolutivos.

Cuando se quiere aplicar un algoritmo evolutivo en la resolución de un problema dado, dos pasos principales son requeridos:

- (i) el diseño de una representación o codificación adecuada, y
- (ii) el diseño e implementación de la función de desempeño. Estos dos componentes conforman el vínculo entre el algoritmo y el problema.

Otras decisiones que deben considerarse son:

- (a) el método de selección a utilizar y sus respectivos parámetros,
- (b) los operadores genéticos a utilizar, y
- (c) los valores de los parámetros evolutivos (tamaño de la población y tasas de aplicación de los operadores genéticos).

CAPÍTULO 4. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA EL DISEÑO

4.1 ALGORITMOS GENÉTICOS

4.1.1 Definición

En 1953, los trabajos conjuntos de varios investigadores y, en especial, de James Watson y Francis Crick, cuyo resultado fue el descubrimiento de la estructura química del ADN dieron lugar a la complementación de los conceptos biológicos más importantes: el de fenotipo de un organismo con el de genotipo de un organismo.

El genotipo de un organismo se refiere a la composición de su ADN como tal; es decir, la secuencia exacta de bases nitrogenadas que lo conforman (la secuencia exacta de Adenina, Guanina, Citosina y Uracil que compone su ADN), por su parte, el fenotipo se refiere a las características físicas de un organismo (color de piel, forma de las extremidades, dureza de sus huesos, estatura, entre otros).

A partir de ese momento se desarrollaron las implicaciones de esta gran hallazgo y poco a poco se confirmó la relación íntima y totalmente intuitiva existente entre genotipo y fenotipo. Los mecanismos de transcripción de ADN son los responsables, por intermedio del ARN (ácido ribonucleico) y de un gran número de proteínas, de construir a partir del genotipo (como un código) a las diversas proteínas responsables del fenotipo. En consecuencia, se replanteó la definición de fenotipo como la expresión del genotipo de un organismo conjuntamente con los efectos de los diversos factores ambientales.

Paralelo a lo anterior, se ligó la teoría darwiniana de la evolución de las especies al concepto genotipo. Así, el individuo cuyo fenotipo sea el mejor adaptado a su entorno es el que tiene mayor probabilidad de reproducirse, y dado a los mecanismos de reproducción perpetúan (en su totalidad para organismos asexuales y parcialmente para organismos sexuales) el genotipo de un individuo, entre más adaptado se encuentre el fenotipo de un individuo en particular a su entorno, mayor será la probabilidad de perpetuarse del genotipo correspondiente. Esto implica que cadenas de ADN que codifican fenotipos más exitosos tenderán a aumentar su frecuencia relativa en una población dada de individuos.

Con base en estos conceptos y en el obvio éxito de este mecanismo (que ha logrado evolucionar especies altamente exitosas y adaptadas a su entorno), se desarrolla el modelo computacional conocido como Algoritmos Genéticos.

Estos modelos están compuestos por los siguientes elementos, análogos a los correspondientes conceptos biológicos:

- Espacio de búsqueda: autodescriptivo, espacio donde residen las soluciones candidatas al problema. Los casos típicos son $\{0, 1\}^n$ (para problema de n caracteres)

binarios), R^n (n- vectores sobre reales) o Σ^n , donde Σ es un alfabeto predeterminado. Es análogo al concepto biológico de entorno o medio ambiente.

- Individuos: cada individuo es un candidato solución al problema, un vector dentro del espacio de búsqueda. Conceptualmente, lo caracteriza su genotipo y fenotipo..
- Función de costo: función que relaciona la aptitud del individuo para solucionar el problema con un valor numérico. Entre más apto sea el individuo, se espera que sea menor que el valor que tome la función de costo en el o viceversa. Esta función es el puente entre la adaptabilidad del individuo y su fenotipo.
- Genotipo: es el individuo visto como vector o como una cadena de caracteres. Estos caracteres tienen como equivalentes biológicos las bases nitrogenadas del ADN.
- Fenotipo: el fenotipo de un individuo es la representación que puede llegar a tomar la cadena de caracteres que conforman su genotipo dependiendo de cada problema. En algunas ocasiones será posible calcular el valor que toma un individuo en la función de costo a partir de su genotipo (tomado irrelevante el fenotipo en el contexto del algoritmo), mientras que en otras será necesario recurrir al fenotipo del individuo.
- Función de reproducción: función que asigna a cada individuo una probabilidad de reproducirse de acuerdo con el valor que se toma en la función de costo.
- Método de reproducción: algoritmo que a partir de dos individuos (padres o ascendientes) produce un tercero (descendiente). El método usual se le conoce como “crossover” (recombinación), donde el genotipo del individuo descendiente es idéntico, hasta una posición escogida al azar, al genotipo de uno de los padres, y de ahí en adelante al genotipo del segundo.
- Generación: todos los individuos presentes en una iteración del algoritmo.

Adicionalmente, el modelo, incluye por lo general el fenómeno de mutación y, con menor frecuencia, el de “inversión” del ADN. La mutación consiste en cambiar por un valor aleatorio una posición escogida al azar del genotipo de un individuo. La inversión consiste en transcribir en orden inverso una sección del genotipo de un individuo escogida también al azar.

La primera generación de individuos se construye tomando el genotipo de cada uno de manera aleatoria sobre el espacio de búsqueda. Posteriormente, se asigna a cada uno de los individuos su costo, y una probabilidad de reproducción inversamente proporcional a este (o relación a este de alguna otra manera dependiendo de la función de reproducción). Luego producen al azar los individuos con la probabilidad asignada el paso previo, para generar la siguiente generación que tendrá, casi con total seguridad, un menor valor promedio de costo. El procedimiento se repite hasta llegar a un número máximo de generaciones o hasta encontrar un individuo cuya función de costo este por debajo de un cierto umbral predeterminado.

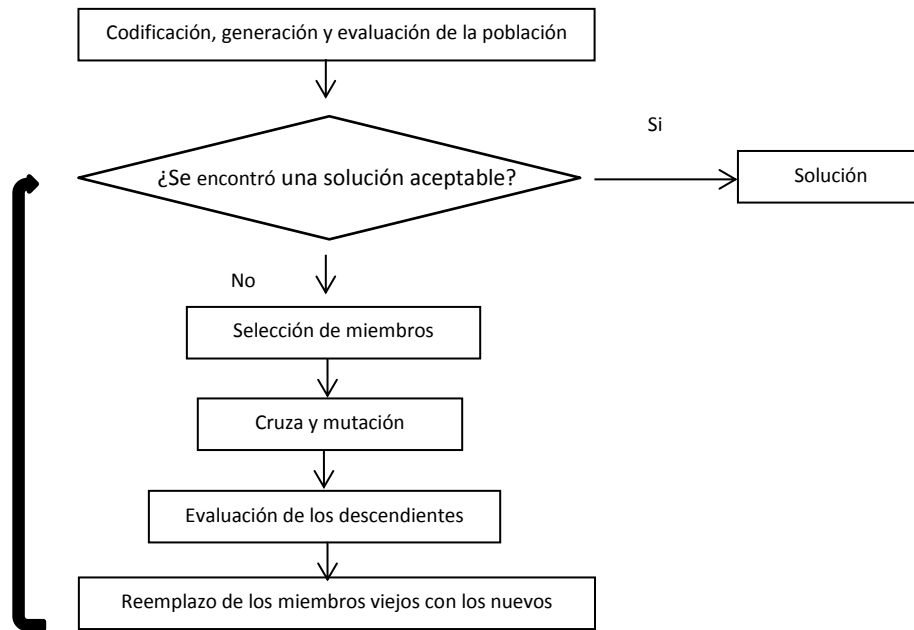


Figura 4.1 Diagrama de bloques del Algoritmo Genético Simple

4.2 ALGORITMOS GENÉTICOS DENTRO DE PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN

Los algoritmos genéticos constituyen, en un problema de optimización, un método de búsqueda ordenada por el espacio de solución. Es decir, los algoritmos genéticos no garantizan de ninguna manera el encontrar el mínimo global y, ni siquiera, los mínimos locales de una función determinada. Simplemente estos algoritmos van buscando por el espacio solución localizando los individuos de cada generación progresivamente más cerca de los mínimos (locales o globales) de la función de costo. Es de esperar que después de un número razonable de generaciones se encuentre una solución candidata cuyo valor en la función de costo sea relativamente bajo, o se halle relativamente “cerca” del mínimo.

Aunque lo anterior muestre que los algoritmos genéticos no son formalmente algoritmos de optimización, su eficiencia como tal se ha visto comprobada tanto por la resolución efectiva de diversos problemas desde su desarrollo como por el éxito que ha tenido como mecanismo de optimización dentro de los sistemas biológicos.

4.3 MANEJO DE RESTRICCIONES EN UN PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

Los algoritmos genéticos no controlan de manera “natural” las restricciones dentro de un problema de optimización. Es decir, la búsqueda ordenada proporcionan estos algoritmos garantiza constantemente una perpetuación de los genotipos tienen ciertas consecuencias (cadenas de vectores de menor tamaño al genotipo entero en este) que contribuyen a una baja función de costo (ver [Goldberg, 1989], cap. 2) pero como en ningún momento

garantiza que los individuos de una generación dada se mantengan dentro del sub conjunto del espacio de búsqueda delimitado por las restricciones del problema.

Existen básicamente dos razones que lo explican: es natural que al crear la primera generación de manera aleatoria haya individuos que no cumplan con las restricciones, ya aun si se tienen individuos que cumplen con las restricciones el mecanismo de reproducción (recombinación) hace posible que los descendientes de setos no cumplan las restricciones.

Como esta explicado en [Goldberg, 1989] (pp.85) para muchos problemas prácticos resulta casi tan difícil encontrar individuos que no violen las restricciones como encontrar el óptimo. Por consiguiente, muchas veces la opción de simplemente descartar los individuos que no cumplen con las restricciones dificultara bastante el funcionamiento de los algoritmos genéticos.

[Goldberg,1989] recomienda ,por lo tanto, introducir las restricciones dentro de la función de costo. Así, suponiendo que busca minimizar la función de costo $f(x)$, donde x representa un individuo dentro del espacio de búsqueda, y que las restricciones están dadas por una serie de desigualdades (las restricciones de igualdad se modifican por un par de desigualdades)

$$\begin{aligned}g_1(X) &\leq 0 \\g_2(X) &\leq 0 \\&\vdots \\g_n(X) &\leq 0\end{aligned}\tag{4.1}$$

(Es claro que toda desigualdad se puede expresar de forma propuesta), se buscaría minimizar la siguiente función:

$$h(X) = f(X) + \sum_{i=1}^n \alpha_i * \Phi_i(g_i(x))\tag{4.2}$$

donde los α_i son coeficientes que le dan la importancia relativa a cada función de restricción g_i y los Φ_i son funciones de penalización (por ejemplo, $\Phi_i(g_i(x)) = g_i(x)^2$).

Por consiguiente, al avanzar generaciones los individuos tendrán a localizarse dentro de las restricciones puesto que serán estos los que obtendrán una mayor probabilidad de reproducción. Alternativamente, si un individuo no cumple con las restricciones pero tiene un valor muy bajo de función de costo probable que perpetúe las características que lo hacen tener valor tendiendo a la vez a localizarse dentro de las restricciones (puesto que es más probable que se reproduzcan con un individuo que si cumplen con ellas).

4.4 OBJETIVO DEL ALGORITMO

El objetivo principal del algoritmo a implantar es, partiendo de las características topológicas, topográficas y ciertas características físicas (materiales, ubicación de accesorios/coeficientes de pérdidas menores) e hidráulicas (caudales demandados, velocidades y presiones mínimas en los nodos) de una red de distribución determinada, encontrar la combinación de diámetros de los tubos de la red que:

1. lleve el caudal demandado especificado a todos los nodos de la red.
2. con no menos de la presión mínima especificada a priori.
3. y que sea de mínimo costo.

La condición (1) se cumple siempre que el caudal de entrada a la red sea mayor a la suma de los caudales demandados, afirmación que consideren cierta en general (ya que el caudal de entrada proviene de uno o de varios embalses cuya capacidad se modela como infinita).

La condición (2) depende de la ecuación de la conservación de la masa y energía resuelta a través del método del gradiente, para cada combinación de diámetros determinada.

La condición (3) depende directamente de los diámetros que se usen y su posición en la red (no es función de las características hidráulicas de la red)

4.5 ESPACIO DE BÚSQUEDA E INDIVIDUOS

El espacio de búsqueda es el conjunto que contienen todos los posibles diseños que se pueden escoger para la red especificada, sin importar que estos cumplan con las restricciones hidráulicas o no (las restricciones limitan el espacio entero a subconjunto de soluciones factibles) es por tanto fácil ver que este espacio es D^U (el conjunto de U vectores sobre un alfabeto D), donde D es el conjunto de diámetros comerciales que se pueden escoger para los tubos, $|D|$ representa el tamaño de este conjunto(por ejemplo, $|D|=17$ para $D=\{1/2 \text{ in}, 1 \text{ in}, 1 \frac{1}{2} \text{ in}, 2 \text{ in}, 3 \text{ in}, 4 \text{ in}, 5 \text{ in}, 6 \text{ in}, 8 \text{ in}, 10 \text{ in}, 12 \text{ in}, 16 \text{ in}, 18 \text{ in}, 24 \text{ in}, 30 \text{ in}, 60 \text{ in}, 72 \text{ in}\}$, un conjunto de diámetros usual) y U es el número de tubos en la red. Evidentemente el tamaño de este espacio es $|D|^U$.

Cada individuo X en D^U es un vector que contiene U diámetros comerciales, cada posición del vector X corresponde al diámetro de un tubo de la red. Cada posición, independientemente del individuo, corresponde a un tubo fijo ya que no sería útil en el contexto de los algoritmos genéticos que la i ésima de otro vector Y . La necesidad de mantener fijas las posiciones respecto a los tubos proviene de la noción de “esquema” responsable (teóricamente) del buen funcionamiento de los algoritmos genéticos.

El genotipo de cada individuo es, por supuesto, él mismo visto como vector. Por su puesto, el fenotipo de cada individuo es bastante más interesante. Como cada individuo representa un diseño el fenotipo corresponde a la hidráulica del individuo; es decir, a cada individuo X , vector de diámetros, corresponde las presiones resultantes en los N nodos de la red, siendo así el fenotipo un vector en R^N . Este es un caso bastante interesante de fenotipo, donde para encontrarla se debe procesar la información del genotipo en un paquete de software especializado (el programa en redes EPANET) a través de métodos matemáticos con ciertos niveles de complejidad (el método del gradiente).

Los caudales en los U tubos de la red pueden también se vistos como parte del fenotipo. Sin embargo, estos caudales no serán de interés, al menos en un caso inicial, mientras que las presiones si serán importantes dentro del algoritmo.

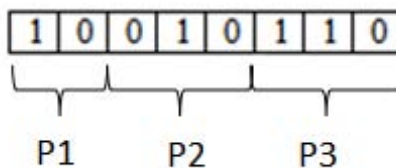
Y se seleccionaran posteriormente estos n caracteres a mutar al azar sobre los U caracteres posibles.

4.6 CODIFICACIÓN

4.6.1 Codificación de las variables

Los algoritmos genéticos requieren que el conjunto se codifique en un cromosoma. Cada cromosoma tiene varios genes, que corresponden a sendos parámetros del problema. Para poder trabajar con estos genes en el ordenador, es necesario codificarlos en una cadena, es decir, una serie (RISTRA) de símbolos (números o letras) que generalmente va a estar compuesta de 0s y 1s.

Por ejemplo, en esta cadena de bits, el valor del parámetro $p1$ ocupará las posiciones 0 a 2, el $p2$ las 3 a 5, etcétera, El número de bits usado para cada parámetro dependerá de la precisión que se quiera en el mismo o del número de opciones posibles (alelos) que tenga ese parámetro.



Hay otras codificaciones posibles, usando alfabetos de diferente cardinalidad; sin embargo, uno de los resultados fundamentales en la teoría de algoritmos genéticos, el teorema de los esquemas, afirma que la codificación óptima, es decir, aquella sobre la que los algoritmos genéticos funcionan mejor, es aquella que tiene un alfabeto de cardinalidad 2.

Aquí se está codificando cada parámetro como un número entero de n bits. En realidad, se puede utilizar cualquier otra representación interna: bcd, código Gray y codificación en forma de números reales, por ejemplo.

La mayoría de las veces, una codificación correcta es la clave de una buena resolución del problema. Generalmente, la regla heurística que se utiliza es la llamada regla de los bloques de construcción, es decir, parámetros relacionados entre sí deben de estar cercanos en el cromosoma. Por ejemplo, si queremos codificar los pesos de una red neuronal, una buena elección será poner juntos todos los pesos que salgan de la misma neurona de la capa oculta (también llamada codificación fregona), como se indica en la figura. En esta, todos los pesos señalados con trazo doble se codifican mediante grupos de bits o bytes sucesivos en el cromosoma.

En todo caso, se puede ser bastante creativo con la codificación del problema, teniendo siempre en cuenta la regla anterior. Esto puede llevar a usar cromosomas bidimensionales, o tridimensionales, o con relaciones entre genes que no sean puramente lineales de vecindad. En algunos casos, cuando no se conoce de antemano el número de variables del problema, caben dos opciones: codificar también el número de variables, fijando un número máximo, o bien, lo cual es mucho más natural, crear un cromosoma que pueda variar de longitud. Para ello, claro está, se necesitan operadores genéticos que alteren la longitud.

Normalmente, la codificación es estática, pero en casos de optimización numérica, el número de bits dedicados a codificar un parámetro puede variar, o incluso lo que representen los bits dedicados a codificar cada parámetro. Algunos paquetes de algoritmos genéticos adaptan automáticamente la codificación según van convergiendo los bits menos significativos de una solución.

4.6.2 Sistema binario

A finales de la década de 1930, Claude Shannon mostró que utilizando interruptores que se encontraban cerrados para "verdadero" y abiertos para "falso", se podían llevar a cabo operaciones lógicas asignando el número 1 a "verdadero" y el número 0 a "falso".

Este sistema de codificación de información se denominó binario. Es la forma de codificación que permite el funcionamiento de los ordenadores. El sistema binario utiliza dos condiciones (representadas por los dígitos 0 y 1) para codificar información.

4.6.2.1 El bit (dígito binario)

El término bit (abreviado con la minúscula b) significa dígito binario, y corresponde al número 0 o 1 en la numeración binaria. Es la unidad de información más pequeña que puede manipular una máquina digital. Es posible representar esta información binaria:

- con una señal eléctrica o magnética que, más allá de un cierto nivel, representa el 1,
- a través de la aspereza o profundidad de los hoyos de una superficie,

- utilizando circuitos eléctricos, componentes eléctricos que poseen dos condiciones estables (una que representa al 1 y la otra al 0).

Por lo tanto, el bit se puede establecer con uno de dos estados: tanto con 1 como 0. Con dos bits, se pueden obtener 4 condiciones diferentes (2x2):

| | |
|---|---|
| 0 | 0 |
| 0 | 1 |
| 1 | 0 |
| 1 | 1 |

Figura 4.2 bit 2x2

Con 3 bits, se pueden obtener ocho condiciones diferentes (2x2x2):

| Valor binario de 3 bits | Valor decimal |
|-------------------------|---------------|
| 000 | 0 |
| 001 | 1 |
| 010 | 2 |
| 011 | 3 |
| 100 | 4 |
| 101 | 5 |
| 110 | 6 |
| 111 | 7 |

Figura 4.3 bit 2x2x2

Con un grupo n de bits, es posible representar 2^n valores

4.7 EXPLORACIÓN Y EXPLOTACIÓN

Cualquier algoritmo de optimización que se diga eficiente debe utilizar al menos 2 técnicas para encontrar el óptimo global: exploración para descubrir áreas nuevas y desconocidas en el espacio de búsqueda, y explotación para hacer uso del conocimiento adquirido en puntos previamente visitados que ayuden a encontrar mejores puntos.

Estos dos requerimientos son contradictorios, y un buen algoritmo de búsqueda tiene que encontrar el balance, la mejor combinación entre los dos. Un método basado puramente en la búsqueda aleatoria es bueno explorando, pero no explotando, mientras que un método, como el escalando la colina, es bueno explotando pero hace muy poca exploración. Una combinación de estas 2 estrategias sería lo ideal, pero es difícil saber dónde radica el balance (i.e. que tanta explotación debemos realizar antes de explorar otras zonas).

Holland (1975) demostró que los Algoritmos genéticos combinan ambos, exploración y explotación, al mismo tiempo y de una manera óptima. Goldberg (1989) hace una analogía con las máquinas tragamonedas utilizadas en los casinos, aunque en su analogía, las máquinas tienen dos brazos en lugar de uno. Sin embargo, aunque esto es teóricamente cierto para un Algoritmos genéticos, hay problemas inevitables en la práctica. Esto sucede porque Holland hace ciertas suposiciones para simplificar el problema, estas incluyen:

- 1) El tamaño de la población es infinito
- 2) La función de aptitud refleja con mucha precisión la utilidad de la solución, y
- 3) Los genes en un cromosoma no interactúan significativamente

La primera suposición nunca puede ser satisfecha en la práctica. Debido a esto el funcionamiento de un Algoritmo genético estará siempre sujeto a errores estadísticos. Aún en ausencia de cualquier presión de selección (i.e. una función de aptitud constante), los miembros de una población seguirán convergiendo a algún punto en el espacio de solución. Esto sucede simplemente debido a la acumulación de errores estocásticos. Si, por otro lado un gen se vuelve dominante en la población, lo será más aún en la siguiente generación. Si el incremento en la dominancia se mantiene por muchas generaciones sucesivas, y la población es finita, entonces un gen puede regarse en todos los miembros de la población.

Una vez que un gen ha convergido de este modo, se fija y entonces la cruce no puede introducir nuevos valores.

Las suposiciones 2 y 3 pueden ser satisfechas en funciones de prueba suaves (sin saltos), pero son más difíciles de satisfacer en los problemas del mundo real.

4.8 FUNCIÓN DE COSTO (SIN MANEJO DE RESTRICCIONES)

Siendo objetivo el algoritmo encontrara un diseño que minimice el costo de constructivo de cada diseño. Se considerara, inicialmente, el costo constructivo de tuberías de la red sin tener en cuenta el costo de accesorios y otros costos propios a la construcción de una red de abastecimiento.

