

## 1. INTRODUCCIÓN.

Para optar al título de especialista, dentro del programa de especialización en **RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO AMBIENTE** de la **ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA "JULIO GARAVITO"**, se tiene como requisito indispensable la realización de un proyecto de grado enfocado en el desarrollo de un tema que permita al especialista en recursos hidráulicos o medio ambiente tener una herramienta de consulta.

En este caso, se ha empleado el modelo de una red contraincendio de agua en tres programas diferentes. El primer programa, es el Programa para Optimización de Redes Parciales Sucesivas desarrollado años atrás como trabajo de grado en la especialización por CARDONA BEDOYA, A. y RIVEROS OSPINA, E. en la **ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA "JULIO GARAVITO"**, el segundo es el elaborado por el US Environmental Protection Agency EPANET y el tercero es el software matemático MATLAB. Adicionalmente se ha desarrollado un código en el software MATLAB, que combinado con EPANET (EPAMAT), permite utilizar funciones de optimización.

Dentro del estudio de la hidráulica de los conductos a presión, uno de los temas más interesantes se refiere al análisis hidráulico y la determinación de caudales y presiones en las redes abiertas y cerradas de tuberías. El problema adquiere mayor importancia cuando se incluye el costo de la tubería y su minimización, lo cual comprende aspectos de optimización; siempre que sea posible esta será la meta que buscará el ingeniero en el desempeño de sus actividades profesionales.

Aunque en la actualidad existen diferentes procedimientos de cálculo y programas computacionales, la mayoría se limita al cálculo de caudales y pérdidas de energía en los tramos de redes hidráulicas, así como la determinación de cotas piezométricas y presiones disponibles en los nodos. La tendencia actual es la de utilizar métodos que permitan optimizar el costo de la redes hidráulicas, lo que a su vez implica el uso de diámetros mínimos.

Generalmente, al realizar el análisis hidráulico y la determinación de los diámetros óptimos, éstos últimos dan resultados que no siempre se aproximan a los diámetros comerciales disponibles. Esta dificultad, con algunas metodologías, se puede superar tomando en consideración la sustitución de la tubería de diámetro  $D$  no comercial y de longitud  $L$ , por dos tuberías de diámetros comerciales, dispuestas en serie, de longitudes  $L_1$  y  $L_2$  y diámetros  $D_1$  y  $D_2$ , pero que cumplirán la condición  $L = L_1 + L_2$ .

Además, se tiene en cuenta que una tubería puede ser reemplazada por otras dos tuberías dispuestas en serie, si éstas conducen el mismo caudal con la misma pérdida de energía que la primera, que resulta ser la suma de las pérdidas de energía generadas por ambas tuberías. En el estudio de redes hidráulicas se aplican los diferentes métodos de resolución descritos a continuación así:

- a) **Métodos de verificación:** en este grupo se consideran los métodos de Hardy Cross, Matricial, Newton Raphson, etc. Dichos métodos sirven para verificar si los diámetros adoptados dan lugar a caudales y presiones razonables, sin contemplar aspectos económicos como el costo de las tuberías.
- b) **Métodos de optimización:** aquí, los métodos incluidos se caracterizan por estudiar diseños con algún criterio económico, consideran ciertas restricciones en cada malla o anillo de la red y permiten hallar los diámetros de los diferentes tramos. Entre estos métodos se citan la búsqueda exhaustiva, algoritmos genéticos, heurísticos y de programación dinámica.

A través del tiempo es evidente que las diferentes investigaciones formulan diferentes hipótesis y métodos que consideran cierto criterio económico, pero que no presentan una base matemáticamente sólida de respaldo, que asegure que el diseño realizado es el óptimo. Antes de la actual era de los computadores, el cálculo de redes daba lugar a tareas prolongadas y repetitivas, limitando considerablemente las posibilidades de evaluar y confrontar las diferentes alternativas. Esta limitación era más notoria en el caso de grandes redes, que requieren imperativamente un diseño óptimo, por la gran influencia en el costo del sistema.

En la actualidad, dado el uso generalizado de los equipos de computación, las dificultades que representaban anteriormente (la resolución de sistemas de ecuaciones, los procesos iterativos y otros tipos de cálculo engorrosos) han sido superadas, por lo cual muchos métodos que implicaban muchas operaciones en el pasado, ahora se resuelven planteando modelos matemáticos complementados con programas computacionales, que simplifican el análisis y la evaluación de diferentes alternativas.

Es imprescindible el estudio de nuevos métodos de optimización para el cálculo de redes hidráulicas, no solo para lograr bajar los costos en la construcción de sistemas de agua, sino porque es un deber de quienes logran alguna formación académica contribuir con algún aporte en el desarrollo de la ciencia, como una retribución por el beneficio recibido en su profesionalización.