El costo constructivo de las tuberías se adapta a la función encontrada;

$$C_i = f(D, L)(\$) \quad (4.25)$$

función basada en el costo de la tubería por longitud sin considerar costo de mano de obra ni material de relleno de zanjas.

4.9 FACTOR DE APTITUD

Para una mejor conducción del algoritmo genético, se evalúa cada individuo X en función de que cumplan las restricciones de presión y velocidad. se penalizara al individuo con un costo de penalización $C_p = f(p_i)(\$/mca)$ cuando no cumpla o exista una condición desfavorable con las restricciones de presión o velocidad Δ_p ; de modo que la función de aptitud queda de la siguiente manera:

$$fa = \frac{1}{C_i + \Delta_p C_p} \quad (4.26)$$

De modo que solo los individuos más aptos tendrán mayor probabilidad de reproducirse

4.10 PROBABILIDAD DE CRUZA

Se comenzara utilizando un modelo donde la probabilidad de reproducción asignada a cada individuo es inversamente proporcional (puesto que se trata de un problema de minimización de costos) valor de la aptitud de este modo solo serán seleccionados los individuos más adecuados a solucionar el problema excluyendo los menos aptos.

Para un individuo X_i^k (el superíndice se refiere a la generación o iteración a la que pertenece el vector) en D^U , su probabilidad de ser escogido para reproducirse entonces:

$$P_k(X_i^k) = \frac{fa(X_i^k)}{\sum_{i=1}^n fa(X_i^k)} \quad (4.27)$$

Una vez obtenidos las probabilidades de crusa se generan números aleatorios entre 0 y 1 para seleccionar los individuos para reproducirse (punto de crusa y muta).

4.11 FUNCIONES DE REPRODUCCIÓN Y MUTACIÓN

Se implementara el método de reproducción crossover (recombinación) clásico. Para realizar la recombinación se escogerán dos individuos padres de la generación k y se escogerá una posición i entre 0 y U (inclusive). Esta posición indica el sitio de recombinación si es 0 el individuo será exactamente al padre 2 y si es U será exactamente igual al padre 1 y para cualquier otro sitio i los primeros i caracteres serán copia del padre 1 y los siguientes $U-i$ caracteres del padre 2.

| | | | | | | | | |
|-----------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| P1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| P2 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |

| | | | | | | | | |
|-----------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| H1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| H2 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |

Figura 4.4 Ilustración de los operadores de recombinación más comúnmente utilizados para la representación binaria. Recombinación de un punto, se selecciona un punto de corte, y se intercambian los segmentos entre ellos.

Durante la reproducción de dos individuos opera la función de mutación. Esta función afectara cada carácter que este copiado en el individuo descendiente con una probabilidad fija p_m de cambiar el carácter(diámetro) proveniente del padre por un carácter escogido aleatoriamente del conjunto D. para simplificar el funcionamiento del operador, y como la descripción previa del operador, de mutación muestra que es una variable binominal(con probabilidad de éxito p_m y de falla $1 - p_m$), se evaluara previo a comenzar la reproducción la probabilidad que n de los U caracteres del descendiente sean mutados en el proceso:

$$P(\text{mutados} = n) = \binom{U}{n} (p_m)^n (1 - p_m)^{U-n} \quad (4.28)$$

Antes

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|

Después

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|

4.12 CONVERGENCIA

Cuanto mayor sea la adaptación de un individuo al problema, mayor será la probabilidad de que él mismo sea seleccionado para reproducirse, cruzando su material genético con otro individuo seleccionado de igual forma. Este cruce producirá nuevos individuos (descendientes de los anteriores) los cuales comparten algunas de las características de sus padres. Cuanto menor sea la adaptación de un individuo, menor será la probabilidad de que dicho individuo sea seleccionado para la reproducción, y por lo tanto de que su material genético se propague en sucesivas generaciones, y entonces morirá.

De esta manera se produce una nueva población de posibles soluciones, la cual reemplaza a la anterior y verifica la interesante propiedad de que contiene una mayor proporción de buenas características en comparación con la población anterior. Así, a lo largo de las generaciones las buenas características se propagan a través de la población. Favoreciendo el cruce de los individuos mejor adaptados, van siendo exploradas las áreas más prometedoras del espacio de búsqueda. Si el Algoritmo genético ha sido bien diseñado, la población convergerá hacia una solución óptima del problema.

Para criterios prácticos, es muy útil la definición de convergencia introducida en este campo por De Jong (1975) en su tesis doctoral. Si el Algoritmo genético ha sido implantado correctamente, la población evolucionará a lo largo de las generaciones sucesivas de tal manera que la adaptación media extendida a todos los individuos de la población, así como la adaptación del mejor individuo, se irán incrementando hacia el óptimo global. El concepto de convergencia está relacionado con la progresión hacia la uniformidad: un gen ha convergido, cuando al menos el 95% de los individuos de la población comparten el mismo valor para dicho gen. Se dice que la población converge cuando todos los genes han convergido. Se puede generalizar dicha definición al caso en que al menos algunos de los individuos de la población hayan convergido.

CAPÍTULO 5. EJEMPLOS DE APLICACIÓN

5.1 CODIFICACIÓN

En este caso, el costo es una función exclusiva de los diámetros de las tuberías (ya que su longitud está definida), por lo tanto el primer paso es codificar el conjunto de diámetros comerciales que pueden ser elegidos, de tal manera que después sea posible realizar los demás pasos del algoritmo genético.

La codificación de los diámetros se hizo en sistema binario porque fue el sistema para el cual fue propuesto el Algoritmo genético simple de Holland (1975).

Supóngase que se desea realizar el diseño óptimo de una red con un trazo como el mostrado en la Figura 5.1.

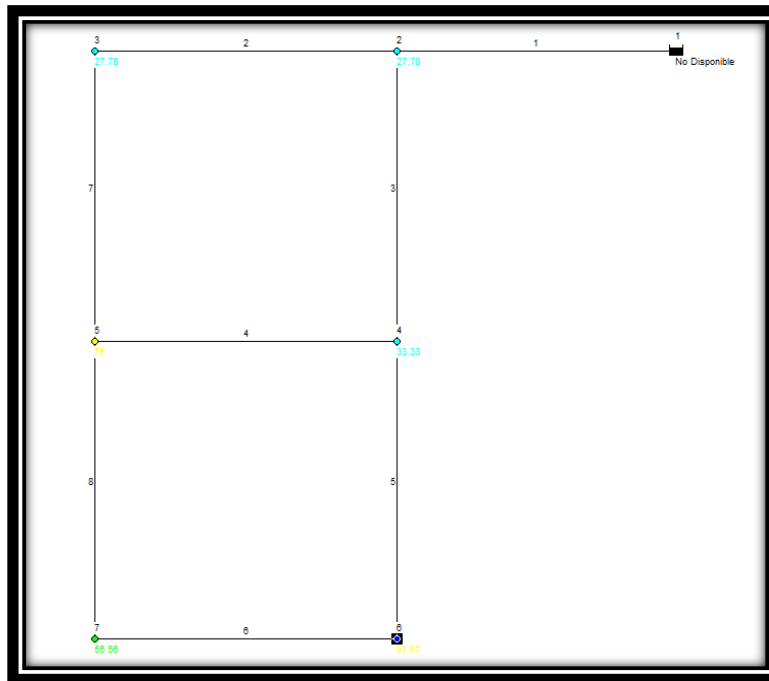


Figura 5.1 Trazo de ejemplo red 1

En la siguiente tabla se muestran los datos necesarios para el realizar el diseño de la red los cuales son:

- Carga en el tanque o deposito
- Longitud de tramos
- Elevación del terreno donde se ubican los nodos
- Gasto de demanda en los nodos

- Coeficiente de rugosidad (dada por el material de la tubería)
- Conjunto de diámetros comerciales a utilizar así como su costo

Tabla 5.1 Datos de la red

| Tubería | Longitud | Nodo | Demanda | Elevación |
|---------|----------|------------------------------|-------------------------|-----------|
| 1 | 1000 | 2 | 27.78 | 150 |
| 2 | 1000 | 3 | 27.78 | 160 |
| 3 | 1000 | 4 | 33.33 | 155 |
| 4 | 1000 | 5 | 75 | 150 |
| 5 | 1000 | 6 | 91.67 | 165 |
| 6 | 1000 | 7 | 55.56 | 160 |
| 7 | 1000 | 1 | Carga en el tanque 100m | |
| 8 | 1000 | Rugosidad $\epsilon=0.15$ mm | | |

Tabla 5.2 Diámetros comerciales para el diseño de la red, costo y codificación binaria

| Diámetro (in) | Costo UM | Codificación binaria | Codificación real |
|---------------|----------|----------------------|-------------------|
| 1 | 2 | 0000 | 1 |
| 2 | 5 | 0001 | 2 |
| 3 | 8 | 0010 | 3 |
| 4 | 11 | 0011 | 4 |
| 6 | 16 | 0100 | 5 |
| 8 | 23 | 0101 | 6 |
| 10 | 32 | 0110 | 7 |
| 12 | 50 | 0111 | 8 |
| 14 | 60 | 1000 | 9 |
| 16 | 90 | 1001 | 10 |
| 18 | 130 | 1010 | 11 |
| 20 | 170 | 1011 | 12 |
| 22 | 300 | 1100 | 13 |
| 24 | 550 | 1101 | 14 |
| 1 | 2 | 1110 | 15 |
| 2 | 5 | 1111 | 16 |

En la Tabla 5.2 se repiten los diámetros 1 y 2 debido a la precisión de código binario ($2^4 = 16$) tan solo se necesitan 14 combinaciones, la solución a este detalle es duplicar dos de los diámetros, pueden ser los dos últimos o los dos primeros.

5.2 GENERACIÓN DE LA POBLACIÓN INICIAL

Una vez que se han codificado los diámetros, se procede a generar, aleatoriamente, la población inicial. Para esto se requieren dos datos, uno es el número de individuos de la población inicial y el otro, la longitud del cromosoma.

El número de individuos de la población inicial es decisión de la persona que utilice el método. El hecho de que los ALGORITMOS GENÉTICOS sean tan versátiles hace un poco difícil la selección del número de individuos, pues el número que es adecuado para un problema en particular, resulta no ser tan bueno para otro. En el caso del Diseño Óptimo de Redes de Distribución de Agua Potable, y después de haber optimizado redes de diferente tamaño, se llegó a la conclusión de que el número de individuos de la población inicial, depende del tamaño de la red y la cantidad de diámetros comerciales disponibles, en general resulta ser función del número de combinaciones totales para una red en particular.

Debido a los tamaños de red que se optimizaron en este trabajo, el tamaño de la población adecuado resultó ser de 60, 100 y 1000 individuos, según el caso.

La longitud del cromosoma es igual al número de tramos que tenga la red, multiplicado por la precisión. Precisión, en este caso, es el número de dígitos que se requieren para codificar el conjunto de diámetros comerciales disponibles en sistema binario. Para el ejemplo de la Figura 5.1 se tiene que:

$$lc = NT * PRECI = 8 * 4 = 32 \quad (5.1)$$

donde

lc longitud del cromosoma
NT número de tuberías
PRECI precisión

Por lo tanto se generarán tantos individuos, como se desee, y con una longitud de 32 bits cada uno.

5.3 EVALUACIÓN DE LA APTITUD DE CADA UNO DE LOS INDIVIDUOS DE LA POBLACIÓN

La función de aptitud se definió como

$$fa = \frac{1}{C_i + \Delta_p C_p} \quad (5.2)$$

donde

fa valor de la función de aptitud.
C_i costo de construcción de la red, que está en función del diámetro y la longitud de cada tramo, también puede incluir costos por instalación, accesorios, cruceros, etc.

| | |
|------------|---|
| C_p | costo de penalización, sólo para aquellas redes que presenten nodos con presiones por abajo de la mínima propuesta. |
| Δp | diferencia de presión en un nodo con respecto a la mínima o máxima permisibles. |

Para calcular el costo de penalización (C_p) se realiza lo siguiente: una vez que se ha revisado el funcionamiento hidráulico de cada uno de los individuos, se calcula la diferencia de velocidad y de presión

Para la penalización de presión (C_p) se calcula la diferencia de presión existente en cada uno de los nodos y la presión mínima - máxima propuesta, siempre y cuando la presión en el nodo correspondiente esté por abajo de la mínima o por arriba de la máxima; el costo de penalización será entonces el producto de la mayor diferencia por una constante K.

Para la penalización de velocidad (C_{pv}) se calcula la diferencia de velocidad en cada tubería y la velocidad mínima - máxima propuesta, siempre y cuando la velocidad este por debajo de la mínima o arriba de la máxima; el costo de penalización entonces será el producto de la mayor diferencia por una constante K. Se ilustra lo anterior con un ejemplo, en la Tabla 5.3 se muestran las presiones correspondientes a dos redes (individuos) y el valor que tendría el costo de penalización, C_p , suponiendo P_{\min} de 10 m, P_{\max} de 50 y V_{\min} 0.3 m/s V_{\max} 5.0 m/s.

Tabla 5.3 Cargas de presión y velocidad disponible correspondientes a dos individuos (redes) diferentes

| Tubo/nodo | D (in) | Presión (m) | Δp | Velocidad (m/s) | Δv |
|-----------|--------|-------------|------------|-----------------|------------|
| 1 | 16 | | | 2.4 | - |
| 2 | 6 | 48.2 | - | 1.51 | - |
| 3 | 18 | 22.16 | - | 1.56 | - |
| 4 | 14 | 38.8 | - | 1.3 | - |
| 5 | 14 | 39.58 | - | 0.94 | - |
| 6 | 2 | 26.56 | - | 0.72 | - |
| 7 | 1 | 16 | - | 0.39 | - |
| 8 | 8 | | | 1.67 | - |
| | | $C_p=0*K$ | | $C_{pv}=0*K$ | |
| 1 | 16 | | | 2.04 | - |
| 2 | 16 | 52.1 | 2.1 | 1.25 | - |
| 3 | 12 | 39.62 | - | 1.03 | - |
| 4 | 12 | 43.01 | - | 0.31 | 0.01 |
| 5 | 2 | 47.57 | - | 0.29 | - |
| 6 | 18 | 30.05 | - | 0.6 | - |
| 7 | 16 | 35.77 | - | 1.1 | - |
| 8 | 20 | | - | 0.96 | - |
| | | $C_p=2.1*K$ | | $C_{pv}=0.01*K$ | |

El valor de K depende del posible costo de la red para un determinado conjunto de diámetros. Si, por ejemplo, el costo de la red fuese del orden de los miles, entonces, el K debe ser del mismo orden; sólo de esta manera realmente se penaliza aquellos individuos (redes) que no cumplan con las restricciones de presión y velocidad.

Si el costo de penalización es alto, el valor de fa será bajo (Ecuación 5.2); por lo tanto, individuos con esas características desaparecerán en las siguientes generaciones; así mismo, se tendrán individuos (redes) muy aptos cuando Cp tenga valor de cero y el Ci sea pequeño. El Ci será pequeño si el conjunto de diámetros para la red en cuestión, tiene los diámetros más pequeños posibles que satisfagan las restricciones de presión y demanda.

Para calcular el Cp , y en consecuencia la aptitud de cada individuo es necesario hacer una revisión hidráulica para cada uno de los individuos que forman la población, para esto se utiliza un modelo de cálculo hidráulico de tipo estático y el método para resolver las ecuaciones, es el método del gradiente, se describen con detalle las ecuaciones planteadas y el algoritmo de solución. El método del gradiente se codificó como una subrutina dentro del cuerpo principal del Algoritmo genético, los resultados que entrega son: cargas piezométricas, presiones disponibles y gastos en los nodos; velocidad, gasto, número de Reynolds y factor de fricción para cada uno de los tramos. En el método el factor de fricción de Darcy es ajustado a las condiciones de flujo. En la Tabla 5.4 se muestran los parámetros antes mencionados, tal como los entrega la subrutina para la red que se está tomando como ejemplo. Aunque de todos ellos, la subrutina sólo regresa al programa principal del algoritmo genético el valor de la presión en todos los nodos, pues con base en ella se calcula el costo de penalización, Cp .

Tabla 5.4 Salida de la subrutina de simulación hidráulica

| Tubo/nodo | Elevación (m) | Demanda (lps) | Carga piezométrica (m) | Presión (m) |
|-----------|---------------|---------------|------------------------|-------------|
| 1 | 210 | -311.12 | 210 | |
| 2 | 150 | 27.8 | 197.19 | 47.19 |
| 3 | 160 | 27.8 | 187.25 | 27.25 |
| 4 | 155 | 33.33 | 186.09 | 31.09 |
| 5 | 150 | 75 | 173.71 | 23.71 |
| 6 | 165 | 91.67 | 180.2 | 15.2 |
| 7 | 160 | 55.56 | 175.23 | 15.23 |
| 8 | | | | |

Tabla 5.4 Salida de la subrutina de simulación hidráulica continuación

| Tubo/nodo | D (in) | Longitud (m) | Gasto (l/s) | Velocidad (m/s) | Factor de fricción |
|-----------|--------|--------------|-------------|-----------------|--------------------|
| 1 | 16 | 1000 | 311.12 | 2.48 | 0.016 |
| 2 | 10 | 1000 | 79.56 | 1.62 | 0.019 |
| 3 | 14 | 1000 | 203.78 | 2.12 | 0.017 |
| 4 | 6 | 1000 | 23.15 | 1.53 | 0.021 |
| 5 | 14 | 1000 | 147.3 | 1.13 | 0.017 |
| 6 | 10 | 1000 | 55.63 | 1.65 | 0.019 |
| 7 | 8 | 1000 | 51.78 | 0.14 | 0.02 |
| 8 | 1 | 1000 | | | 0.04 |

5.4 SELECCIÓN PROPORCIONAL

Una vez que se ha evaluado la aptitud de cada individuo, se procede a seleccionar parejas para llevar a cabo la cruce. A diferencia de los seres humanos, hombres y mujeres, donde por cada pareja, generalmente, se tiene un descendiente, en los Algoritmos genéticos, por cada par de padres, se tendrá el mismo número de hijos. Esto mantendrá constante el número de individuos en todas las generaciones.

El método de selección utilizado es el de la ruleta o selección proporcional, dicho método asigna a cada individuo una parte, dentro de la ruleta, de tamaño proporcional a su aptitud. Sea una población de seis individuos, cada uno de ellos con su correspondiente valor de aptitud asignado, que ha sido calculado de la manera descrita en el apartado anterior (véase 4.12); entonces, se fabrica “un pastel” donde a cada individuo se le asigna una rebanada de tamaño proporcional a su aptitud (Figura 5.2). Se suman las aptitudes de todos los individuos y se procede a la selección de la siguiente manera: se generan tantos números aleatorios como individuos tenga la población, dichos números deben estar entre cero y el valor de la suma de las aptitudes. Para el caso que mostramos como ejemplo, la suma de las aptitudes es 20.1, lo anterior indica que se tendrán que generar números aleatorios entre 0 y 20.1 ($2.7+4.5+1.1+3.2+1.3+7.3$). Por cada número generado, se van sumando una a una las aptitudes de los individuos y se seleccionará el último individuo cuya aptitud, al sumarse, dé como resultado un número mayor al generado aleatoriamente. Este tipo de selección permite que los individuos más aptos tengan mayor probabilidad de ser seleccionados que los menos aptos; es una de las razones por las que el Algoritmo genético siempre converge a un resultado, que si no es el óptimo global, sí es muy cercano a él.

Por ejemplo, para la Figura 5.2, se genera un número aleatorio, supóngase 0.6; sumando las aptitudes de los individuos 1,2,3,4,5,6 y, se obtiene un valor de 0.583, al sumar la aptitud del 7° individuo, se tiene que la suma es mayor de 0.6, entonces el individuo seleccionado para cruzarse es el 7°.

Tabla 5.5 Selección de individuos proporcional a su aptitud

| Red | Aptitud | % de aptitud en la generación | Suma de aptitudes |
|--------|---------|-------------------------------|-------------------|
| Red 1 | 3 | 0.063 | 0.063 |
| Red 2 | 6 | 0.125 | 0.188 |
| Red 3 | 6 | 0.125 | 0.313 |
| Red 4 | 2 | 0.042 | 0.354 |
| Red 5 | 4 | 0.083 | 0.438 |
| Red 6 | 7 | 0.146 | 0.583 |
| Red 7 | 8 | 0.167 | 0.750 |
| Red 8 | 1 | 0.021 | 0.771 |
| Red 9 | 6 | 0.125 | 0.896 |
| Red 10 | 5 | 0.104 | 1.000 |
| Suma | 48 | 1 | |

Aptitud de la red

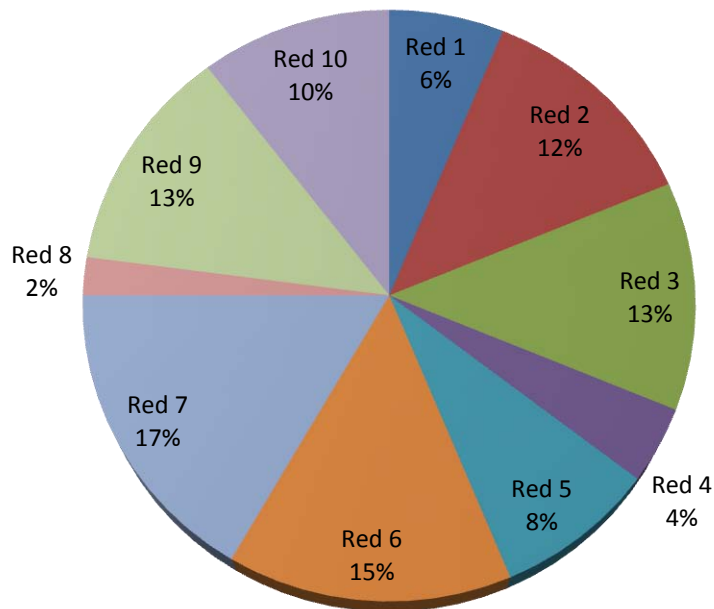


Figura 5.2 Grafica de ruleta selección de individuos proporcional a su aptitud

5.5 CRUZA

Para una población de seis individuos, que no son los de la población inicial, sino los que han sido previamente evaluados y seleccionados. Se ordenan por número de individuo, del 1 al 6, y se cruzan los números impares con los pares adyacentes. Si el número de individuos de la población es impar, el último individuo pasa tal cual a la siguiente generación, sin ser cruzado. Ver Tabla 5.6.

Tabla 5.6 Formación de parejas para la cruce

| No. De individuo | No. De pareja |
|------------------|---------------|
| 1 | 1 |
| 2 | |
| 3 | 2 |
| 4 | |
| 5 | 3 |
| 6 | |

Generalmente las probabilidades de cruce (P_c) están entre 0.6 y 1.0, el valor depende del problema que se esté optimizando, y de la cantidad de posibles soluciones que existan para él; en el caso de las redes que se mostrarán más adelante, se usó el valor de 0.7 como probabilidad de cruce. Esto es, para cada pareja se genera un número aleatorio entre cero y uno, si éste es menor o igual que 0.7 entonces se aplica el operador de cruce, de lo contrario los individuos pasan sin modificaciones a la siguiente generación. Volviendo al ejemplo de la red mostrada en la Figura 5.1, se sabe que la longitud del cromosoma para los individuos que la representan es 32; supóngase que los individuos 1 y 2 son los que se muestran en la Figura 5.3. Para dicha pareja se genera un número aleatorio entre uno y $l_c - 1$ (longitud del cromosoma menos 1). Para el ejemplo de la Figura 5.3, el número aleatorio debe ser entre 1 y 32, si el número aleatorio generado es 15, ese lugar en la cadena cromosómica se designa como el punto de cruce.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|----|---|----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Padre 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Codificación | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | 24 | 1 | 24 | 20 | 1 | 16 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Padre 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | |
| Codificación | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24 | 20 | 1 | 14 | 2 | 24 | 24 | 12 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Figura 5.3 Individuos de la pareja 1, el punto de cruce se señala con la línea más gruesa

La primera parte del cromosoma del primer hijo será aquella que se localice a la izquierda del punto de cruce del primer padre, la segunda, será la parte del cromosoma que esté a la derecha del punto de cruce en el segundo padre. Para el segundo hijo se tiene que la primera parte del cromosoma corresponde a la parte izquierda del punto de cruce del segundo padre, y la segunda parte será la que corresponde a la derecha del punto de cruce, pero del primer padre.

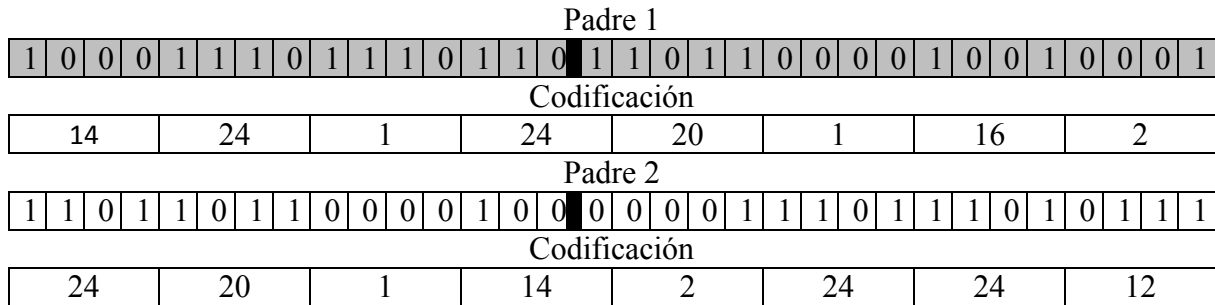


Figura 5.4 Descendientes de la pareja 1

La cruce se realiza para cada una de las parejas; en el caso del ejemplo, para las tres parejas. Al final de este proceso se tendrán los nuevos descendientes.

5.6 MUTACIÓN

Las probabilidades de mutación (P_m) para resolver problemas de ingeniería son muy bajas, 0.02, pero es importante que exista para mantener la diversidad en la población.

En el presente trabajo se utilizó una probabilidad de mutación de $0.7/l_c$, es decir que varía dependiendo del tamaño de la red. Para la red que se ha venido utilizando como ejemplo, se tiene:

$$P_m = \frac{0.7}{l_c} = \frac{0.7}{32} = 0.021$$

Para cada uno de los descendientes, obtenidos mediante el operador de cruce de la sección anterior, se genera un número aleatorio entre cero y uno. Si el número generado es menor o igual que 0.021, se aplicará el operador de mutación al individuo, de lo contrario pasará intacto a la siguiente generación.

Si el individuo se ha seleccionado para mutarse, entonces se genera otro número aleatorio, esta vez entre 1 y 32 (l_c). El número generado será la posición en la cadena cromosómica que será mutada. Véase como ejemplo la Figura 4.5. Suponiendo que el número aleatorio generado para el primer descendiente de la población fue 12.

| Hijo 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|----|---|----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| Codificación | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | 24 | 1 | 22 | 2 | 24 | 24 | 12 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Hijo 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| Codificación | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24 | 20 | 1 | 16 | 20 | 1 | 16 | 2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Figura 5.5 Descendiente mutado en el doceavo gen, la codificación cambia

Una vez mutados los descendientes se comienza un nuevo ciclo, evaluando aptitudes, seleccionando, cruzando y mutando hasta que se llegue a cierto número de generaciones y se tenga el mejor individuo de todas ellas.

El número de generaciones es la manera más común de detener el algoritmo. En el caso del Diseño Óptimo de Redes de Distribución de Agua Potable, el número de generaciones depende, una vez más, del tamaño de la red, para los problemas que se presentarán en la siguiente sección.

5.7 EJEMPLOS DE APLICACIÓN

Se optimizaron 4 redes de diferente tamaño, las redes tienen como característica, el poseer un solo tanque de suministro. La razón de haber utilizado tales redes es que todas ellas han sido optimizadas por otros autores y con diferentes técnicas de optimización, lo que permitió comparar los resultados obtenidos con el método del ALGORITMO GENETICO y así, evaluar su bondad en estos 4 casos particulares. Lo anterior no significa que el método no pueda ser aplicado a otro tipo de redes.

Para la optimización de las redes se hizo un programa, apoyándose en una caja de utilería de MATLAB, desarrollada en la Universidad de Sheffield, Inglaterra (Chipperfield et al. [7]). Todas las simulaciones se realizaron en una máquina con procesador AMDAthlon™64x2 Dual Core Processor 4000+ 2.11Ghz

5.7.1 Red 1

Propuesta por Vázquez en 1989. La Figura 5.6 muestra el trazo de la red y la Tabla 5.7, los datos necesarios para el diseño.

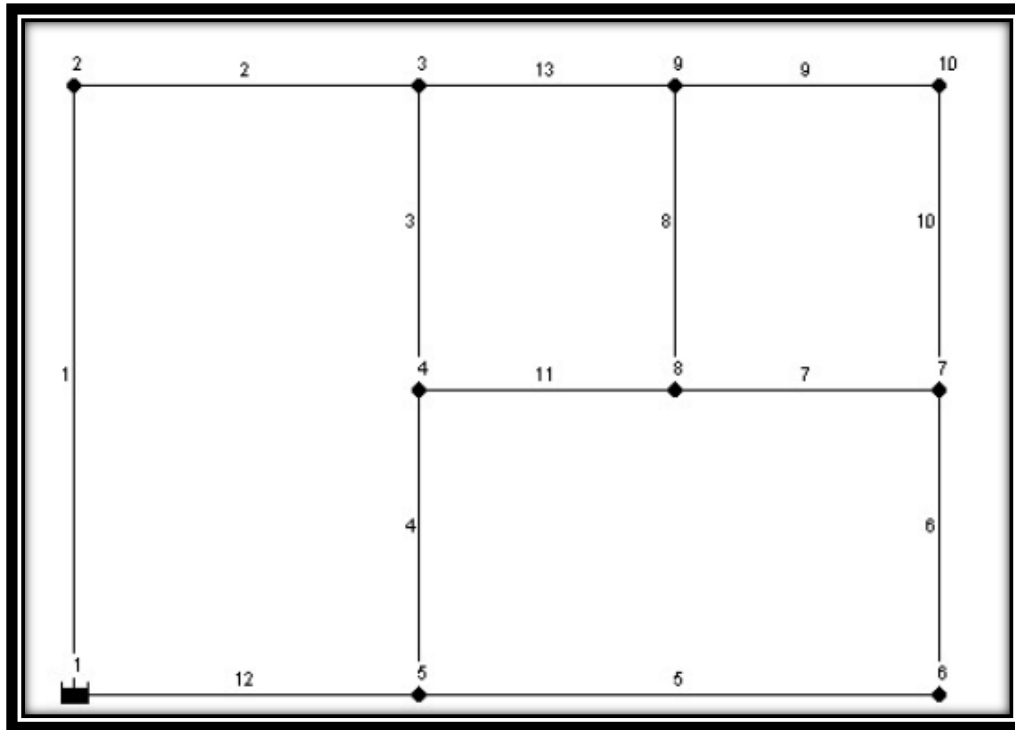


Figura 5.6 Trazo de la red utilizada por Vázquez en 1989

Tabla 5.7 Datos necesarios para el diseño (Elevación de todos los nodos: 70m)

| D(in) | Costo(\$/m) | Tramo | Longitud(m) | Nodo | Demanda(l/s) |
|--------------------------------------|-------------|-------|-------------|-----------|----------------------------|
| 4 | 27 | 1 | 900 | 2 | 0 |
| 6 | 45 | 2 | 600 | 3 | 0 |
| 8 | 66 | 3 | 400 | 4 | 0 |
| 10 | 88 | 4 | 500 | 5 | 0 |
| 12 | 111 | 5 | 1000 | 6 | 20 |
| 14 | 136 | 6 | 500 | 7 | 0 |
| 16 | 161 | 7 | 500 | 8 | 30 |
| 18 | 188 | 8 | 400 | 9 | 0 |
| 20 | 216 | 9 | 500 | 10 | 50 |
| Material: FoGo $\epsilon=0.15$ mm | | 10 | 400 | 1 | Carga en el tanque:100m |
| | | 11 | 500 | | |
| | | 12 | 600 | Pmín:15 m | |
| | | 13 | 500 | | |

Como se ve en la Figura 5.6, la red consta de 13 tuberías y hay 9 posibles diámetros para cada una de ellas, teniéndose un total de 2.54×10^{12} posibles soluciones.

Se ejecutó el Algoritmo genético por 200 generaciones con 200 individuos en la población, es decir, se realizaron 40000 evaluaciones de todas las posibilidades, lo que representa el $1.57 \times 10^{-06}\%$ del total, el tiempo de cómputo fue de 2772.1 segundos. En la Figura 5.7 se presenta la evolución del Algoritmo genético simple, y los resultados de costo y funcionamiento hidráulico se muestran en la Tabla 5.8

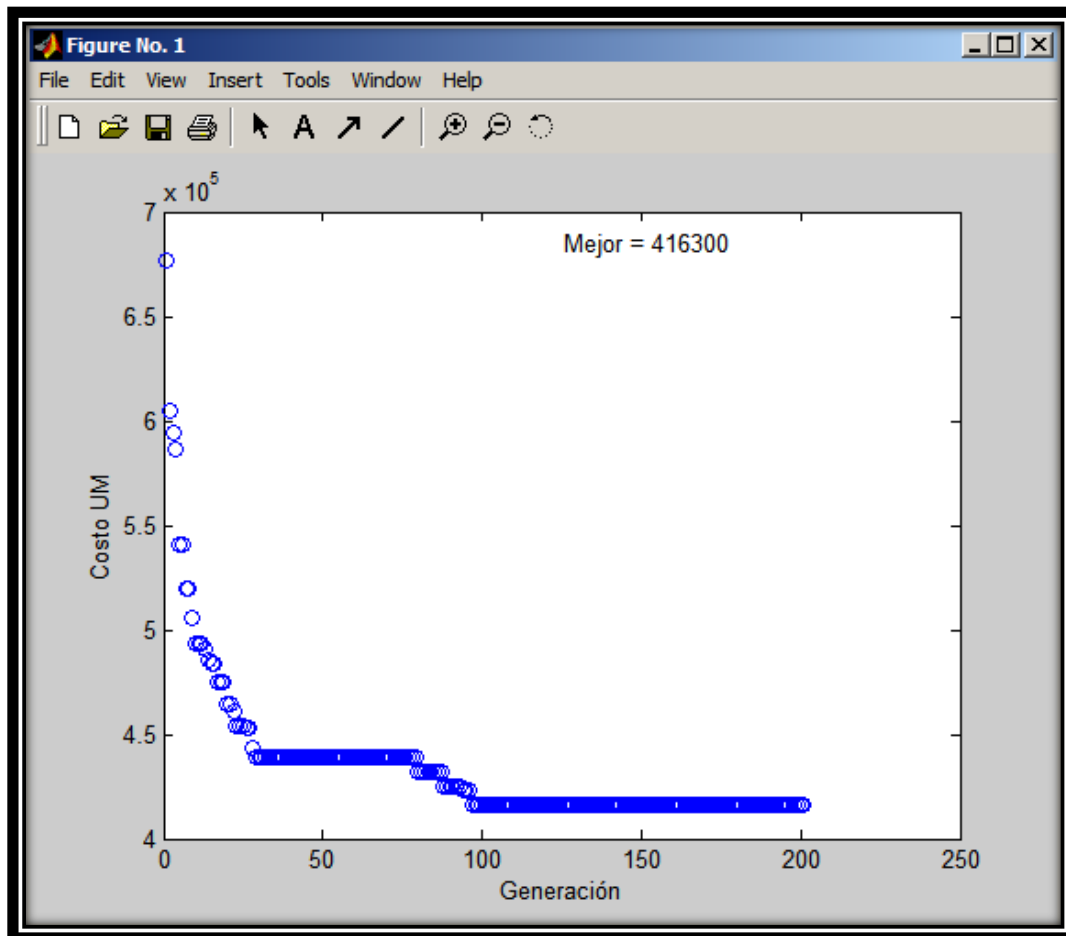


Figura 5.7 Evolución del Algoritmo genético para la red propuesta por Vázquez

Tabla 5.8 Resultados para la red propuesta por Vázquez

| Tramo Nodo | D(in) | Gasto(l/s) | Velocidad(m/s) | Factor de fricción | Carga de presión disponible (m) |
|------------------------------------|--------------|-------------------|-----------------------|-------------------------------|--|
| 1 | 10 | 67.22 | 1.37 | 0.019 | |
| 2 | 12 | 67.22 | 0.95 | 0.018 | 93.55 |
| 3 | 4 | 5.2 | 0.66 | 0.025 | 91.85 |
| 4 | 6 | 24.71 | 1.4 | 0.021 | 89.63 |
| 5 | 4 | 8.07 | 1.03 | 0.024 | 96.65 |
| 6 | 6 | 11.93 | 0.67 | 0.022 | 83.77 |
| 7 | 4 | 4.13 | 0.53 | 0.025 | 85.5 |
| 8 | 4 | 4.22 | 0.54 | 0.025 | 87.29 |
| 9 | 10 | 57.79 | 1.18 | 0.019 | 88.79 |
| 10 | 6 | 7.99 | 0.44 | 0.023 | 86.11 |
| 11 | 10 | 62.02 | 1.26 | 0.019 | |
| 12 | 8 | 29.91 | 0.95 | 0.02 | |
| 13 | 8 | 32.78 | 1.04 | 0.02 | |
| Costo de la red: \$ 416,300 | | | | | |

Vázquez, propuso un método de optimización basado en las ecuaciones de Hardy Cross. En la Tabla 5.9 se muestran los resultados obtenidos por él, también se muestran los resultados obtenidos mediante el método propuesto por Saldarriaga. Las últimas 2 columna muestra los resultados obtenidos con el Algoritmo genético y aunque todos obtiene una red que funciona bien hidráulicamente, son más cara que la red obtenida con el Algoritmo genético excepto la red de Martín.

Tabla 5.9 Comparación de resultados para la red propuesta por Vázquez

| Autor | Vázquez et al. (1989) | | Saldarriaga (2003) | | Martín (2004) | | Este trabajo | |
|----------------------------|--------------------------|-------|-----------------------|-------|------------------|-------|----------------|-------|
| | D(in) | P(m) | D(in) | P(m) | D(in) | P(m) | D(in) | P(m) |
| 1 | 12 | | 6 | | 4 | | 10 | |
| 2 | 12 | 26.77 | 8 | 19.83 | 4 | 25.44 | 12 | 23.55 |
| 3 | 6 | 24.62 | 4 | 18.26 | 4 | 22.40 | 4 | 21.58 |
| 4 | 6 | 23.87 | 8 | 20.81 | 10 | 22.99 | 6 | 19.63 |
| 5 | 6 | 24.45 | 8 | 24.84 | 6 | 26.96 | 4 | 26.55 |
| 6 | 6 | 20.27 | 6 | 18.82 | 4 | 17.54 | 6 | 13.77 |
| 7 | 4 | 20.74 | 4 | 16.17 | 4 | 17.43 | 4 | 15.5 |
| 8 | 6 | 21.06 | 4 | 17.8 | 8 | 19.31 | 4 | 17.29 |
| 9 | 12 | 23.21 | 8 | 17.61 | 10 | 16.74 | 10 | 18.79 |
| 10 | 4 | 22.33 | 8 | 15.4 | 4 | 15.25 | 6 | 16.11 |
| 11 | 6 | | 8 | | 10 | | 10 | |
| 12 | 6 | | 10 | | 12 | | 8 | |
| 13 | 12 | | 10 | | 4 | | 8 | |
| Costo(\$) | 477,300 | | 425,900 | | 372,600 | | 416,300 | |
| Evaluaciones | | | | | 5,000 | | 40,000 | |
| Tiempo de cómputo | | | | | 182.7 s | | 2772.1s | |
| Fracción del espacio total | | | | | $2.18e^{-11}$ | | $1.57e^{-06}$ | |

En comparación con el trabajo de Martín aunque tenga menor costo no es la más eficiente dado que tiene una velocidad por encima de la mínima recomendable que es de 0.3 m/s en el tramo 6.

Tabla 5.10 Comparación de velocidades red Vásquez

| Tramo/Nodo | Martín Velocidad (m/s) | Este trabajo Velocidad (m/s) |
|-------------------|-----------------------------------|---|
| 1 | 0.63 | 1.37 |
| 2 | 0.63 | 0.95 |
| 3 | 0.33 | 0.66 |
| 4 | 1.45 | 1.4 |
| 5 | 1.14 | 1.03 |
| 6 | 0.11 | 0.67 |
| 7 | 0.54 | 0.53 |
| 8 | 1.13 | 0.54 |
| 9 | 0.88 | 1.18 |
| 10 | 0.66 | 0.44 |
| 11 | 1.40 | 1.26 |
| 12 | 1.29 | 0.95 |
| 13 | 0.97 | 1.04 |

5.7.2 Red 2

Propuesta por Carrillo et al. en 1998. La Figura 5.8 muestra el trazo y la Tabla 5.11 los datos necesarios para el diseño.

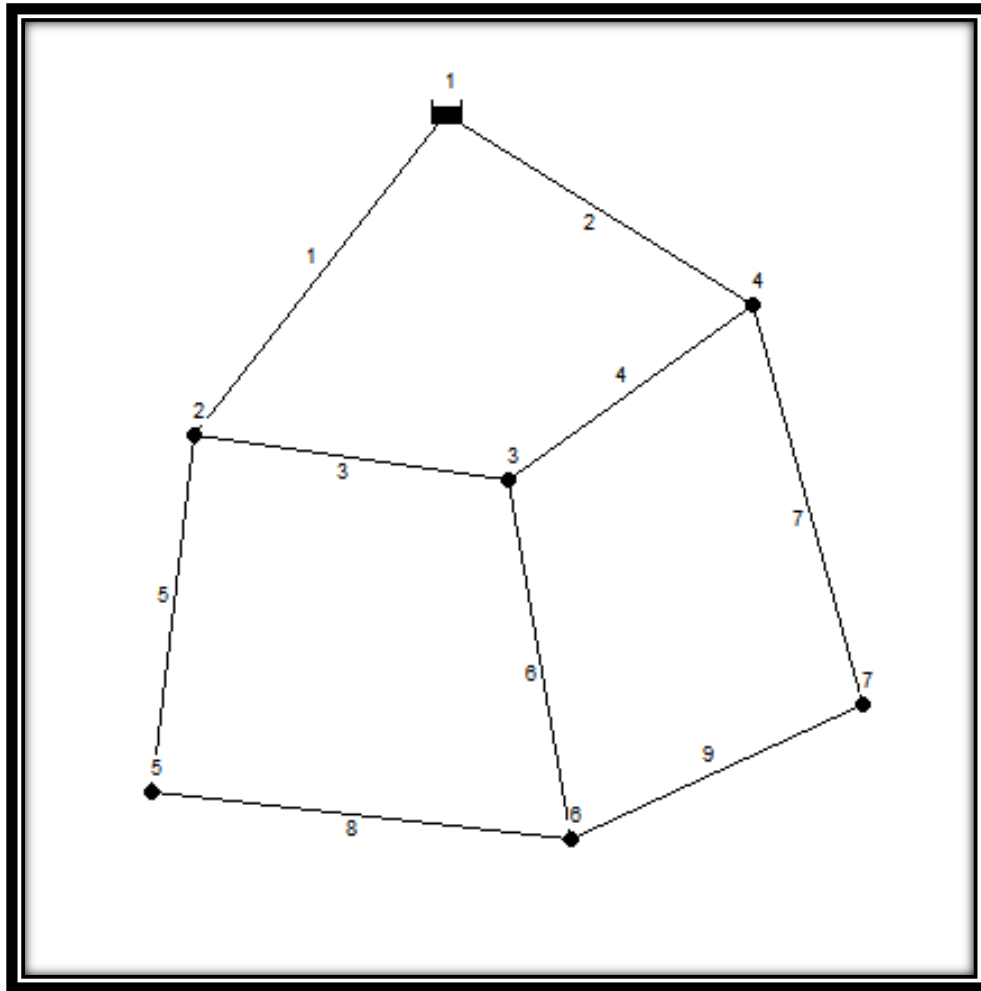


Figura 5.8 Trazo de la red utilizada por Carrillo en 1998

Tabla 5.11 Datos necesarios para el diseño

| D(in) | Costo(\$/m) | Tramo | Longitud(m) | Nodo | Demanda(l/s) | Elevación(m) |
|--------------------------------------|-------------|-------|-------------|---------------------|---------------------------|--------------|
| 6 | 45 | 1 | 687 | 2 | 127.5 | 2254 |
| 8 | 66 | 2 | 291 | 3 | 79.5 | 2188 |
| 10 | 88 | 3 | 502 | 4 | 103.5 | 2239 |
| 12 | 111 | 4 | 385 | 5 | 127.5 | 2125 |
| 14 | 136 | 5 | 373 | 6 | 141 | 2167 |
| 16 | 161 | 6 | 611 | 7 | 118.5 | 2216 |
| Material: FoGo $\epsilon=0.15$ mm | | 7 | 525 | 1 | Carga en el tanque: 2300m | |
| | | 8 | 682 | Pmín:10 m Pmax:50 m | | |
| | | 9 | 806 | | | |

La red consta de 9 tuberías y hay 6 posibles diámetros para cada una de ellas, teniéndose un total de 10, 077,696 posibles soluciones. Se seleccionó una población de 60 individuos y el programa realizó 60 generaciones, con lo cual se hicieron 3,600 análisis hidráulicos de todas las posibles soluciones, arriba mencionadas, esto representa el 0.036% del total.

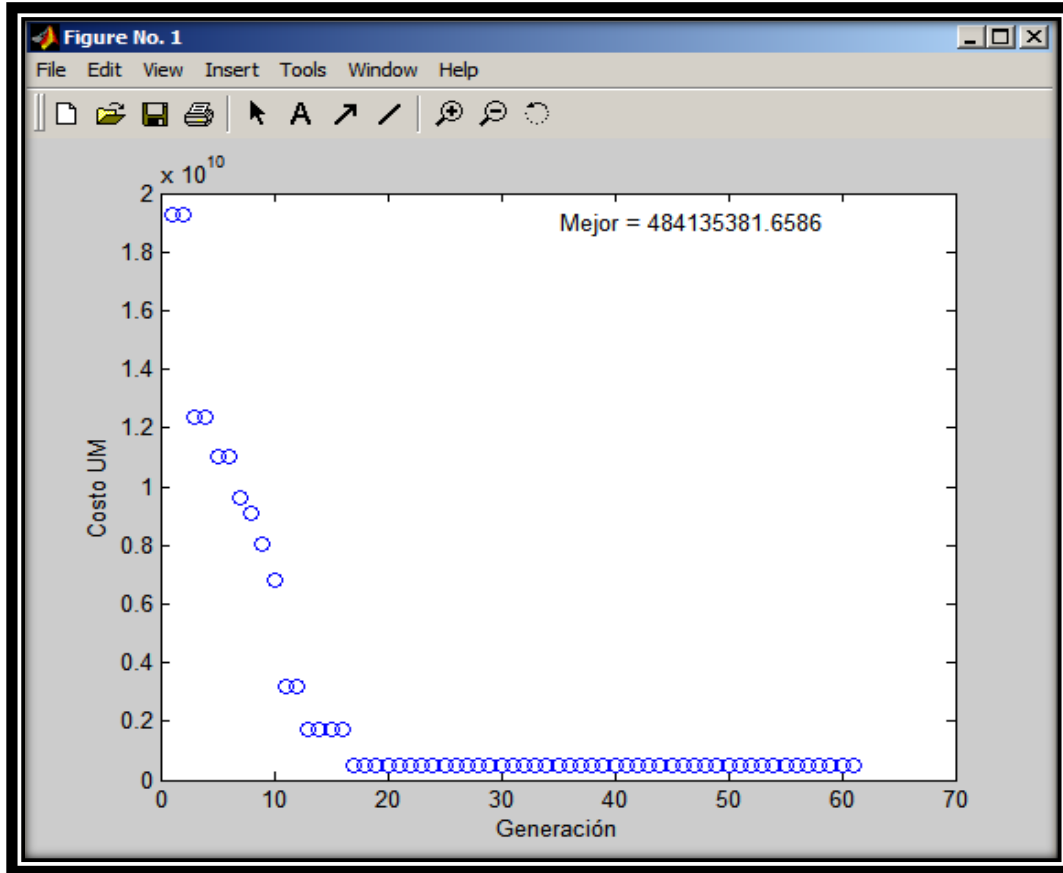


Figura 5.9 Evolución del Algoritmo genético para la red propuesta por Carrillo

En la Figura 5.9 se presenta la evolución del Algoritmo genético, y los resultados se muestran en la Tabla 5.12.

Tabla 5.12 Resultados del diseño de la red

| Tramo Nodo | D(in) | Gasto(l/s) | Velocidad(m/s) | Factor de fricción | Carga de presión disponible(m) |
|------------------------------------|--------------|-------------------|-----------------------|-------------------------------|---|
| 1 | 12 | 312.73 | 4.28 | 0.0171 | |
| 2 | 12 | 384.76 | 5.27 | 0.0170 | 9.87 |
| 3 | 6 | 76.41 | 4.18 | 0.0201 | 16.51 |
| 4 | 6 | 96.64 | 5.29 | 0.0200 | 37.94 |
| 5 | 6 | 108.81 | 5.69 | 0.0200 | 50.11 |
| 6 | 8 | 93.56 | 2.88 | 0.0190 | 13.25 |
| 7 | 10 | 184.61 | 3.64 | 0.0179 | 35.88 |
| 8 | 6 | 18.68 | 1.02 | 0.0215 | |
| 9 | 6 | 66.11 | 3.62 | 0.0202 | |
| Costo de la red: \$ 319,230 | | | | | |

En la Tabla 5.13 se tienen los resultados para la red propuesta por Carrillo; Sanvicente et al, la resolvieron utilizando la técnica de recocido simulado, muchos de los nodos tienen presiones por encima de la máxima tanto en la red obtenida por Carrillo como en la red de Sanvicente; en el caso de la solución obtenida por Rosales, el nodo 3 está ligeramente por encima del máximo, aunque el 5, sí tiene 18 metros más. En el caso de la solución obtenida con el Algoritmo genético, los nodos 2 y 5 violan ligeramente las restricciones de presión establecidas, 10 metros como presión mínima y 50 como máxima, las velocidades también están sobre las recomendadas pero al no haber más diámetros disponibles esta es la mejor solución.

Tabla 5.13 Comparación de resultados para la red propuesta por Carrillo

| Autor | Carrillo et al. (1998) | | Sanvicente et al. (2000) RS | | Rosales et al. (2003) | | Martín (2004) | | Este trabajo | |
|----------------------------|------------------------|--------|-----------------------------|--------|-----------------------|-------|----------------|-------|----------------|-------|
| | D(in) | P(m) | D(in) | P(m) | D(in) | P(m) | D(in) | P(m) | D(in) | P(m) |
| 1 | 16 | | 12 | | 12 | | 12 | | 12 | |
| 2 | 14 | 28.79 | 16 | 16.32 | 12 | 16.36 | 12 | 9.87 | 12 | 9.87 |
| 3 | 6 | 80.83 | 6 | 84.13 | 6 | 51.90 | 6 | 16.51 | 6 | 16.51 |
| 4 | 6 | 55.71 | 10 | 54.09 | 8 | 34.26 | 6 | 37.94 | 6 | 37.94 |
| 5 | 14 | 150.65 | 10 | 131.41 | 6 | 68.93 | 6 | 50.11 | 6 | 50.11 |
| 6 | 6 | 100.06 | 8 | 76.55 | 8 | 37.10 | 8 | 13.25 | 8 | 13.25 |
| 7 | 8 | 51.03 | 8 | 31.70 | 10 | 35.44 | 10 | 35.88 | 10 | 35.88 |
| 8 | 12 | | 6 | | 6 | | 6 | | 6 | |
| 9 | 16 | | 6 | | 6 | | 6 | | 6 | |
| Costo(\$) | 509,820 | | 354,610 | | 327,130 | | 319,230 | | 319,230 | |
| Evaluaciones | | | | | | | 4800 | | 3600 | |
| Tiempo de cómputo | | | | | | | 88s | | 200s | |
| Fracción del espacio total | | | | | | | 0.047% | | 0.036% | |

5.7.3 Red 3

Propuesta por Alperovits et al. en 1977. La Figura 5.10 muestra el trazo y la Tabla 5.14 los datos necesarios para el diseño.

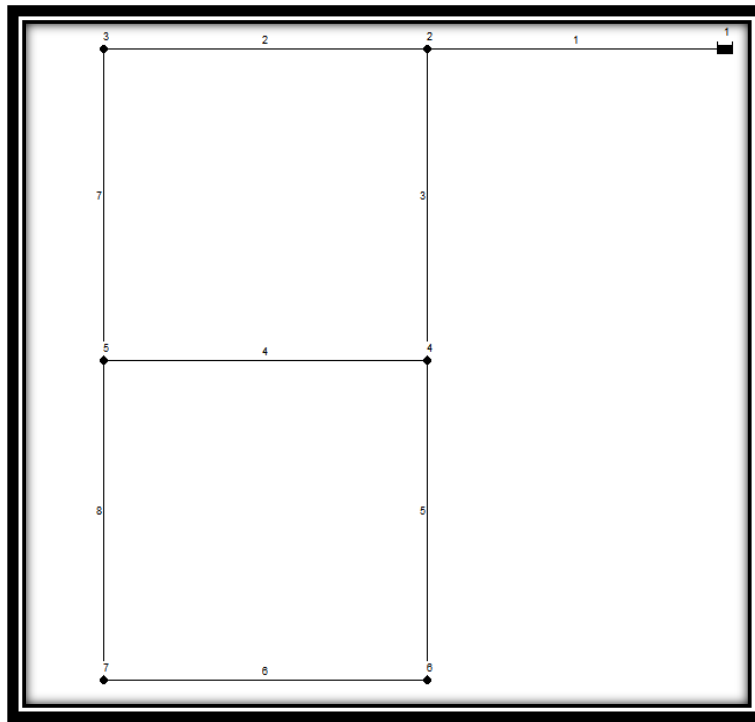


Figura 5.10 Trazo de la red utilizada por Alperovits en 1977

Tabla 5.14 Datos necesarios para el diseño

| D (in) | Costo (\$/m) | Tramo | Longitud (m) | Nodo | Demanda (l/s) | Elevación (m) |
|--------|--------------|-----------|--------------|------|-------------------------|---------------|
| 1 | 2 | 1 | 1000 | 2 | 27.78 | 150 |
| 2 | 5 | 2 | 1000 | 3 | 27.78 | 160 |
| 3 | 8 | 3 | 1000 | 4 | 33.33 | 155 |
| 4 | 11 | 4 | 1000 | 5 | 75.00 | 150 |
| 6 | 16 | 5 | 1000 | 6 | 91.67 | 165 |
| 8 | 23 | 6 | 1000 | 7 | 55.56 | 160 |
| 10 | 32 | 7 | 1000 | 1 | Carga en el tanque: 210 | |
| 12 | 50 | 8 | 1000 | | | |
| 14 | 60 | $C_H=130$ | | | $P_{\min}=30m$ | |
| 16 | 90 | | | | | |
| 18 | 130 | | | | | |
| 20 | 170 | | | | | |
| 22 | 300 | | | | | |
| 24 | 550 | | | | | |

La red consta de 8 tuberías y hay 14 posibles diámetros para cada una de ellas, teniéndose un total de 1.47×10^9 posibles soluciones.

El programa realizó 200 generaciones con 500 individuos en la población, realizando 10000 evaluaciones hidráulicas, que representan el 0.00678% de las totales existentes. En la Figura 5.11 se presenta la evolución del Algoritmo genético, y los resultados se muestran en la Tabla 5.15. Tiempo promedio de cómputo, 882.157 s.

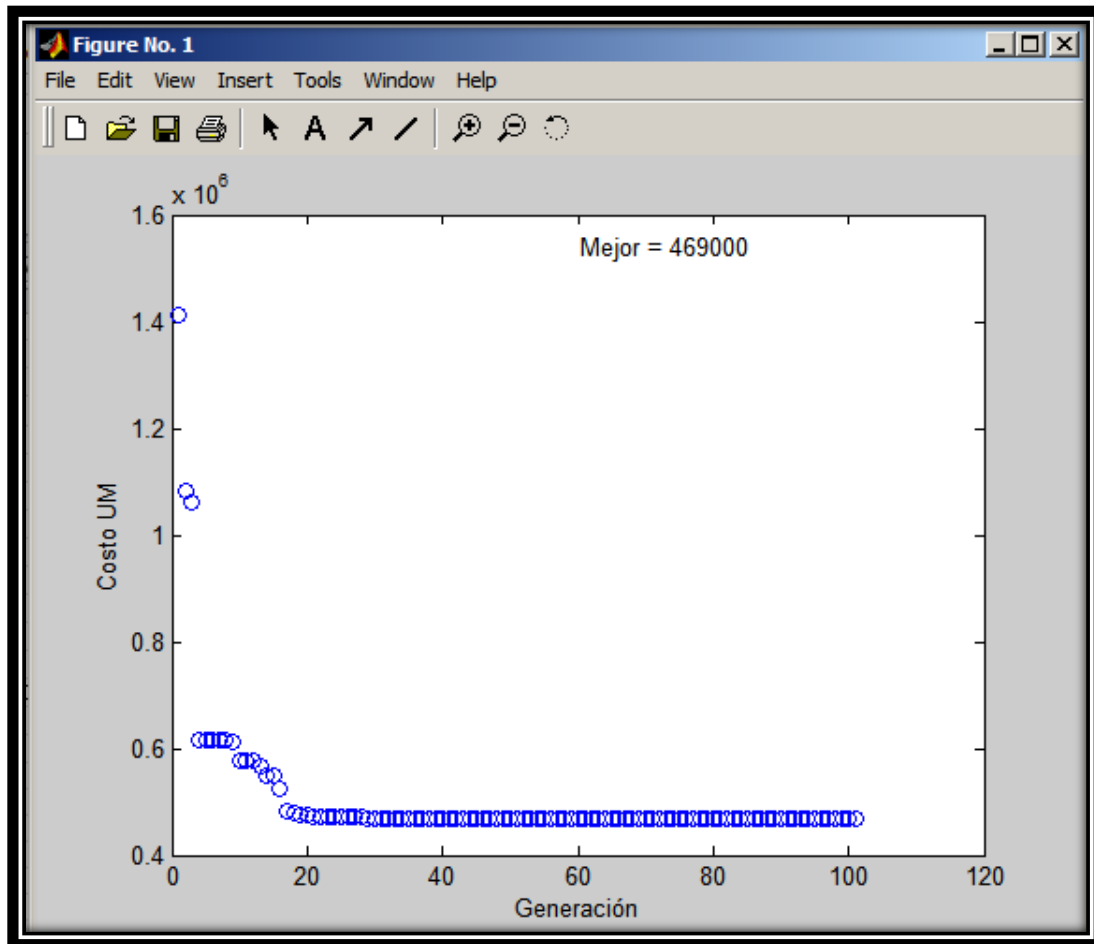


Figura 5.11 Evolución del Algoritmo genético para la red propuesta Alperovits

Tabla 5.15 Resultados del diseño de la red

| Tramo Nodo | D(in) | Gasto(l/s) | Velocidad(m/s) | Factor de fricción | Carga de presión disponible (m) |
|------------------------------------|--------------|-------------------|-----------------------|-------------------------------|--|
| 1 | 20 | 311.12 | 1.58 | 0.016 | |
| 2 | 10 | 76.60 | 1.56 | 0.019 | 55.92 |
| 3 | 16 | 206.74 | 1.65 | 0.017 | 36.68 |
| 4 | 6 | 26.03 | 1.47 | 0.021 | 45.16 |
| 5 | 16 | 147.38 | 1.17 | 0.017 | 34.61 |
| 6 | 10 | 55.71 | 1.13 | 0.019 | 32.18 |
| 7 | 8 | 48.82 | 1.55 | 0.020 | 32.20 |
| 8 | 1 | 0.15 | 0.30 | 0.041 | |
| Costo de la red: \$ 455,000 | | | | | |

La Tabla 5.16 muestra las soluciones obtenidas por muchos autores para la red propuesta por Alperovits, el principal problema que presentan los cuatro primeros autores, es que consideran al diámetro como una función continua, siendo que no lo es; además, debido a la metodología que utilizan para optimizar, es necesario que inserten nuevos nodos en los ya establecidos en el trazo de la red, esto propicia que un tramo de tubería tenga un porcentaje de su longitud total con un diámetro y el resto con otro diámetro diferente.

En el caso de la continuación de la Tabla 5.16, los autores Savic, Solamatine y Sanvicente, utilizan diámetros comerciales; Saldarriaga no utiliza diámetros comerciales, pero antes de dar por terminado el cálculo, su método incluye una subrutina para redondear los diámetros obtenidos a los comerciales más cercanos. En el caso de este trabajo, también se utilizan diámetros comerciales, por lo que no es necesario, al final de la optimización, hacer ningún ajuste en los diámetros. La última columna presenta los resultados obtenidos con el método propuesto en este trabajo, la columna rotulada con DW, indica que los cálculos se realizaron con la ecuación de Darcy Weisbach. Es sabido que la ecuación de Darcy “modela” mejor lo que en realidad ocurre debido al rozamiento entre el fluido, las paredes del conducto y las mismas capas de fluido.

Las soluciones para dicha red muestran diámetros que van desde una hasta 10 pulgadas, es evidente que se trata de una red de “ejercicio”, que como ejemplo es válido, pero, por reglamento de construcción y en opinión de Rosales, no es ingenierilmente factible tener una red primaria con tal variedad de diámetros. Tomando en cuenta lo anterior y las recomendaciones realizadas para presión de 30 min y 50 max, velocidad mínima de 0.3 m/s y 5 m/s, se optimizó la misma red pero esta vez considerando que el conjunto de diámetros disponibles va desde 6 hasta 18 pulgadas, permitiendo incluso que algún tramo tuviera un diámetro de 4 pulgadas, los resultados obtenidos por Rosales y con el método propuesto en este trabajo, se muestran en la última parte de la Tabla 5.16.

La columna que está rotulada con CE indica que para ese caso de estudio, el método utilizado para la optimización fue el de enumeración casi exhaustiva. Observando los

resultados, podemos ver que el método propuesto es capaz de llegar al óptimo global revisando una fracción muy pequeña del espacio de búsqueda y además en muy poco tiempo.

Tabla 5.16 Comparación de resultados para la red propuesta por Alperovits

| Autor | Alperovits & shamir (1977) | | Goulter et al. (1986) | | Kessler & Shamir (1989) | | Eiger et al. (1994) | |
|-------------------|----------------------------|-------|-----------------------|-------|-------------------------|-------|---------------------|-------|
| | L (m) | D (m) | L (m) | D (m) | L (m) | D (m) | L (m) | D (m) |
| 1 | 256 | 20 | 383 | 20 | 1000 | 18 | 1000 | 18 |
| | 744 | 18 | 617 | 18 | | | | |
| 2 | 996.38 | 8 | 1000 | 10 | 66 | 12 | 238.02 | 12 |
| | 3.62 | 6 | | | 934 | 10 | 761.98 | 10 |
| 3 | 1000 | 18 | 1000 | 16 | 1000 | 16 | 1000 | 16 |
| 4 | 319.38 | 8 | 687 | 6 | 713 | 3 | 1000 | 1 |
| | 680.62 | 6 | 313 | 4 | 287 | 2 | | |
| 5 | 1000 | 16 | 1000 | 16 | 836 | 16 | 628.86 | 16 |
| | | | | | 164 | 14 | 371.14 | 14 |
| 6 | 748.94 | 12 | 98 | 12 | 109 | 12 | 989.05 | 10 |
| | 215.06 | 10 | 902 | 10 | 891 | 10 | 10.95 | 8 |
| 7 | 1000 | 6 | 492 | 10 | 819 | 10 | 921.86 | 10 |
| | | | 208 | 8 | 181 | 8 | 78.14 | 8 |
| 8 | 990.93 | 6 | 20 | 2 | 920 | 3 | 1000 | 1 |
| | 9.07 | 4 | 980 | 1 | 80 | 2 | | |
| Costo (UM) | 477,733.89 | | 428,107 | | 417,500 | | 402,348.35 | |

Tabla 5.16 Continuación

| Autor | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| tubo | D (in) | D (in) | D (in) | D (in) | D (in) | D (in) | D (in) | D (in) | D (in) |
| 1 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 18 | 20 |
| 2 | 10 | 10 | 14 | 16 | 14 | 12 | 10 | 10 | 10 |
| 3 | 16 | 16 | 14 | 14 | 16 | 18 | 16 | 16 | 16 |
| 4 | 4 | 4 | 1 | 2 | 3 | 8 | 4 | 6 | 6 |
| 5 | 16 | 16 | 14 | 14 | 14 | 12 | 16 | 16 | 16 |
| 6 | 10 | 10 | 1 | 1 | 8 | 1 | 10 | 10 | 10 |
| 7 | 10 | 10 | 14 | 14 | 12 | 12 | 10 | 8 | 8 |
| 8 | 1 | 2 | 12 | 10 | 8 | 12 | 1 | 1 | 1 |
| Costo (UM) | 419,000 | 422,000 | 424,000 | 439,000 | 444,000 | 485,000 | 485,000 | 415,000 | 455,000 |
| Evaluaciones | 1373 | | | | | | 4,800 | 4,800 | 100,000 |
| Tiempo de computo | 10 min | | | | | | 112 s | 124 s | 882 s |
| Fracción total del espacio % | 9.3 e-7 | 6.7 e-6 | 2.2 e-6 | 4.9 e-6 | | | 3.2 e-6 | 3.2 e-6 | 0.00678 |

1 Savic & Walters (1997) AG
 2 Solamatine et al. (1998) CRS2
 3 Solamatine et al. (1998) AG
 4 Solamatine et al. (1998) CRS4
 5 Sanvicente & Frausto (2000) RS

6 Saldarriaga (2003)
 7 Martín HW
 8 Martín DW
 10 este trabajo DW

Tabla 5.16 Continuación

| Autor | Rosales et al. (2003) Metodo | | Rosales et al (2003) CE | | Martín (2004) | | Este trabajo | |
|-------------------------------------|---|-------|------------------------------------|-------|--------------------------|-------|---------------------|-------|
| Tramo/ Nodo | D (in) | P (m) | D (in) | P (m) | D(in) | P (m) | D(in) | P (m) |
| 1 | 18 | | 18 | | 18 | | 18 | |
| 2 | 12 | 53.55 | 14 | 53.55 | 14 | 53.55 | 14 | 54.07 |
| 3 | 16 | 38.86 | 14 | 39.50 | 14 | 39.26 | 14 | 38.96 |
| 4 | 8 | 43.95 | 8 | 42.44 | 6 | 42.72 | 4 | 44.88 |
| 5 | 14 | 42.99 | 14 | 44.00 | 14 | 43.34 | 14 | 45.53 |
| 6 | 8 | 30.09 | 4 | 30.03 | 6 | 29.88 | 4 | 32.66 |
| 7 | 10 | 30.23 | 12 | 30.20 | 12 | 30.70 | 14 | 34.09 |
| 8 | 8 | | 10 | | 10 | | 12 | |
| Costo (UM) | 431,000 | | 426,000 | | 424,000 | | 442,000 | |
| Evaluaciones | | | | | 8000 | | 500000 | |
| Tiempo de computo | | | | | 143.5 s | | 3498.4 s | |
| Fracción total del espacio % | | | | | 0.00054 | | 0.0033 | |

5.7.4 Red 4.

Propuesta por Fujiwara en 1990. La Figura 4.12 muestra el esquema de la red y la Tabla 4.12 los datos necesarios para el diseño.

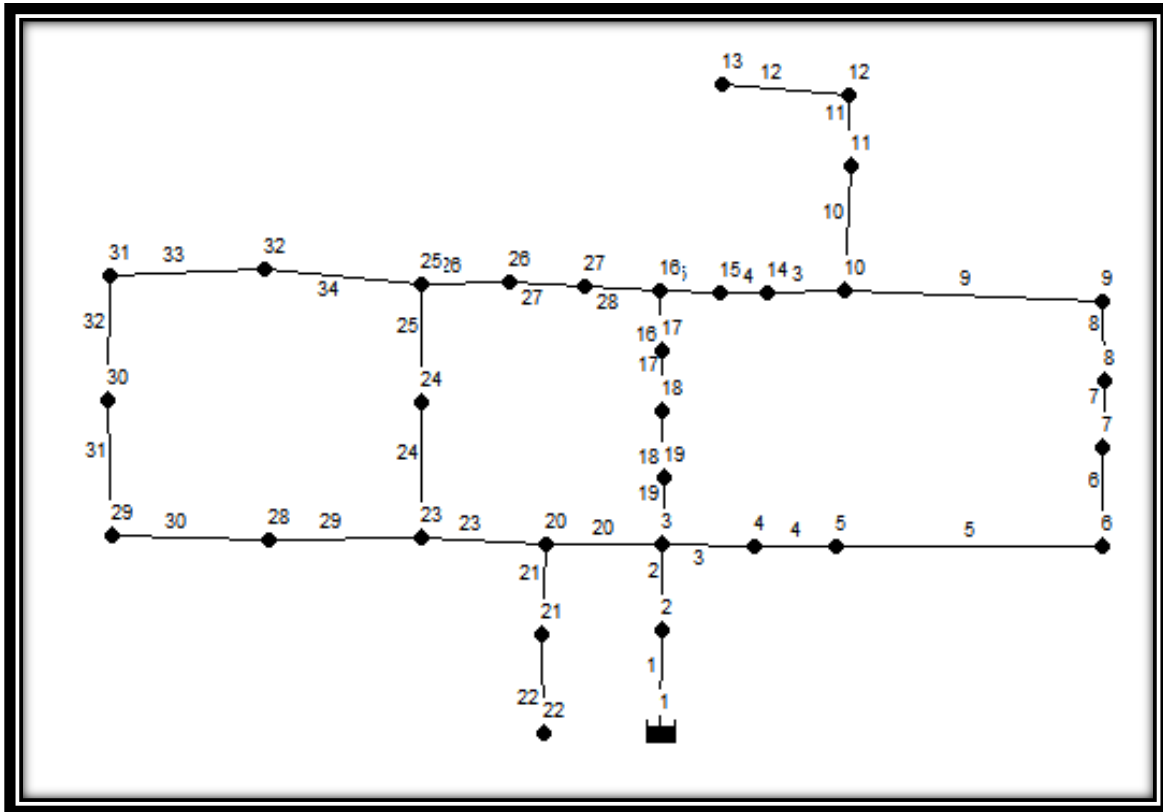


Figura 5.12 Esquema de la red utilizada por Fujiwara en 1990

La red consta de 34 tuberías y hay 6 posibles diámetros para cada una de ellas, teniéndose un total de 2.8×10^{26} posibles soluciones. Se corrió el Algoritmo genético simple por 100 generaciones con 1000 individuos en la población, con lo cual se evaluaron 100,000 posibles soluciones en un tiempo de dos horas; esas 100,000 evaluaciones representan 3.57×10^{-20} % del total. En la Figura 4.13 se presenta la evolución del Algoritmo genético simple, y los resultados tanto de costo como hidráulicos se muestran en la Tabla 4.13.

Los diámetros comerciales disponibles para esta red son seis: 12, 16, 20, 24, 30 y 40 pulgadas. El costo se evalúa con la siguiente expresión:

$$C_i = 1.1 * L_i * D_i^{1.5}$$

donde

- | | |
|-------|---|
| C_i | costo de la tubería, en unidades monetarias, \$ por ejemplo |
| L_i | longitud de la tubería, en m |
| D_i | diámetro de la tubería, en pulgadas |

Tabla 5.17 Datos necesarios para el diseño

| Tramo | Longitud | Nodo | Demanda |
|--------------|-----------------|---------------------|-------------------------|
| 1 | 100 | 2 | 247.22 |
| 2 | 1350 | 3 | 236.11 |
| 3 | 900 | 4 | 36.11 |
| 4 | 1150 | 5 | 201.39 |
| 5 | 1450 | 6 | 279.17 |
| 6 | 450 | 7 | 375 |
| 7 | 850 | 8 | 152.78 |
| 8 | 850 | 9 | 145.83 |
| 9 | 800 | 10 | 145.83 |
| 10 | 950 | 11 | 138.89 |
| 11 | 1200 | 12 | 155.56 |
| 12 | 3500 | 13 | 261.11 |
| 13 | 800 | 14 | 170.83 |
| 14 | 500 | 15 | 77.78 |
| 15 | 550 | 16 | 86.11 |
| 16 | 2730 | 17 | 240.28 |
| 17 | 1750 | 18 | 373.61 |
| 18 | 800 | 19 | 16.67 |
| 19 | 400 | 20 | 354.17 |
| 20 | 2200 | 21 | 258.33 |
| 21 | 1500 | 22 | 134.17 |
| 22 | 500 | 23 | 290.28 |
| 23 | 2650 | 24 | 227.78 |
| 24 | 1230 | 25 | 47.22 |
| 25 | 1300 | 26 | 250 |
| 26 | 850 | 27 | 102.78 |
| 27 | 300 | 28 | 80.56 |
| 28 | 750 | 29 | 100 |
| 29 | 1500 | 30 | 100 |
| 30 | 2000 | 31 | 29.17 |
| 31 | 1600 | 32 | 223.61 |
| 32 | 150 | 1 | Carga en el tanque 100m |
| 33 | 860 | Pmín= 30m | |
| 34 | 950 | C _H =130 | |

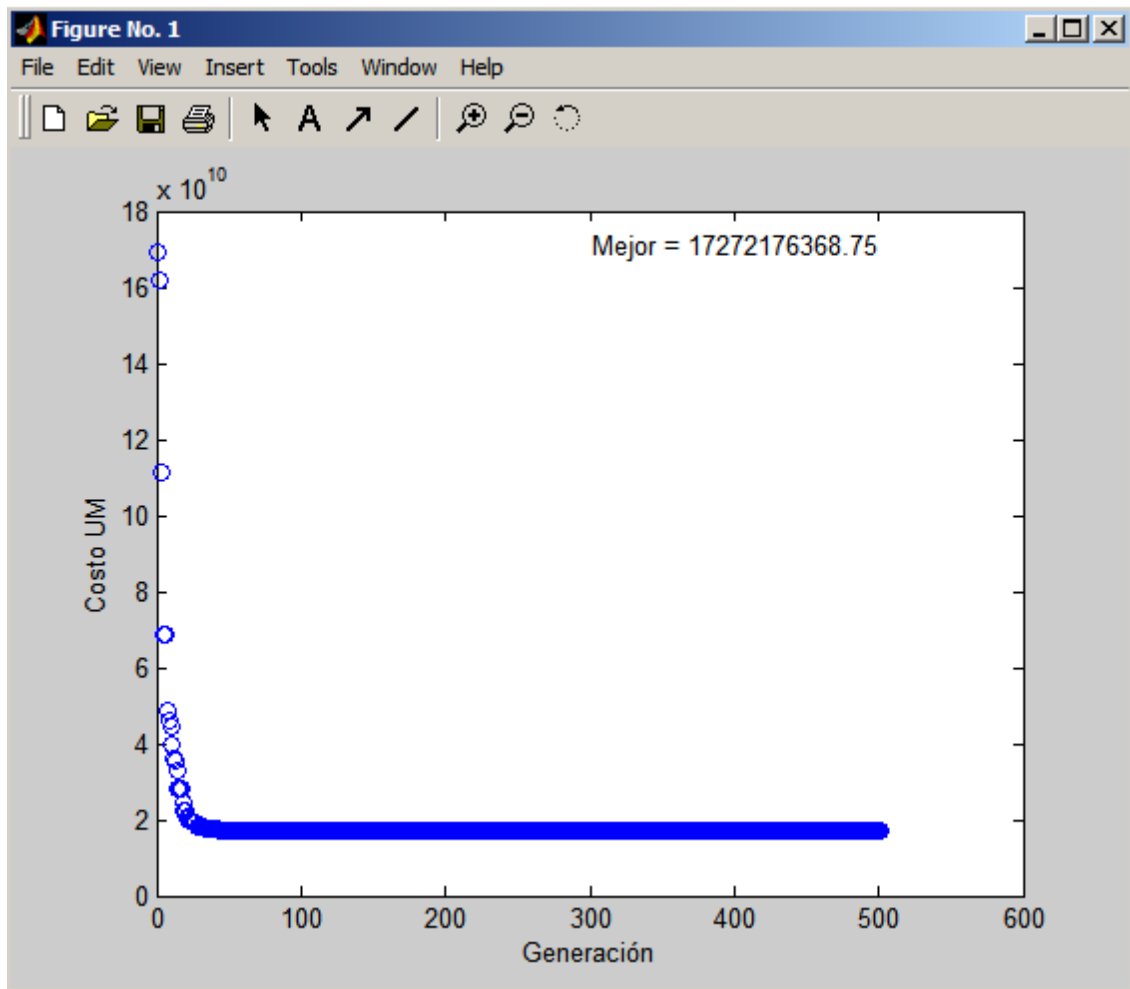


Figura 5.13 Evolución del Algoritmo genético para la red propuesta por Fujiwara

Tabla 5.18 Resultados para la red propuesta por Fujiwara

| Tramo/ Nodo | Diámetro (in) | Gasto (l/s) | Velocidad (m/s) | Presión (m) |
|---|---------------|-------------|-----------------|-------------|
| 1 | 40 | 5538.35 | 6.83 | |
| 2 | 40 | 5291.13 | 6.53 | 97.19 |
| 3 | 40 | 1559.14 | 1.92 | 62.57 |
| 4 | 40 | 1523.03 | 1.88 | 60.45 |
| 5 | 40 | 1321.64 | 1.63 | 57.87 |
| 6 | 40 | 1042.47 | 1.29 | 55.4 |
| 7 | 40 | 667.47 | 0.82 | 54.92 |
| 8 | 40 | 514.69 | 0.63 | 54.53 |
| 9 | 40 | 368.86 | 0.45 | 54.29 |
| 10 | 40 | 555.56 | 0.51 | 54.17 |
| 11 | 40 | 416.67 | 0.32 | 53.86 |
| 12 | 40 | -332.53 | 0.41 | 53.63 |
| 13 | 40 | -503.36 | 0.62 | 53.36 |
| 14 | 40 | -581.14 | 0.72 | 54.27 |
| 15 | 40 | -967.15 | 1.19 | 54.4 |
| 16 | 40 | -1207.43 | 1.49 | 54.6 |
| 17 | 40 | -1597.71 | 1.95 | 57.15 |
| 18 | 40 | 1898.17 | 1.97 | 59.65 |
| 19 | 40 | 392.5 | 2.34 | 61.58 |
| 20 | 40 | 134.17 | 1.84 | 55 |
| 21 | 40 | 1151.5 | 1.42 | 54.75 |
| 22 | 12 | 271.25 | 0.33 | 50.18 |
| 23 | 40 | 43.47 | 0.6 | 51.54 |
| 24 | 40 | 52.88 | 0.72 | 51.43 |
| 25 | 12 | -197.12 | 2.7 | 50.05 |
| 26 | 12 | -299.9 | 0.37 | 48.74 |
| 27 | 12 | 589.97 | 0.73 | 54.52 |
| 28 | 40 | 509.41 | 0.63 | 50.99 |
| 29 | 40 | 409.41 | 0.5 | 50.44 |
| 30 | 40 | 309.41 | 0.38 | 50.15 |
| 31 | 40 | 280.24 | 0.35 | 50.13 |
| 32 | 40 | 56.63 | 0.07 | 50.06 |
| 33 | 40 | 5538.35 | 6.83 | |
| 34 | 40 | 5291.13 | 6.53 | |
| Costo de la red: \$ 10.28 X 10 ⁶ | | | | |

Tabla 5.19 Comparacion de resultados obtenidos por otros autores para la red de fujiwara

| Autor | Costo millones de \$ | Tiempo de computo |
|--|-----------------------------|----------------------------|
| Fujiwara & kang (1990) continuos solucion | 5.3 | |
| Fujiwara & kang (1990) continuos solucion | 5.5 | |
| Eiger et al (1994) split pipè solution | 6.0 | |
| Savic & walters(1997)AG | 6.1 | 10,000 generaciones(3hr) |
| Solatimeet al (1988) AG | 7.0 | 16,910 evaluaciones(1hr) |
| Solatimeet al (1988) AG | 7.8 | 3,055 evaluaciones(15min) |
| Martín(2004) AG | 6.1 | 100,000 evaluaciones(2hr) |
| Este trabajo AG | 10.28 | 500,000 evaluaciones(10hr) |

La Tabla 5.18 presenta los resultados para la red de Hanoi, propuesta por Fujiwara, los dos primeros resultados, obtenidos por el propio Fujiwara tienen la inconveniencia de, el primero considerar los diámetros como una función continua y el segundo, el de incluir nodos adicionales a los originalmente propuestos en el trazo de la tubería, dando como resultado que un tramo tenga dos diámetros diferentes en longitudes arbitrarias. En comparación con las otras redes las velocidades están por debajo de 0.3 m/s lo que afectaría a la red el que sean más económicas no resulta ser siempre la mejor opción de eficiencia. Aunque se realizaron 500,000 evaluaciones la red se solucionó con un aproximado de 100,000.

Una vez demostrados los beneficios de costo y eficiencia del diseño por medio de un algoritmo genético se realizara el diseño de una red real COCOTITLÁN, ESTADO DE MÉXICO.

5.8 CASO DE ESTUDIO COCOTITLÁN, ESTADO DE MÉXICO



Figura 5.14 Mapa Cocotitlán

Cocotitlán es una población del estado de México fundada en febrero de 1825, los datos del municipio son:

- Superficie total de 31.52 km²
- Elevación de 2,250 msnm
- Población 12,142 habitantes
- Densidad de población 385.22 hab/km²
- Población en Cocotitlán.

La población total del Municipio Cocotitlán es de 12120 personas, de cuales 5928 son masculinos y 6192 femeninas.

- Edades de la población

La población de se Cocotitlán divide en 4721 menores de edad y 7399 adultos, de cuales 961 tienen más de 60 años.

- Estructura económica

En Cocotitlán hay un total de 2765 hogares. De estas 2472 viviendas, 185 tienen piso de tierra y unos 206 consisten de una habitación solo. 2333 de todas las viviendas tienen

instalaciones sanitarias, 2176 son conectadas al servicio público, 2339 tienen acceso a la luz eléctrica.

Para las comunidades en desarrollo es necesario satisfacer las necesidades básicas de la población es este caso se dará solución al abastecimiento de agua potable por lo que se necesitan los datos básicos de la red diseñada en tubería de pvc ($\epsilon=0.0015$):

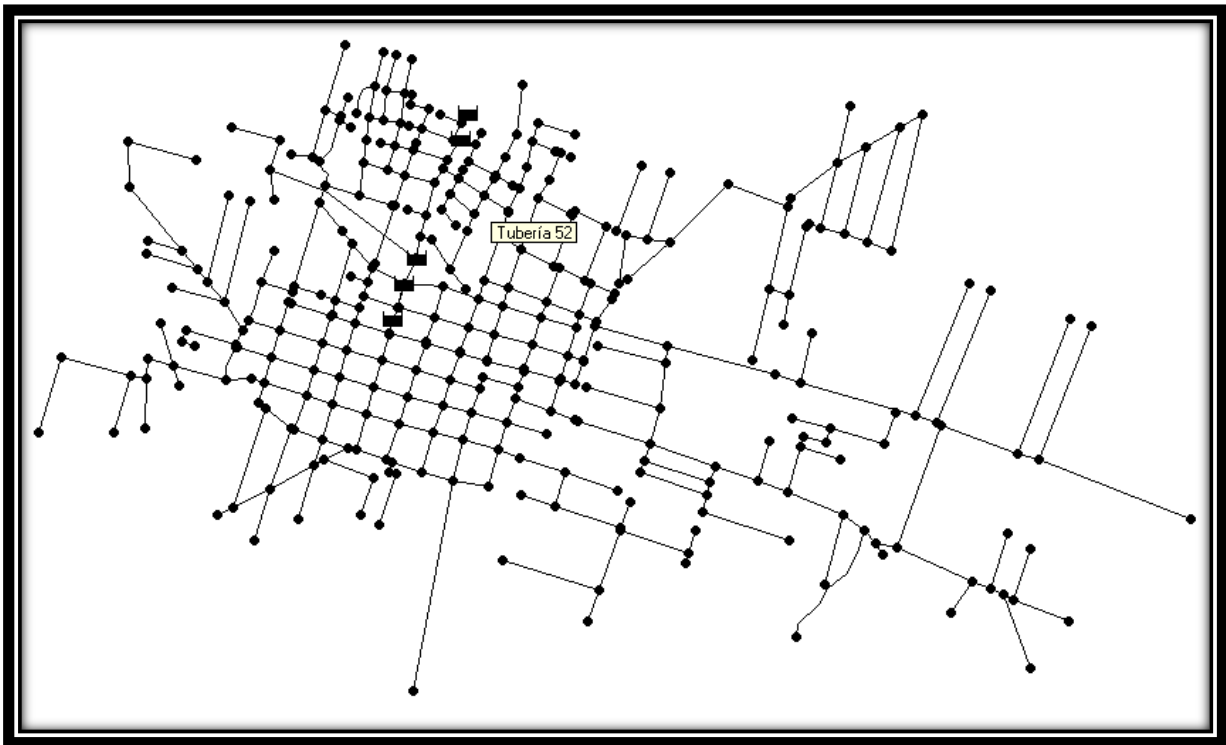


Figura 5.15 Red Cocotitlán

Tabla 5.20 Datos necesarios para el diseño (tabla completa en el anexo)

| Nudo | Elevación (m) | Demanda (lps) | Tramo | Longitud (m) |
|-----------------------------|----------------------|----------------------|--------------|---------------------|
| 1 | 2257 | 0.155 | 2 | 92.94 |
| 2 | 2292 | 0.155 | 3 | 50.71 |
| 3 | 2325 | 0.155 | 4 | 35.94 |
| 4 | 2304 | 0.155 | 5 | 43.92 |
| 5 | 2288 | 0.155 | 6 | 33.03 |
| 6 | 2318 | 0.155 | 7 | 86.75 |
| 7 | 2341 | 0.155 | 8 | 28.94 |
| 8 | 2259 | 0.155 | 9 | 77.02 |
| 9 | 2265 | 0.155 | 10 | 77.17 |
| 10 | 2270 | 0.155 | 11 | 37.84 |
| 11 | 2274 | 0.155 | 12 | 49.85 |
| 12 | 2299 | 0.155 | 13 | 90.48 |
| 13 | 2311 | 0.155 | 14 | 64.57 |
| 14 | 2332 | 0.155 | 15 | 48.15 |
| 15 | 2363 | 0.155 | 16 | 78.72 |
| Deposito | Carga (m) | | 17 | 59.22 |
| 18 | 2405 | | 18 | 65.87 |
| 17 | 2373 | | 19 | 67.82 |
| 83 | 2331 | | 20 | 39.62 |
| 500 | 2317 | | 21 | 83.98 |
| 34 | 2304 | | 22 | 87.25 |
| Rugosidad 0.0015 | | | 23 | 93.98 |
| | | | 24 | 156.86 |

La red será diseñada en tubería de pvc ($\epsilon=0.015\text{mm}$) con los siguientes diámetros: 2, 2.5, 3, 4, 6, 8, 10,12 pulgadas, presión mínima será de 10 m y 50m la máxima, con una velocidad mínima de 0.3 m/s y máxima de 5m/s

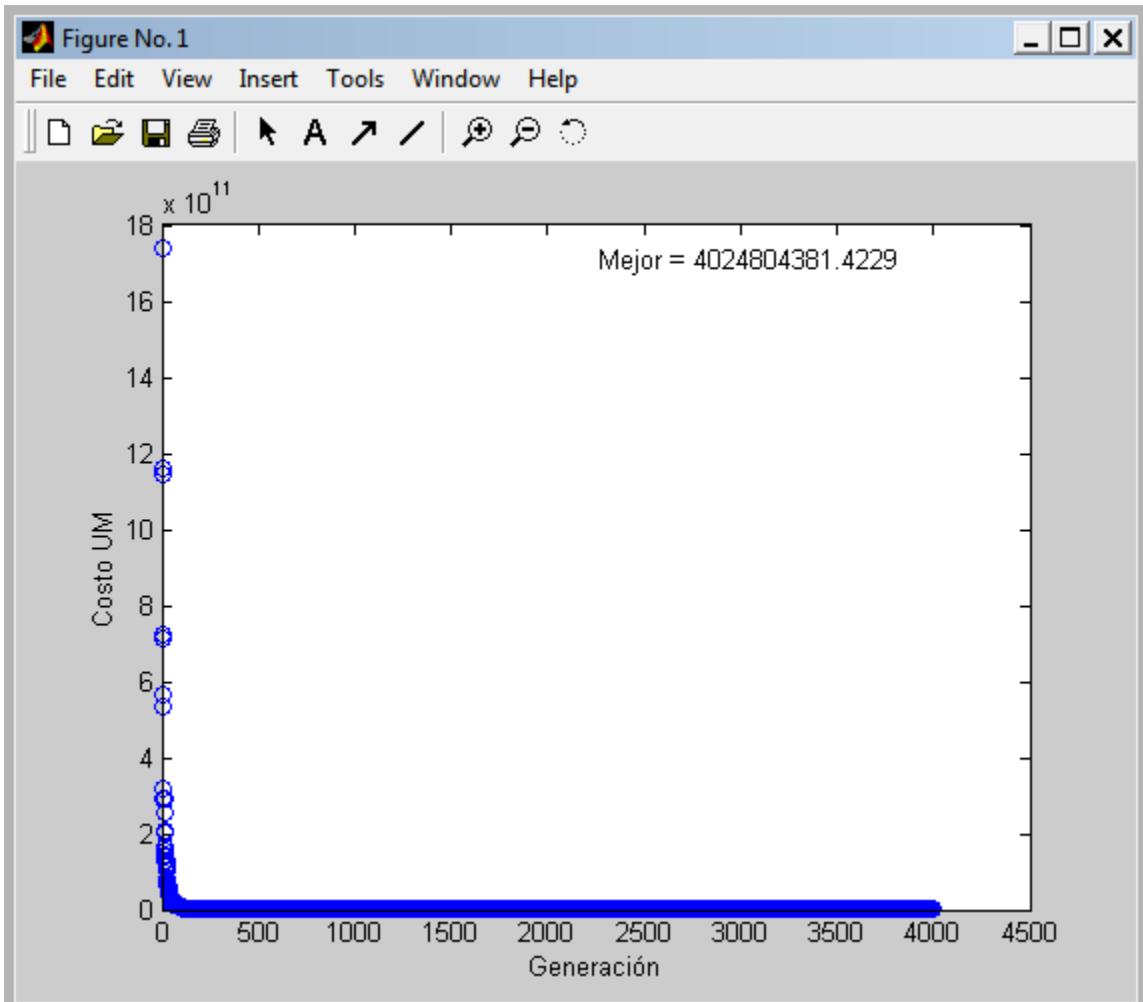


Figura 5.16 Evolución del Algoritmo genético para 2000 individuos y 4000 generaciones para la red Cocotitlán tiempo de computo 9 días

Tabla 5.21 Resultados de la red Cocotitlán

| Nud o | Presión (m) | Tramo | Diámetro (mm) | Caudal (lps) | Velocidad (m/s) | Pérd. Unit. (m/Km) |
|------------------|------------------------|--------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| 1 | 5.05 | 2 | 12.7 | -0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 2 | 0.68 | 3 | 12.7 | 0.09 | 0.7 | 62.95 |
| 3 | 8.57 | 4 | 12.7 | -0.16 | 1.22 | 167.81 |
| 4 | 3.52 | 5 | 25.4 | -0.53 | 1.05 | 53.8 |
| 5 | 3.5 | 6 | 12.7 | -0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 6 | 27.97 | 7 | 25.4 | -0.93 | 1.84 | 144.76 |
| 7 | 8.17 | 8 | 63.5 | -2.79 | 0.88 | 12.73 |
| 8 | 32.51 | 9 | 19.05 | 0.22 | 0.78 | 45.7 |
| 9 | 23.99 | 10 | 25 | 0.4 | 0.81 | 34.87 |
| 10 | 10.5 | 11 | 12.7 | -0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 11 | 9.47 | 12 | 38.1 | -1.6 | 1.4 | 54.47 |
| 12 | 8.66 | 13 | 38.1 | -2.02 | 1.77 | 82.96 |
| 13 | 38.49 | 14 | 12.7 | -0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 14 | 19.86 | 15 | 12.7 | -0.11 | 0.84 | 87.16 |
| 15 | 23.44 | 16 | 19.05 | -0.3 | 1.06 | 78.2 |
| 16 | 33 | 17 | 38.1 | 1.09 | 0.95 | 27.37 |
| 19 | 13.76 | 18 | 19.05 | -0.2 | 0.71 | 39.35 |
| 20 | 26.48 | 19 | 25.4 | -0.27 | 0.53 | 16.38 |

CONCLUSIONES

Para solucionar la red de distribución de agua de COCOTITLÁN ESTADO DE MÉXICO, uno de los mayores problemas para el diseño es el costo y la eficiencia, existen varios métodos de minimización de costos pero dejan de lado la eficiencia por lo que se desarrolló el algoritmo genético que toma en consideración presión, velocidad, y costo de las redes de distribución de agua potable, por lo que garantiza un mejor diseño.

Este Algoritmo Genético se convierte en una herramienta útil para el diseño sin sustituir al diseñador. Es decir, sigue siendo necesario el uso de criterio al diseñar ya que el único criterio no es el costo. El diseñador debe evaluar según su criterio los resultados que se obtengan del algoritmo, ya que este no tiene en consideración factores como la existencia de tuberías madres que deben tener diámetros considerablemente mayores por seguridad, entre otros factores como los diámetros disponibles así como los materiales a utilizar en el diseño de una red de agua potable

Esta técnica es innovadora y efectiva. Una de las ventajas de la optimización con Algoritmo genético es que usa un modelo de simulación hidráulica (Epanet). La optimización con Algoritmo genético es muy flexible y está limitada solamente por lo que el modelo de simulación hidráulica sea capaz de hacer. Las técnicas tradicionales de optimización han sido usadas muy poco porque son difíciles de aplicar y requieren de mucha experiencia por parte del usuario. Además, las técnicas tradicionales de optimización tienen dificultades para trabajar con variables discretas.

La optimización con algoritmo genético utilizando los operadores de selección, cruza y mutación, basados en la analogía con la genética natural, es bastante efectiva encontrando soluciones óptimas. El proceso del algoritmo genético genera un rango de diferentes soluciones, todas ellas de bajo costo. La optimización con Algoritmo genético ofrece un camino práctico para ser utilizado por todas aquellas empresas que estén relacionadas con el abastecimiento de agua potable. Su implementación permite al diseñador centrarse en seleccionar la mejor opción eliminando el uso de las técnicas de prueba y error.

Los resultados presentados en este trabajo muestran que la técnica del algoritmo genético resultó efectiva en encontrar soluciones óptimas para determinados casos de estudio en relativamente pocas evaluaciones y, en consecuencia, en poco tiempo.

En futuros trabajos se pueden hacer grandes mejoras en la función del costo constructivo. Esta podría incluir por ejemplo el costo de accesorios cuando hay un cambio de diámetro de tubería y, en especial los costos por fugas. Esta adaptación requeriría trabajo considerable inclusive sobre el módulo de cálculo de redes, pero constituirá una mejora apreciable siendo los costos por fugas uno de los principales problemas de las redes de distribución hoy en día

Bibliografía

1. Carlos Santiago López Giraldo (2003). *Diseño de redes de distribución de agua potable de mínimo costo con algoritmos genéticos*.
2. Comisión nacional del agua (2007). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Redes de distribución*.
3. Comisión nacional del agua (2007). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Guía de diseño de redes de agua potable con uno o varios tanques y fuentes de abastecimiento*.
4. Comisión nacional del agua (2007). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Modelación hidráulica y de calidad del agua en redes de agua potable*.
5. Gabriela Ochoa (2011). *Introducción a la Computación Evolutiva y la Morfogénesis Artificial*.
6. Goldberg, D. E. (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison-Wesley.
7. Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor: University of Michigan Press.
8. Holland, J. H. (1986). *Escaping brittleness: the possibilities of general purpose algorithms applied to parallel rule-based systems*. En *Machine Learning, an Artificial Intelligence Approach*.
9. Martín Rubén Jiménez Magaña (2004). *Diseño óptimo de redes de distribución de agua potable utilizando un algoritmo genético*.

Anexo

Tabla A. Datos necesarios para el diseño

| Nudo | Elevación | Demanda | Tramo | Longitud |
|-------------|------------------|----------------|--------------|-----------------|
| 1 | 2257 | 0.155 | 2 | 92.94 |
| 2 | 2292 | 0.155 | 3 | 50.71 |
| 3 | 2325 | 0.155 | 4 | 35.94 |
| 4 | 2304 | 0.155 | 5 | 43.92 |
| 5 | 2288 | 0.155 | 6 | 33.03 |
| 6 | 2318 | 0.155 | 7 | 86.75 |
| 7 | 2341 | 0.155 | 8 | 28.94 |
| 8 | 2259 | 0.155 | 9 | 77.02 |
| 9 | 2265 | 0.155 | 10 | 77.17 |
| 10 | 2270 | 0.155 | 11 | 37.84 |
| 11 | 2274 | 0.155 | 12 | 49.85 |
| 12 | 2299 | 0.155 | 13 | 90.48 |
| 13 | 2311 | 0.155 | 14 | 64.57 |
| 14 | 2332 | 0.155 | 15 | 48.15 |
| 15 | 2363 | 0.155 | 16 | 78.72 |
| 16 | 2366 | 0.155 | 17 | 59.22 |
| 19 | 2298 | 0.155 | 18 | 65.87 |
| 20 | 2327 | 0.155 | 19 | 67.82 |
| 21 | 2341 | 0.155 | 20 | 39.62 |
| 22 | 2351 | 0.155 | 21 | 83.98 |
| 23 | 2299 | 0.155 | 22 | 87.25 |
| 24 | 2313 | 0.155 | 23 | 93.98 |
| 25 | 2323 | 0.155 | 24 | 156.86 |
| 26 | 2337 | 0.155 | 25 | 36.87 |
| 27 | 2253 | 0.155 | 27 | 45.73 |
| 28 | 2256 | 0.155 | 29 | 152.76 |
| 29 | 2260 | 0.155 | 30 | 40.79 |
| 30 | 2263 | 0.155 | 31 | 72.86 |
| 31 | 2266 | 0.155 | 35 | 99.56 |
| 32 | 2333 | 0.155 | 36 | 51.81 |
| 33 | 2258 | 0.155 | 39 | 128.07 |
| 35 | 2300 | 0.155 | 40 | 66.51 |
| 36 | 2308 | 0.155 | 43 | 54.73 |
| 37 | 2282 | 0.155 | 44 | 69.03 |
| 38 | 2298 | 0.155 | 46 | 80.95 |
| 39 | 2317 | 0.155 | 47 | 48.13 |

| | | | | |
|----|------|-------|----|--------|
| 40 | 2375 | 0.155 | 48 | 59.98 |
| 41 | 2358 | 0.155 | 49 | 27.47 |
| 42 | 2343 | 0.155 | 50 | 45.23 |
| 43 | 2343 | 0.155 | 51 | 81.92 |
| 44 | 2339 | 0.155 | 52 | 74.1 |
| 45 | 2340 | 0.155 | 54 | 80.59 |
| 46 | 2344 | 0.155 | 55 | 47.9 |
| 47 | 2334 | 0.155 | 57 | 107.71 |
| 48 | 2332 | 0.155 | 59 | 67.2 |
| 49 | 2308 | 0.155 | 60 | 30.37 |
| 50 | 2355 | 0.155 | 61 | 88.73 |
| 51 | 2336 | 0.155 | 62 | 66.37 |
| 52 | 2306 | 0.155 | 65 | 81.82 |
| 53 | 2356 | 0.155 | 68 | 72.1 |
| 54 | 2344 | 0.155 | 69 | 74.1 |
| 55 | 2328 | 0.155 | 70 | 99.48 |
| 56 | 2313 | 0.155 | 71 | 15.63 |
| 57 | 2322 | 0.155 | 72 | 26.23 |
| 58 | 2340 | 0.155 | 73 | 18.89 |
| 59 | 2322 | 0.155 | 74 | 139.14 |
| 60 | 2306 | 0.155 | 75 | 45.84 |
| 61 | 2295 | 0.155 | 76 | 32.82 |
| 62 | 2264 | 0.155 | 77 | 39.4 |
| 63 | 2277 | 0.155 | 79 | 71.35 |
| 64 | 2259 | 0.155 | 80 | 73.32 |
| 65 | 2310 | 0.155 | 81 | 94.62 |
| 66 | 2310 | 0.155 | 82 | 70.56 |
| 67 | 2299 | 0.155 | 83 | 144.01 |
| 68 | 2336 | 0.155 | 84 | 68.88 |
| 69 | 2336 | 0.155 | 85 | 98.57 |
| 70 | 2317 | 0.155 | 88 | 71.94 |
| 71 | 2301 | 0.155 | 89 | 71.59 |
| 72 | 2291 | 0.155 | 90 | 97.75 |
| 73 | 2252 | 0.155 | 91 | 21.57 |
| 74 | 2253 | 0.155 | 92 | 70.73 |
| 75 | 2313 | 0.155 | 93 | 29.89 |
| 76 | 2283 | 0.155 | 94 | 127.29 |
| 77 | 2296 | 0.155 | 95 | 106.87 |
| 78 | 2302 | 0.155 | 96 | 46.85 |
| 79 | 2299 | 0.155 | 97 | 554.97 |

| | | | | |
|-----|------|-------|-----|--------|
| 80 | 2310 | 0.155 | 98 | 107.37 |
| 81 | 2315 | 0.155 | 99 | 73.71 |
| 82 | 2315 | 0.155 | 102 | 27.98 |
| 84 | 2313 | 0.155 | 103 | 68 |
| 85 | 2299 | 0.155 | 104 | 74.31 |
| 86 | 2289 | 0.155 | 105 | 185.63 |
| 87 | 2252 | 0.155 | 106 | 117.01 |
| 88 | 2255 | 0.155 | 107 | 214.13 |
| 89 | 2256 | 0.155 | 108 | 61.59 |
| 90 | 2253 | 0.155 | 109 | 45.72 |
| 91 | 2254 | 0.155 | 110 | 67.13 |
| 92 | 2253 | 0.155 | 111 | 87.18 |
| 93 | 2255 | 0.155 | 112 | 92.74 |
| 94 | 2255 | 0.155 | 113 | 138.57 |
| 95 | 2254 | 0.155 | 114 | 203.68 |
| 96 | 2256 | 0.155 | 115 | 186.49 |
| 97 | 2260 | 0.155 | 116 | 151.02 |
| 98 | 2299 | 0.155 | 117 | 128.09 |
| 99 | 2305 | 0.155 | 118 | 113.98 |
| 100 | 2258 | 0.155 | 119 | 53.24 |
| 101 | 2289 | 0.155 | 120 | 68.61 |
| 102 | 2283 | 0.155 | 121 | 142.53 |
| 103 | 2282 | 0.155 | 122 | 34.66 |
| 104 | 2282 | 0.155 | 123 | 30.65 |
| 105 | 2278 | 0.155 | 124 | 135.13 |
| 106 | 2277 | 0.155 | 125 | 5.25 |
| 107 | 2274 | 0.155 | 126 | 5.5 |
| 108 | 2271 | 0.155 | 127 | 91.94 |
| 109 | 2269 | 0.155 | 128 | 41.23 |
| 110 | 2268 | 0.155 | 129 | 89.86 |
| 111 | 2262 | 0.155 | 130 | 117.69 |
| 112 | 2259 | 0.155 | 132 | 64.46 |
| 113 | 2257 | 0.155 | 133 | 35.76 |
| 114 | 2342 | 0.155 | 134 | 114.14 |
| 115 | 2279 | 0.155 | 135 | 70.43 |
| 116 | 2274 | 0.155 | 136 | 67.51 |
| 117 | 2273 | 0.155 | 137 | 72.42 |
| 118 | 2269 | 0.155 | 139 | 23.63 |
| 119 | 2268 | 0.155 | 141 | 82.43 |
| 120 | 2265 | 0.155 | 142 | 9.27 |

| | | | | |
|-----|------|-------|-----|--------|
| 121 | 2263 | 0.155 | 143 | 76.48 |
| 122 | 2261 | 0.155 | 144 | 71.48 |
| 123 | 2259 | 0.155 | 145 | 80.65 |
| 124 | 2256 | 0.155 | 147 | 270.24 |
| 125 | 2254 | 0.155 | 148 | 139.72 |
| 126 | 2255 | 0.155 | 149 | 166.43 |
| 127 | 2254 | 0.155 | 150 | 101.43 |
| 128 | 2254 | 0.155 | 151 | 137.24 |
| 129 | 2255 | 0.155 | 152 | 83.19 |
| 130 | 2255 | 0.155 | 153 | 82.22 |
| 131 | 2255 | 0.155 | 154 | 91.51 |
| 132 | 2255 | 0.155 | 155 | 89.69 |
| 133 | 2255 | 0.155 | 156 | 91.02 |
| 134 | 2255 | 0.155 | 157 | 77.31 |
| 135 | 2257 | 0.155 | 158 | 92.83 |
| 136 | 2256 | 0.155 | 159 | 91.24 |
| 137 | 2256 | 0.155 | 160 | 93.4 |
| 138 | 2257 | 0.155 | 161 | 75.08 |
| 139 | 2257 | 0.155 | 162 | 29.04 |
| 140 | 2258 | 0.155 | 163 | 82.82 |
| 141 | 2259 | 0.155 | 164 | 118.25 |
| 142 | 2262 | 0.155 | 165 | 46.69 |
| 143 | 2265 | 0.155 | 166 | 54.81 |
| 144 | 2265 | 0.155 | 168 | 88.45 |
| 145 | 2267 | 0.155 | 169 | 82.92 |
| 146 | 2268 | 0.155 | 170 | 58.05 |
| 147 | 2275 | 0.155 | 171 | 61.92 |
| 148 | 2268 | 0.155 | 172 | 82.92 |
| 149 | 2270 | 0.155 | 173 | 95.46 |
| 150 | 2278 | 0.155 | 174 | 175.53 |
| 151 | 2283 | 0.155 | 175 | 42.62 |
| 152 | 2267 | 0.155 | 176 | 50.59 |
| 153 | 2259 | 0.155 | 177 | 127.72 |
| 154 | 2257 | 0.155 | 178 | 54.84 |
| 155 | 2255 | 0.155 | 179 | 24.04 |
| 156 | 2255 | 0.155 | 180 | 12.69 |
| 157 | 2255 | 0.155 | 181 | 34.86 |
| 158 | 2255 | 0.155 | 182 | 120.48 |
| 159 | 2255 | 0.155 | 183 | 69.89 |
| 160 | 2255 | 0.155 | 184 | 268.97 |

| | | | | |
|-----|------|-------|-----|--------|
| 161 | 2255 | 0.155 | 185 | 144.01 |
| 162 | 2255 | 0.155 | 186 | 96.36 |
| 163 | 2255 | 0.155 | 187 | 40.1 |
| 164 | 2254 | 0.155 | 188 | 226.59 |
| 165 | 2254 | 0.155 | 190 | 84.71 |
| 166 | 2254 | 0.155 | 191 | 87 |
| 167 | 2254 | 0.155 | 192 | 27.92 |
| 168 | 2254 | 0.155 | 193 | 75.84 |
| 169 | 2254 | 0.155 | 194 | 110.46 |
| 170 | 2255 | 0.155 | 195 | 64.77 |
| 171 | 2255 | 0.155 | 197 | 73.67 |
| 172 | 2255 | 0.155 | 198 | 68.96 |
| 173 | 2254 | 0.155 | 199 | 53.51 |
| 174 | 2255 | 0.155 | 201 | 96.78 |
| 175 | 2258 | 0.155 | 202 | 91.05 |
| 176 | 2256 | 0.155 | 203 | 74.06 |
| 177 | 2256 | 0.155 | 204 | 91.93 |
| 178 | 2256 | 0.155 | 206 | 93.46 |
| 179 | 2255 | 0.155 | 207 | 68.14 |
| 180 | 2255 | 0.155 | 208 | 67.22 |
| 181 | 2255 | 0.155 | 209 | 59.08 |
| 182 | 2255 | 0.155 | 210 | 63.91 |
| 183 | 2255 | 0.155 | 211 | 62.74 |
| 184 | 2255 | 0.155 | 212 | 124.07 |
| 185 | 2258 | 0.155 | 213 | 51.49 |
| 186 | 2256 | 0.155 | 214 | 78.78 |
| 187 | 2258 | 0.155 | 217 | 70.1 |
| 188 | 2263 | 0.155 | 218 | 72.63 |
| 189 | 2259 | 0.155 | 219 | 105.85 |
| 190 | 2263 | 0.155 | 220 | 82.49 |
| 191 | 2265 | 0.155 | 221 | 93.8 |
| 192 | 2267 | 0.155 | 222 | 98.74 |
| 193 | 2254 | 0.155 | 223 | 70.17 |
| 194 | 2254 | 0.155 | 224 | 65.01 |
| 195 | 2254 | 0.155 | 225 | 93.46 |
| 196 | 2254 | 0.155 | 226 | 93.27 |
| 197 | 2254 | 0.155 | 227 | 92.87 |
| 198 | 2254 | 0.155 | 228 | 77.72 |
| 199 | 2254 | 0.155 | 229 | 128.82 |
| 200 | 2270 | 0.155 | 230 | 83.91 |

| | | | | |
|-----|------|-------|-----|--------|
| 201 | 2278 | 0.155 | 231 | 76.88 |
| 202 | 2271 | 0.155 | 232 | 449.44 |
| 203 | 2279 | 0.155 | 233 | 36.02 |
| 204 | 2272 | 0.155 | 236 | 95.76 |
| 205 | 2273 | 0.155 | 237 | 65.52 |
| 206 | 2267 | 0.155 | 238 | 50.31 |
| 207 | 2266 | 0.155 | 239 | 104.61 |
| 208 | 2256 | 0.155 | 240 | 141.24 |
| 209 | 2257 | 0.155 | 241 | 56.28 |
| 210 | 2261 | 0.155 | 242 | 79.88 |
| 211 | 2256 | 0.155 | 243 | 26.52 |
| 212 | 2255 | 0.155 | 244 | 73.11 |
| 213 | 2260 | 0.155 | 245 | 231.29 |
| 214 | 2278 | 0.155 | 300 | 11.74 |
| 215 | 2286 | 0.155 | 301 | 139.82 |
| 216 | 2290 | 0.155 | 302 | 14.78 |
| 217 | 2296 | 0.155 | 303 | 92.63 |
| 218 | 2300 | 0.155 | 304 | 44.06 |
| 219 | 2305 | 0.155 | 305 | 71.22 |
| 220 | 2303 | 0.155 | 306 | 30.71 |
| 221 | 2294 | 0.155 | 307 | 63.67 |
| 222 | 2286 | 0.155 | 308 | 75.45 |
| 223 | 2276 | 0.155 | 309 | 98.63 |
| 224 | 2286 | 0.155 | 310 | 108.59 |
| 225 | 2291 | 0.155 | 311 | 121.59 |
| 226 | 2295 | 0.155 | 312 | 144.49 |
| 227 | 2294 | 0.155 | 313 | 89.27 |
| 228 | 2288 | 0.155 | 314 | 92.63 |
| 229 | 2280 | 0.155 | 315 | 180.25 |
| 230 | 2258 | 0.155 | 316 | 70.7 |
| 231 | 2259 | 0.155 | 317 | 85.45 |
| 232 | 2271 | 0.155 | 318 | 26.41 |
| 233 | 2278 | 0.155 | 319 | 64.18 |
| 234 | 2282 | 0.155 | 320 | 6.61 |
| 235 | 2285 | 0.155 | 321 | 164.15 |
| 236 | 2284 | 0.155 | 322 | 185.52 |
| 237 | 2281 | 0.155 | 323 | 261.03 |
| 238 | 2275 | 0.155 | 324 | 92.24 |
| 239 | 2276 | 0.155 | 325 | 55.29 |
| 240 | 2254 | 0.155 | 326 | 58.55 |

| | | | | |
|-----|------|-------|-----|--------|
| 241 | 2255 | 0.155 | 327 | 29.41 |
| 242 | 2255 | 0.155 | 328 | 27.18 |
| 243 | 2255 | 0.155 | 329 | 183.31 |
| 244 | 2258 | 0.155 | 330 | 181.99 |
| 245 | 2258 | 0.155 | 331 | 125.96 |
| 246 | 2259 | 0.155 | 332 | 142.03 |
| 247 | 2267 | 0.155 | 333 | 28.59 |
| 248 | 2272 | 0.155 | 334 | 75.86 |
| 249 | 2274 | 0.155 | 335 | 13.92 |
| 250 | 2276 | 0.155 | 336 | 68.74 |
| 251 | 2274 | 0.155 | 337 | 150.38 |
| 252 | 2271 | 0.155 | 338 | 90.5 |
| 253 | 2268 | 0.155 | 339 | 11.38 |
| 254 | 2254 | 0.155 | 340 | 77.59 |
| 255 | 2255 | 0.155 | 341 | 32.29 |
| 256 | 2256 | 0.155 | 342 | 97.08 |
| 257 | 2260 | 0.155 | 343 | 93 |
| 258 | 2262 | 0.155 | 344 | 183.09 |
| 259 | 2266 | 0.155 | 345 | 42.81 |
| 260 | 2267 | 0.155 | 346 | 195.58 |
| 261 | 2267 | 0.155 | 347 | 95.7 |
| 262 | 2265 | 0.155 | 348 | 68.75 |
| 263 | 2263 | 0.155 | 349 | 214.24 |
| 264 | 2260 | 0.155 | 350 | 168.75 |
| 265 | 2252 | 0.155 | 351 | 22.87 |
| 266 | 2255 | 0.155 | 352 | 151.79 |
| 267 | 2254 | 0.155 | 353 | 84.46 |
| 268 | 2255 | 0.155 | 354 | 66.49 |
| 270 | 2258 | 0.155 | 355 | 103.77 |
| 271 | 2258 | 0.155 | 356 | 153.65 |
| 272 | 2258 | 0.155 | 357 | 33.92 |
| 273 | 2258 | 0.155 | 358 | 64.47 |
| 274 | 2258 | 0.155 | 359 | 60.97 |
| 275 | 2258 | 0.155 | 360 | 65.76 |
| 276 | 2258 | 0.155 | 361 | 171.82 |
| 277 | 2258 | 0.155 | 362 | 229.38 |
| 278 | 2258 | 0.155 | 363 | 310.44 |
| 279 | 2258 | 0.155 | 364 | 363.4 |
| 280 | 2257 | 0.155 | 365 | 78.91 |
| 281 | 2253 | 0.155 | 366 | 183 |

| | | | | |
|------------|------|-------|-----|--------|
| 282 | 2254 | 0.155 | 367 | 56.48 |
| 283 | 2255 | 0.155 | 368 | 185.36 |
| 285 | 2255 | 0.155 | 369 | 311.49 |
| 286 | 2255 | 0.155 | 370 | 88.31 |
| 287 | 2255 | 0.155 | 371 | 100.95 |
| 288 | 2256 | 0.155 | 372 | 147.27 |
| 289 | 2257 | 0.155 | 373 | 60.74 |
| 290 | 2257 | 0.155 | 374 | 36.85 |
| 291 | 2258 | 0.155 | 375 | 106.59 |
| 292 | 2257 | 0.155 | 376 | 29.01 |
| 293 | 2255 | 0.155 | 377 | 107.26 |
| 294 | 2255 | 0.155 | 378 | 82.6 |
| 295 | 2255 | 0.155 | 379 | 153.89 |
| 296 | 2255 | 0.155 | 380 | 70.4 |
| 297 | 2256 | 0.155 | 381 | 42.32 |
| 298 | 2324 | 0.155 | 382 | 35.87 |
| 299 | 2305 | 0.155 | 383 | 55.53 |
| 300 | 2255 | 0.155 | 384 | 336.33 |
| 301 | 2277 | 0.155 | 385 | 57.07 |
| 302 | 2263 | 0.155 | 386 | 12.48 |
| 303 | 2272 | 0.155 | 387 | 211.51 |
| 304 | 2345 | 0.155 | 388 | 57.48 |
| 305 | 2348 | 0.155 | 389 | 371.39 |
| 306 | 2350 | 0.155 | 390 | 372.75 |
| 307 | 2347 | 0.155 | 391 | 367.92 |
| 308 | 2370 | 0.155 | 392 | 369.99 |
| 309 | 2381 | 0.155 | 393 | 215.98 |
| 310 | 2391 | 0.155 | 394 | 50.81 |
| 311 | 2328 | 0.155 | 395 | 157.36 |
| 312 | 2384 | 0.155 | 396 | 99.71 |
| 313 | 2349 | 0.155 | 397 | 151.78 |
| 314 | 2325 | 0.155 | 398 | 136.14 |
| 315 | 2338 | 0.155 | 399 | 203.54 |
| 316 | 2311 | 0.155 | 400 | 45.08 |
| 317 | 2314 | 0.155 | 401 | 235.3 |
| 318 | 2314 | 0.155 | 402 | 187.67 |
| 319 | 2283 | 0.155 | 403 | 327.61 |
| 320 | 2267 | 0.155 | 404 | 44.17 |
| 321 | 2268 | 0.155 | 405 | 32.55 |
| 322 | 2263 | 0.155 | 406 | 178.78 |

| | | | | |
|------------------|-------|-------|-----|--------|
| 323 | 2306 | 0.155 | 407 | 32.45 |
| 325 | 2312 | 0.155 | 408 | 46.63 |
| 326 | 2258 | 0.155 | 409 | 178.51 |
| 327 | 2276 | 0.155 | 410 | 180.6 |
| 269 | 2261 | 0.155 | 411 | 94.84 |
| 284 | 2300 | 0.155 | 412 | 118.45 |
| 328 | 2305 | 0.155 | 413 | 285.73 |
| 329 | 2296 | 0.155 | 414 | 97.9 |
| 330 | 2286 | 0.155 | 415 | 99.34 |
| 331 | 2295 | 0.155 | 416 | 421.9 |
| 332 | 2295 | 0.155 | 234 | 94.13 |
| 333 | 2294 | 0.155 | 235 | 93.69 |
| 334 | 2288 | 0.155 | 246 | 105.45 |
| 335 | 2271 | 0.155 | 247 | 104.94 |
| 336 | 2260 | 0.155 | 248 | 101.15 |
| 337 | 2259 | 0.155 | 249 | 98.27 |
| 338 | 2259 | 0.155 | 250 | 94.61 |
| 339 | 2265 | 0.155 | 251 | 95.52 |
| 340 | 2262 | 0.155 | 252 | 98.2 |
| 341 | 2294 | 0.155 | 253 | 95.91 |
| 342 | 2288 | 0.155 | 255 | 117.2 |
| 343 | 2280 | 0.155 | 256 | 119.19 |
| 344 | 2271 | 0.155 | 257 | 53.47 |
| 345 | 2263 | 0.155 | 258 | 42.83 |
| Deposito | Carga | | 259 | 35.42 |
| 18 | 2405 | | 260 | 30.64 |
| 17 | 2373 | | 1 | 93.16 |
| 83 | 2331 | | 56 | 47.42 |
| 500 | 2317 | | 167 | 53.95 |
| 34 | 2304 | | 263 | 25.34 |
| Rugosidad | | | 264 | 50.48 |
| 0.0015 | | | 265 | 57.47 |
| | | | 266 | 59.15 |
| | | | 267 | 47.17 |
| | | | 268 | 59.63 |
| | | | 269 | 44.35 |
| | | | 270 | 84.48 |
| | | | 271 | 24.41 |
| | | | 272 | 56.48 |
| | | | 273 | 32.15 |

| | | | | |
|--|--|--|-----|--------|
| | | | 274 | 58.92 |
| | | | 275 | 52.55 |
| | | | 34 | 48.47 |
| | | | 37 | 14.04 |
| | | | 38 | 81.62 |
| | | | 41 | 135.3 |
| | | | 32 | 64.44 |
| | | | 33 | 219.04 |
| | | | 45 | 93.04 |
| | | | 28 | 58.21 |
| | | | 53 | 75.82 |
| | | | 58 | 105.09 |
| | | | 63 | 63.76 |
| | | | 64 | 40.68 |
| | | | 86 | 87.01 |
| | | | 140 | 61.83 |
| | | | 146 | 69.26 |
| | | | 101 | 39.51 |
| | | | 131 | 99.22 |
| | | | 138 | 65.5 |
| | | | 189 | 40.34 |
| | | | 196 | 75.82 |
| | | | 254 | 93.15 |
| | | | 276 | 72.28 |
| | | | 277 | 73.82 |
| | | | 278 | 74.73 |
| | | | 279 | 46.42 |
| | | | 280 | 207 |
| | | | 281 | 210 |
| | | | 282 | 53 |
| | | | 283 | 47.1 |
| | | | 284 | 42.43 |
| | | | 285 | 71 |
| | | | 286 | 68.68 |
| | | | 287 | 72.75 |
| | | | 288 | 71.28 |
| | | | 289 | 64.67 |

Tabla B. Resultados del diseño de la red Cocotitlán

| Nudo | Presión (m) | Tramo | Diámetro (mm) | Caudal (lps) | Velocidad (m/s) | Pérd. Unit. (m/Km) |
|-------------|--------------------|--------------|----------------------|---------------------|------------------------|---------------------------|
| 1 | 5.05 | 2 | 12.7 | -0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 2 | 0.68 | 3 | 12.7 | 0.09 | 0.7 | 62.95 |
| 3 | 8.57 | 4 | 12.7 | -0.16 | 1.22 | 167.81 |
| 4 | 3.52 | 5 | 25.4 | -0.53 | 1.05 | 53.8 |
| 5 | 3.5 | 6 | 12.7 | -0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 6 | 27.97 | 7 | 25.4 | -0.93 | 1.84 | 144.76 |
| 7 | 8.17 | 8 | 63.5 | -2.79 | 0.88 | 12.73 |
| 8 | 32.51 | 9 | 19.05 | 0.22 | 0.78 | 45.7 |
| 9 | 23.99 | 10 | 25 | 0.4 | 0.81 | 34.87 |
| 10 | 10.5 | 11 | 12.7 | -0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 11 | 9.47 | 12 | 38.1 | -1.6 | 1.4 | 54.47 |
| 12 | 8.66 | 13 | 38.1 | -2.02 | 1.77 | 82.96 |
| 13 | 38.49 | 14 | 12.7 | -0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 14 | 19.86 | 15 | 12.7 | -0.11 | 0.84 | 87.16 |
| 15 | 23.44 | 16 | 19.05 | -0.3 | 1.06 | 78.2 |
| 16 | 33 | 17 | 38.1 | 1.09 | 0.95 | 27.37 |
| 19 | 13.76 | 18 | 19.05 | -0.2 | 0.71 | 39.35 |
| 20 | 26.48 | 19 | 25.4 | -0.27 | 0.53 | 16.38 |
| 21 | 15.19 | 20 | 12.7 | -0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 22 | 12.7 | 21 | 19.05 | 0.31 | 1.09 | 82.01 |
| 23 | 19.24 | 22 | 19.05 | -0.16 | 0.54 | 24.51 |
| 24 | 37.88 | 23 | 38.1 | -1.24 | 1.09 | 34.67 |
| 25 | 32.08 | 24 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 26 | 24.24 | 25 | 19.05 | 0.46 | 1.63 | 167.57 |
| 27 | 17.81 | 27 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 28 | 36.43 | 29 | 25.4 | 0.66 | 1.31 | 79.27 |
| 29 | 30 | 30 | 12.7 | -0.2 | 1.56 | 256.43 |
| 30 | 36.2 | 31 | 12.7 | -0.04 | 0.34 | 18.1 |
| 31 | 36.34 | 35 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 32 | 14.84 | 36 | 19.05 | -0.31 | 1.09 | 82.01 |
| 33 | 41.31 | 39 | 12.7 | -0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 35 | 12.57 | 40 | 19.05 | -0.31 | 1.09 | 82.01 |
| 36 | 9.26 | 43 | 19.05 | -0.46 | 1.63 | 167.57 |
| 37 | 41.22 | 44 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 38 | 21.97 | 46 | 25.4 | -0.78 | 1.53 | 104.69 |
| 39 | 31.19 | 47 | 38.1 | -1.09 | 0.95 | 27.37 |
| 40 | 21.43 | 48 | 38.1 | -1.39 | 1.22 | 42.74 |

| | | | | | | |
|----|-------|----|-------|-------|------|--------|
| 41 | 37.12 | 49 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 42 | 20.1 | 50 | 63.5 | 2.48 | 0.78 | 10.36 |
| 43 | 19.63 | 51 | 38.1 | 1.75 | 1.54 | 64.02 |
| 44 | 20.71 | 52 | 38.1 | 1.09 | 0.95 | 27.37 |
| 45 | 10.52 | 54 | 12.7 | 0.11 | 0.91 | 99.6 |
| 46 | 5.25 | 55 | 19.05 | 0.31 | 1.11 | 84.33 |
| 47 | 41.06 | 57 | 12.7 | 0.16 | 1.26 | 177.33 |
| 48 | 6.85 | 59 | 19.05 | -0.24 | 0.83 | 51.13 |
| 49 | 14.15 | 60 | 19.05 | 0.31 | 1.07 | 79.72 |
| 50 | 17.02 | 61 | 12.7 | 0.15 | 1.18 | 158.53 |
| 51 | 7.1 | 62 | 12.7 | 0.03 | 0.27 | 10.47 |
| 52 | 6.36 | 65 | 50.8 | 1.17 | 0.58 | 7.88 |
| 53 | 21.47 | 68 | 12.7 | 0.06 | 0.44 | 29.05 |
| 54 | 42.64 | 69 | 50.8 | 1.05 | 0.52 | 6.52 |
| 55 | 29.39 | 70 | 12.7 | 0.05 | 0.41 | 25.07 |
| 56 | 42.36 | 71 | 25.4 | 0.91 | 1.79 | 138.92 |
| 57 | 29.68 | 72 | 19.05 | 0.46 | 1.63 | 167.57 |
| 58 | 6.76 | 73 | 19.05 | 0.31 | 1.09 | 82.01 |
| 59 | 25.64 | 74 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 60 | 11.34 | 75 | 50.8 | 2.79 | 1.38 | 37.08 |
| 61 | 25.78 | 76 | 152.4 | 17.67 | 0.97 | 5.22 |
| 62 | 25.32 | 77 | 101.6 | 17.51 | 2.16 | 36.18 |
| 63 | 12.48 | 79 | 101.6 | 8.05 | 0.99 | 8.9 |
| 64 | 27.41 | 80 | 101.6 | 7.79 | 0.96 | 8.4 |
| 65 | 20.34 | 81 | 50.8 | 2.86 | 1.41 | 38.71 |
| 66 | 6.81 | 82 | 25.4 | 1.09 | 2.15 | 191.49 |
| 67 | 44.46 | 83 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 68 | 9.03 | 84 | 101.6 | 15.03 | 1.85 | 27.44 |
| 69 | 6.61 | 85 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 70 | 11.54 | 88 | 12.7 | 0.07 | 0.56 | 43.86 |
| 71 | 22.04 | 89 | 50.8 | -1.23 | 0.61 | 8.66 |
| 72 | 31.34 | 90 | 12.7 | 0.08 | 0.6 | 48.21 |
| 73 | 17.2 | 91 | 38.1 | -1.09 | 0.96 | 27.67 |
| 74 | 11.65 | 92 | 12.7 | 0.22 | 1.72 | 304.81 |
| 75 | 34.13 | 93 | 12.7 | -0.25 | 1.95 | 380.73 |
| 76 | 41.92 | 94 | 38.1 | 0.53 | 0.47 | 7.78 |
| 77 | 30.37 | 95 | 19.05 | 0.25 | 0.89 | 58.08 |
| 78 | 25.02 | 96 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 79 | 41.05 | 97 | 19.05 | 0.16 | 0.54 | 24.51 |
| 80 | 17.87 | 98 | 12.7 | 0.12 | 0.92 | 102.42 |

| | | | | | | |
|------------|-------|-----|-------|-------|------|--------|
| 81 | 2.83 | 99 | 12.7 | 0.18 | 1.43 | 221.42 |
| 82 | 14.11 | 102 | 38.1 | -1.18 | 1.03 | 31.57 |
| 84 | 14.79 | 103 | 38.1 | -0.67 | 0.58 | 11.59 |
| 85 | 24.85 | 104 | 38.1 | -0.88 | 0.78 | 19.06 |
| 86 | 34.24 | 105 | 19.05 | -0.16 | 0.54 | 24.51 |
| 87 | 26.8 | 106 | 19.05 | -0.31 | 1.09 | 82.01 |
| 88 | 27.15 | 107 | 38.1 | -0.46 | 0.41 | 6.18 |
| 89 | 28.1 | 108 | 25.4 | -0.78 | 1.53 | 104.69 |
| 90 | 11.56 | 109 | 38.1 | -1.09 | 0.95 | 27.37 |
| 91 | 26.12 | 110 | 38.1 | -1.39 | 1.22 | 42.74 |
| 92 | 10.32 | 111 | 50.8 | -1.86 | 0.92 | 18 |
| 93 | 31.57 | 112 | 12.7 | -0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 94 | 32.82 | 113 | 12.7 | -0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 95 | 12.52 | 114 | 19.05 | -0.16 | 0.54 | 24.51 |
| 96 | 34.69 | 115 | 19.05 | -0.31 | 1.09 | 82.01 |
| 97 | 13.57 | 116 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 98 | 15.02 | 117 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 99 | 16.69 | 118 | 12.7 | -0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 100 | 11.84 | 119 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 101 | 13.38 | 120 | 38.1 | -1.09 | 0.95 | 27.36 |
| 102 | 20.2 | 121 | 50.8 | -1.55 | 0.76 | 13.03 |
| 103 | 28.96 | 122 | 19.05 | -0.16 | 0.54 | 24.51 |
| 104 | 29.27 | 123 | 19.05 | -0.31 | 1.09 | 82.01 |
| 105 | 42.2 | 124 | 19.05 | -0.46 | 1.63 | 167.57 |
| 106 | 44 | 125 | 38.1 | -2.09 | 1.83 | 87.82 |
| 107 | 22.62 | 126 | 12.7 | 0.03 | 0.25 | 8.77 |
| 108 | 30.88 | 127 | 50.8 | -2.28 | 1.12 | 25.77 |
| 109 | 22.06 | 128 | 50.8 | -1.47 | 0.72 | 11.84 |
| 110 | 22.67 | 129 | 12.7 | -0.12 | 0.97 | 112.27 |
| 111 | 24.41 | 130 | 63.5 | -4.94 | 1.56 | 35.39 |
| 112 | 34.38 | 132 | 50.8 | -3.98 | 1.96 | 70.13 |
| 113 | 26.79 | 133 | 63.5 | -4.14 | 1.31 | 25.72 |
| 114 | 13.82 | 134 | 12.7 | 0.07 | 0.58 | 45.55 |
| 115 | 26.56 | 135 | 12.7 | -0.15 | 1.21 | 164.03 |
| 116 | 42.13 | 136 | 12.7 | -0.03 | 0.24 | 8.48 |
| 117 | 44.45 | 137 | 12.7 | 0.15 | 1.19 | 160.12 |
| 118 | 49.67 | 139 | 12.7 | 0.18 | 1.44 | 222.31 |
| 119 | 41.12 | 141 | 12.7 | -0.03 | 0.22 | 5.81 |
| 120 | 25.23 | 142 | 19.05 | -0.22 | 0.76 | 43.96 |
| 121 | 37.75 | 143 | 12.7 | -0.15 | 1.19 | 158.75 |

| | | | | | | |
|------------|-------|-----|-------|-------|------|--------|
| 122 | 13.02 | 144 | 38.1 | 1.46 | 1.28 | 46.61 |
| 123 | 9.18 | 145 | 38.1 | 1.01 | 0.89 | 24.21 |
| 124 | 16.56 | 147 | 12.7 | -0.06 | 0.44 | 28.43 |
| 125 | 11.77 | 148 | 12.7 | -0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 126 | 33.1 | 149 | 12.7 | -0.03 | 0.27 | 11.74 |
| 127 | 16.07 | 150 | 19.05 | -0.16 | 0.54 | 24.51 |
| 128 | 18.17 | 151 | 19.05 | -0.31 | 1.09 | 82.01 |
| 129 | 25.4 | 152 | 19.05 | 0.29 | 1.01 | 72.4 |
| 130 | 16.26 | 153 | 19.05 | 0.23 | 0.82 | 50.51 |
| 131 | 11.83 | 154 | 63.5 | 4.63 | 1.46 | 31.45 |
| 132 | 14.69 | 155 | 50.8 | 3.17 | 1.56 | 46.5 |
| 133 | 13.53 | 156 | 63.5 | 4.01 | 1.27 | 24.3 |
| 134 | 10.23 | 157 | 63.5 | 3.7 | 1.17 | 21.11 |
| 135 | 32.48 | 158 | 12.7 | 0.07 | 0.57 | 44.32 |
| 136 | 20.17 | 159 | 38.1 | 1.22 | 1.07 | 33.62 |
| 137 | 23.41 | 160 | 12.7 | 0.07 | 0.57 | 45.1 |
| 138 | 39.32 | 161 | 12.7 | 0.05 | 0.37 | 20.4 |
| 139 | 39.76 | 162 | 25.4 | -0.55 | 1.08 | 56.41 |
| 140 | 39.37 | 163 | 25.4 | -0.86 | 1.7 | 125.71 |
| 141 | 39.33 | 164 | 38.1 | -1.51 | 1.33 | 49.42 |
| 142 | 37.6 | 165 | 25.4 | -0.58 | 1.14 | 62.65 |
| 143 | 33.6 | 166 | 19.05 | 0.36 | 1.25 | 104.13 |
| 144 | 27.13 | 168 | 12.7 | -0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 145 | 49.66 | 169 | 50 | -0.46 | 0.24 | 1.7 |
| 146 | 47.92 | 170 | 25.4 | -0.62 | 1.22 | 70.51 |
| 147 | 37.87 | 171 | 25.4 | -0.78 | 1.53 | 104.69 |
| 148 | 43.55 | 172 | 38.1 | -0.93 | 0.82 | 20.84 |
| 149 | 42.45 | 173 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 150 | 29.99 | 174 | 12.7 | -0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 151 | 21.36 | 175 | 19.05 | 0.26 | 0.9 | 59.15 |
| 152 | 12.92 | 176 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 153 | 18.98 | 177 | 25.4 | -0.57 | 1.12 | 60.27 |
| 154 | 17.67 | 178 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 155 | 15.13 | 179 | 25.4 | -0.88 | 1.73 | 130.48 |
| 156 | 40.62 | 180 | 12.7 | -0.05 | 0.42 | 26.14 |
| 157 | 25.72 | 181 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 158 | 24.12 | 182 | 19.05 | -0.36 | 1.27 | 108.1 |
| 159 | 20.42 | 183 | 25.4 | -1.39 | 2.75 | 298.78 |
| 160 | 14.65 | 184 | 19.05 | -0.16 | 0.54 | 24.51 |
| 161 | 39.31 | 185 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |

| | | | | | | |
|-----|-------|-----|-------|--------|------|--------|
| 162 | 21.31 | 186 | 63.5 | -3.06 | 0.97 | 14.99 |
| 163 | 38.51 | 187 | 63.5 | -3.21 | 1.01 | 16.37 |
| 164 | 38.46 | 188 | 12.7 | 0.11 | 0.89 | 96.15 |
| 165 | 20.58 | 190 | 12.7 | 0.15 | 1.2 | 162.61 |
| 166 | 19.62 | 191 | 19.05 | 0.16 | 0.54 | 24.51 |
| 167 | 37.86 | 192 | 19.05 | -0.31 | 1.08 | 80.73 |
| 168 | 36.94 | 193 | 19.05 | -0.46 | 1.62 | 165.8 |
| 169 | 36.56 | 194 | 12.7 | -0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 170 | 37.61 | 195 | 76.2 | -7.25 | 1.59 | 29.34 |
| 171 | 13.71 | 197 | 12.7 | 0.04 | 0.3 | 14.38 |
| 172 | 17.39 | 198 | 63.5 | 4.7 | 1.48 | 32.36 |
| 173 | 37.42 | 199 | 19.05 | 0.34 | 1.18 | 94.98 |
| 174 | 19.32 | 201 | 152.4 | 9.92 | 0.54 | 1.85 |
| 175 | 13.47 | 202 | 152.4 | 9.77 | 0.54 | 1.8 |
| 176 | 18.61 | 203 | 152.4 | 9.61 | 0.53 | 1.75 |
| 177 | 14.84 | 204 | 152.4 | -17.83 | 0.98 | 5.3 |
| 178 | 16.3 | 206 | 25.4 | 0.7 | 1.38 | 87.75 |
| 179 | 16.98 | 207 | 19.05 | 0.48 | 1.68 | 176.6 |
| 180 | 15.45 | 208 | 25.4 | -0.62 | 1.22 | 70.51 |
| 181 | 14.7 | 209 | 25.4 | -0.78 | 1.53 | 104.69 |
| 182 | 12.76 | 210 | 38.1 | -0.93 | 0.82 | 20.84 |
| 183 | 17.22 | 211 | 19.05 | -0.16 | 0.54 | 24.51 |
| 184 | 18.98 | 212 | 12.7 | -0.07 | 0.58 | 45.93 |
| 185 | 18.59 | 213 | 25.4 | -0.26 | 0.52 | 15.66 |
| 186 | 35.87 | 214 | 12.7 | 0.09 | 0.69 | 62.15 |
| 187 | 29.27 | 217 | 12.7 | 0.08 | 0.65 | 55.37 |
| 188 | 20.25 | 218 | 12.7 | -0.05 | 0.37 | 20.89 |
| 189 | 32.28 | 219 | 12.7 | 0.1 | 0.8 | 80.08 |
| 190 | 27.49 | 220 | 76.2 | -4.03 | 0.88 | 10.24 |
| 191 | 19.47 | 221 | 76.2 | -4.65 | 1.02 | 13.23 |
| 192 | 22.73 | 222 | 101.6 | 10.07 | 1.24 | 13.32 |
| 193 | 24.49 | 223 | 63.5 | 5.22 | 1.65 | 39.03 |
| 194 | 9.67 | 224 | 12.7 | 0.05 | 0.4 | 23.55 |
| 195 | 33.55 | 225 | 50.8 | 1.8 | 0.89 | 17.05 |
| 196 | 24.53 | 226 | 38.1 | 1.42 | 1.25 | 44.27 |
| 197 | 22.61 | 227 | 38.1 | 1.06 | 0.93 | 26.11 |
| 198 | 31.68 | 228 | 25.4 | 0.66 | 1.31 | 79.78 |
| 199 | 30.01 | 229 | 12.7 | -0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 200 | 18.93 | 230 | 19.05 | -0.31 | 1.09 | 82.01 |
| 201 | 8.48 | 231 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |

| | | | | | | |
|------------|-------|-----|-------|-------|------|--------|
| 202 | 17.57 | 232 | 25.4 | -0.62 | 1.22 | 70.51 |
| 203 | 4.05 | 233 | 101.6 | 10.07 | 1.24 | 13.32 |
| 204 | 10.9 | 236 | 76.2 | 8.75 | 1.92 | 41.24 |
| 205 | 6.05 | 237 | 101.6 | 8.25 | 1.02 | 9.29 |
| 206 | 12.57 | 238 | 50.8 | 1.84 | 0.91 | 17.73 |
| 207 | 18.85 | 239 | 50.8 | 1.68 | 0.83 | 14.99 |
| 208 | 24.82 | 240 | 38.1 | 0.93 | 0.82 | 20.84 |
| 209 | 21.38 | 241 | 38.1 | 0.62 | 0.54 | 10.21 |
| 210 | 7.04 | 242 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 211 | 13.27 | 243 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 212 | 16.68 | 244 | 38.1 | 0.46 | 0.41 | 6.18 |
| 213 | 15.71 | 245 | 19.05 | -0.16 | 0.54 | 24.51 |
| 214 | 25.14 | 300 | 12.7 | -0.09 | 0.73 | 69.2 |
| 215 | 18.45 | 301 | 19.05 | -0.25 | 0.87 | 55.51 |
| 216 | 24.91 | 302 | 12.7 | -0.05 | 0.37 | 21.25 |
| 217 | 18 | 303 | 12.7 | -0.11 | 0.89 | 96.39 |
| 218 | 14.17 | 304 | 76.2 | -5.55 | 1.22 | 18.15 |
| 219 | 9.65 | 305 | 12.7 | 0.23 | 1.84 | 342.35 |
| 220 | 24.15 | 306 | 38.1 | 0.71 | 0.62 | 12.99 |
| 221 | 24.95 | 307 | 12.7 | 0.09 | 0.72 | 66.86 |
| 222 | 20.92 | 308 | 12.7 | -0.11 | 0.87 | 92.42 |
| 223 | 15.73 | 309 | 12.7 | 0.11 | 0.89 | 97.21 |
| 224 | 24.67 | 310 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 225 | 21.57 | 311 | 50.8 | 2.02 | 0.99 | 20.75 |
| 226 | 8.52 | 312 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 227 | 9.34 | 313 | 50.8 | 1.71 | 0.84 | 15.42 |
| 228 | 15.18 | 314 | 12.7 | -0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 229 | 23.05 | 315 | 38.1 | 1.39 | 1.22 | 42.74 |
| 230 | 34.26 | 316 | 12.7 | -0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 231 | 34.9 | 317 | 19.05 | -0.16 | 0.54 | 24.51 |
| 232 | 33.31 | 318 | 12.7 | -0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 233 | 32.15 | 319 | 19.05 | -0.16 | 0.54 | 24.52 |
| 234 | 26.62 | 320 | 25.4 | -1.09 | 2.14 | 190.57 |
| 235 | 22.03 | 321 | 25.4 | 0.46 | 0.92 | 42.47 |
| 236 | 18.9 | 322 | 25.4 | 0.46 | 0.92 | 42.46 |
| 237 | 19.47 | 323 | 19.05 | -0.16 | 0.54 | 24.51 |
| 238 | 19.27 | 324 | 12.7 | -0.06 | 0.49 | 34.39 |
| 239 | 17.39 | 325 | 76.2 | 3.41 | 0.75 | 7.61 |
| 240 | 20.59 | 326 | 63.5 | 3.1 | 0.98 | 15.36 |
| 241 | 11.74 | 327 | 12.7 | -0.12 | 0.97 | 112.21 |

| | | | | | | |
|-----|-------|-----|-------|-------|------|--------|
| 242 | 12.59 | 328 | 19.05 | -0.43 | 1.52 | 147.74 |
| 243 | 15.1 | 329 | 19.05 | 0.16 | 0.54 | 24.51 |
| 244 | 34.75 | 330 | 19.05 | -0.16 | 0.54 | 24.51 |
| 245 | 35.21 | 331 | 63.5 | 4 | 1.26 | 24.2 |
| 246 | 34.16 | 332 | 12.7 | -0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 247 | 36.25 | 333 | 63.5 | 4.15 | 1.31 | 25.91 |
| 248 | 35.41 | 334 | 12.7 | -0.09 | 0.7 | 64 |
| 249 | 33.99 | 335 | 19.05 | -0.34 | 1.19 | 95.39 |
| 250 | 27.87 | 336 | 76.2 | 4.31 | 0.94 | 11.54 |
| 251 | 26.81 | 337 | 12.7 | 0.09 | 0.74 | 70.29 |
| 252 | 25.59 | 338 | 76.2 | 5.33 | 1.17 | 16.87 |
| 253 | 27.06 | 339 | 12.7 | -0.31 | 2.45 | 568.44 |
| 254 | 37.84 | 340 | 12.7 | 0.19 | 1.51 | 243.45 |
| 255 | 38.72 | 341 | 12.7 | 0.21 | 1.69 | 295.8 |
| 256 | 39.58 | 342 | 19.05 | 0.27 | 0.96 | 65.76 |
| 257 | 40.1 | 343 | 12.7 | 0.13 | 1.05 | 127.71 |
| 258 | 39.02 | 344 | 19.05 | 0.16 | 0.54 | 24.51 |
| 259 | 29.82 | 345 | 76.2 | -6.24 | 1.37 | 22.43 |
| 260 | 40.37 | 346 | 152.4 | -8.37 | 0.46 | 1.37 |
| 261 | 37.49 | 347 | 101.6 | -8.84 | 1.09 | 10.52 |
| 262 | 35.32 | 348 | 12.7 | -0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 263 | 35.11 | 349 | 38.1 | 2.79 | 2.45 | 147.63 |
| 264 | 36.48 | 350 | 63.5 | 2.63 | 0.83 | 11.5 |
| 265 | 23 | 351 | 38.1 | -1.71 | 1.5 | 61.1 |
| 266 | 35.29 | 352 | 50.8 | 1.55 | 0.76 | 13.03 |
| 267 | 36.73 | 353 | 38.1 | 0.52 | 0.45 | 7.4 |
| 268 | 29.79 | 354 | 12.7 | -0.09 | 0.72 | 67.1 |
| 270 | 37.94 | 355 | 25.4 | -0.27 | 0.54 | 16.99 |
| 271 | 32.68 | 356 | 19.05 | 0.16 | 0.54 | 24.51 |
| 272 | 33.16 | 357 | 19.05 | -0.16 | 0.54 | 24.51 |
| 273 | 33.57 | 358 | 38.1 | 0.41 | 0.36 | 5.05 |
| 274 | 45.71 | 359 | 25.4 | 0.35 | 0.68 | 25.11 |
| 275 | 42.38 | 360 | 25.4 | 0.22 | 0.43 | 11.38 |
| 276 | 41.78 | 361 | 38.1 | -0.72 | 0.63 | 13.41 |
| 277 | 39.83 | 362 | 19.05 | -0.09 | 0.3 | 8.74 |
| 278 | 37.66 | 363 | 12.7 | -0.03 | 0.22 | 5.71 |
| 279 | 31.63 | 364 | 19.05 | 0.06 | 0.22 | 5.34 |
| 280 | 28.48 | 365 | 19.05 | -0.16 | 0.54 | 24.51 |
| 281 | 17 | 366 | 19.05 | 0.16 | 0.54 | 24.51 |
| 282 | 10.95 | 367 | 38.1 | 0.46 | 0.41 | 6.18 |

| | | | | | | |
|------------|-------|-----|-------|-------|------|--------|
| 283 | 14.23 | 368 | 19.05 | 0.16 | 0.54 | 24.51 |
| 285 | 20.14 | 369 | 50.8 | 1.51 | 0.74 | 12.42 |
| 286 | 28 | 370 | 12.7 | -0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 287 | 34.21 | 371 | 12.7 | -0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 288 | 34.2 | 372 | 19.05 | 0.31 | 1.09 | 82.01 |
| 289 | 21.82 | 373 | 38.1 | 0.78 | 0.68 | 15.11 |
| 290 | 10.56 | 374 | 38.1 | 0.62 | 0.54 | 10.21 |
| 291 | 33.26 | 375 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 292 | 32.71 | 376 | 38.1 | 0.93 | 0.82 | 20.83 |
| 293 | 10.76 | 377 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 294 | 11.03 | 378 | 76.2 | 3.92 | 0.86 | 9.73 |
| 295 | 10.08 | 379 | 63.5 | 2.52 | 0.8 | 10.63 |
| 296 | 11.36 | 380 | 63.5 | 2.21 | 0.7 | 8.42 |
| 297 | 15.88 | 381 | 50.8 | 1.9 | 0.94 | 18.71 |
| 298 | 30.03 | 382 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 299 | 12.83 | 383 | 50.8 | 1.59 | 0.79 | 13.64 |
| 300 | 24.14 | 384 | 12.7 | 0.04 | 0.32 | 17 |
| 301 | 31.86 | 385 | 38.1 | 1.2 | 1.05 | 32.67 |
| 302 | 29.88 | 386 | 25.4 | 0.89 | 1.75 | 133.61 |
| 303 | 16.04 | 387 | 38.1 | 0.78 | 0.68 | 15.11 |
| 304 | 35.9 | 388 | 25.4 | 0.46 | 0.92 | 42.46 |
| 305 | 31.79 | 389 | 19.05 | 0.16 | 0.54 | 24.51 |
| 306 | 18.42 | 390 | 19.05 | 0.16 | 0.54 | 24.51 |
| 307 | 25.67 | 391 | 19.05 | 0.16 | 0.54 | 24.51 |
| 308 | 6.81 | 392 | 19.05 | 0.16 | 0.54 | 24.51 |
| 309 | 13.71 | 393 | 63.5 | 1.39 | 0.44 | 3.73 |
| 310 | 13.63 | 394 | 50.8 | 1.09 | 0.54 | 6.94 |
| 311 | 7.55 | 395 | 19.05 | 0.16 | 0.54 | 24.51 |
| 312 | 7.04 | 396 | 19.05 | 0.16 | 0.54 | 24.51 |
| 313 | 41.51 | 397 | 19.05 | 0.16 | 0.54 | 24.51 |
| 314 | 15.31 | 398 | 19.05 | 0.16 | 0.54 | 24.51 |
| 315 | 11.12 | 399 | 19.05 | 0.16 | 0.54 | 24.51 |
| 316 | 4.8 | 400 | 19.05 | 0.31 | 1.09 | 82.01 |
| 317 | 15.7 | 401 | 19.05 | 0.16 | 0.54 | 24.51 |
| 318 | 2.72 | 402 | 19.05 | 0.16 | 0.54 | 24.51 |
| 319 | 19.04 | 403 | 19.05 | -0.16 | 0.54 | 24.51 |
| 320 | 13.59 | 404 | 19.05 | 0.69 | 2.42 | 337.45 |
| 321 | 19.72 | 405 | 25.4 | 0.5 | 1 | 49.1 |
| 322 | 9.02 | 406 | 101.6 | 5.07 | 0.63 | 3.89 |
| 323 | 11.73 | 407 | 12.7 | -0.12 | 0.91 | 99.82 |

| | | | | | | |
|--------------------|-------|-----|-------|-------|------|--------|
| 325 | 9.87 | 408 | 12.7 | -0.24 | 1.9 | 362.48 |
| 326 | 34 | 409 | 12.7 | -0.03 | 0.23 | 7.29 |
| 327 | 16.13 | 410 | 12.7 | -0.04 | 0.32 | 16.29 |
| 269 | 39.3 | 411 | 101.6 | -5.62 | 0.69 | 4.68 |
| 284 | 15.06 | 412 | 101.6 | -5.93 | 0.73 | 5.15 |
| 328 | 5.5 | 413 | 50.8 | 1.97 | 0.97 | 20.01 |
| 329 | 7.92 | 414 | 101.6 | -9.3 | 1.15 | 11.53 |
| 330 | 22.14 | 415 | 19.05 | -0.46 | 1.63 | 167.57 |
| 331 | 15.29 | 416 | 19.05 | 0.16 | 0.54 | 24.51 |
| 332 | 10.26 | 234 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| 333 | 7.09 | 235 | 19.05 | 0.36 | 1.25 | 104.8 |
| 334 | 10.64 | 246 | 12.7 | 0.05 | 0.36 | 20.34 |
| 335 | 12.27 | 247 | 76.2 | 6.07 | 1.33 | 21.32 |
| 336 | 31.69 | 248 | 19.05 | 0.35 | 1.23 | 101.82 |
| 337 | 32.17 | 249 | 101.6 | 9.45 | 1.17 | 11.88 |
| 338 | 13.72 | 250 | 38.1 | 1.02 | 0.9 | 24.58 |
| 339 | 45.77 | 251 | 12.7 | 0.11 | 0.86 | 90.59 |
| 340 | 21.11 | 252 | 50.8 | 2.55 | 1.26 | 31.54 |
| 341 | 21.23 | 253 | 12.7 | 0.04 | 0.33 | 17.59 |
| 342 | 19.42 | 255 | 76.2 | 4.23 | 0.93 | 11.15 |
| 343 | 14.71 | 256 | 50.8 | 1.24 | 0.61 | 8.78 |
| 344 | 13.66 | 257 | 38.1 | 0.93 | 0.82 | 20.84 |
| 345 | 16.38 | 258 | 38.1 | 0.62 | 0.54 | 10.21 |
| Embalse 18 | 0 | 259 | 38.1 | 0.78 | 0.68 | 15.11 |
| Embalse 17 | 0 | 260 | 19.05 | 0.46 | 1.63 | 167.57 |
| Embalse 83 | 0 | 1 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| Embalse 500 | 0 | 56 | 19.05 | 0.31 | 1.09 | 82.01 |
| Embalse 34 | 0 | 167 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| | | 263 | 12.7 | -0.16 | 1.22 | 167.82 |
| | | 264 | 19.05 | -0.31 | 1.09 | 82.01 |
| | | 265 | 19.05 | -0.46 | 1.63 | 167.57 |
| | | 266 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| | | 267 | 38.1 | 2.48 | 2.18 | 119.47 |
| | | 268 | 50.8 | 6.2 | 3.06 | 156 |
| | | 269 | 38.1 | 1.38 | 1.21 | 42.02 |
| | | 270 | 25.4 | 0.93 | 1.83 | 143.39 |

| | | | | | | |
|--|--|-----|-------|-------|------|--------|
| | | 271 | 63.5 | 4.02 | 1.27 | 24.46 |
| | | 272 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| | | 273 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| | | 274 | 25.4 | 0.62 | 1.21 | 69.52 |
| | | 275 | 12.7 | -0.16 | 1.22 | 167.82 |
| | | 34 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| | | 37 | 25.4 | -0.16 | 0.31 | 6.3 |
| | | 38 | 19.05 | 0.16 | 0.54 | 24.51 |
| | | 41 | 12.7 | -0.16 | 1.22 | 167.82 |
| | | 32 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| | | 33 | 38.1 | -0.78 | 0.68 | 15.11 |
| | | 45 | 19.05 | 0.22 | 0.78 | 45.69 |
| | | 28 | 50.8 | 2.17 | 1.07 | 23.68 |
| | | 53 | 101.6 | 6.94 | 0.86 | 6.82 |
| | | 58 | 12.7 | -0.16 | 1.25 | 173.1 |
| | | 63 | 101.6 | -8.99 | 1.11 | 10.85 |
| | | 64 | 101.6 | -9.14 | 1.13 | 11.19 |
| | | 86 | 76.2 | 4.8 | 1.05 | 14.01 |
| | | 140 | 101.6 | 17.98 | 2.22 | 37.94 |
| | | 146 | 50.8 | 1.82 | 0.9 | 17.3 |
| | | 101 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| | | 131 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| | | 138 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| | | 189 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| | | 196 | 76.2 | 9.96 | 2.18 | 52.07 |
| | | 254 | 19.05 | 0.16 | 0.54 | 24.51 |
| | | 276 | 19.05 | 0.16 | 0.54 | 24.51 |
| | | 277 | 19.05 | 0.16 | 0.54 | 24.51 |
| | | 278 | 19.05 | 0.16 | 0.54 | 24.51 |
| | | 279 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| | | 280 | 19.05 | 0.16 | 0.54 | 24.51 |
| | | 281 | 19.05 | 0.16 | 0.54 | 24.51 |
| | | 282 | 19.05 | 0.16 | 0.54 | 24.51 |
| | | 283 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| | | 284 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| | | 285 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| | | 286 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| | | 287 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| | | 288 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |
| | | 289 | 12.7 | 0.16 | 1.22 | 167.82 |