## **2. OBJETIVOS.**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL.**

Por medio de la simulación de una red contraincendio en el Programa de Optimización de Redes Parciales Sucesivas, en el programa EPANET y en el programa MATLAB se analizarán los resultados, específicamente las alturas que requieren suministrar los equipos de bombeo al sistema, los diámetros optimizados por cada uno de los programas, bajo los requerimientos de las velocidades máximas permisibles, presiones finales y flujos de caudal de cada tramo.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

A partir del Programa EPANET y del Programa de Optimización de Redes Parciales Sucesivas se pretende evaluar el desarrollo de un código en MATLAB que en interacción con el EPANET, mediante otro código denominado EPAMAT, permita determinar ciertos parámetros de diseño como el equipo de bombeo requerido y los diámetros comerciales del sistema, a partir de la definición previa de presiones mínimas y demandas de caudal requeridas en los nudos, en función de las velocidades máximas de flujo permitidas en las tuberías.

### 3. MARCO TEÓRICO.

#### 3.1 FUNDAMENTOS.

En esta sección se presenta una breve descripción de los fundamentos de la hidráulica de tuberías a presión y de las características generales de los sistemas de redes abiertas, con base en que la hidráulica de la protección contra incendios estudia el flujo de agua que pasa por las tuberías y orificios, tal como las salidas de los hidrantes y lanzas de las mangueras o rociadores.

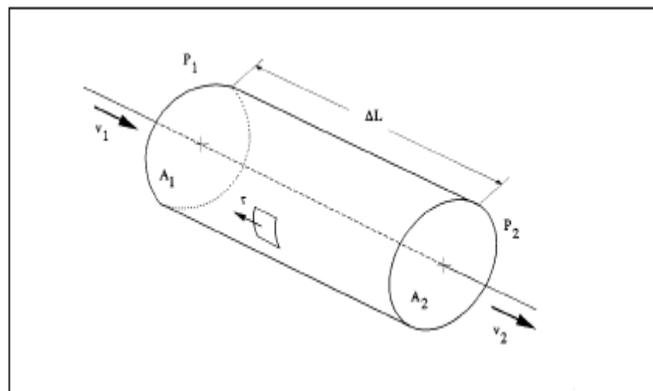
El análisis de flujo en tuberías se basa en el uso adecuado de las tres ecuaciones básicas de la mecánica de fluidos: la ecuación de continuidad, la ecuación de energía y la ecuación de cantidad de movimiento.

##### 3.1.1 Hidráulica de sistemas a presión.

###### 3.1.1.1 Ecuación de Continuidad.

La ecuación de continuidad expresa el flujo a través de distintas secciones en un tubo de corriente, como se muestra en la **Figura 3-1**.

**Figura 3-1. Tubo de Corriente**



Se desarrolla a partir del principio de conservación de la masa, la cual ni se crea ni se destruye, por lo tanto, entre las secciones  $A_1$  y  $A_2$ , la ecuación de continuidad en flujo permanente, es decir, si no hay acumulación de masa dentro del volumen de control, se expresa de la siguiente forma:

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2$$

Si el fluido es incomprensible, se tiene que  $\rho_1 = \rho_2$ , la ecuación toma la siguiente forma:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2$$

Donde:

- $A$ : Área de sección transversal ( $m^2$ ).  
 $V$ : Velocidad del fluido ( $m/s$ ).  
 $\rho$ : Densidad del fluido ( $kg/m^3$ ).

### 3.1.1.2 Ecuación de la Energía.

La primera ley de la termodinámica para un sistema afirma que el calor  $Q_H$  agregado a un sistema, menos el trabajo  $W$  realizado por éste, depende solo de los estados inicial y final del sistema. La diferencia en los estados del sistema, siendo independiente de la trayectoria del estado inicial al final, debe ser una propiedad del sistema. Ésta es llamada energía  $E$ . La primera ley en forma de ecuación, es

$$Q_H - W = E_2 - E_1$$

La materia es una forma de energía. En otros términos, se puede decir que la energía es la capacidad de producir un trabajo. La capacidad de producir un trabajo es energía potencial y el trabajo mismo es la energía en acción ó energía dinámica.

La energía de un fluido en cualquier momento consta de tres componentes:

- Potencial gravitacional o de posición.
- Cinética.
- De presión.
- Interna (química, nuclear).

**Energía potencial gravitacional, de posición o carga de altura:** es la energía que posee un fluido debido a la altitud, es decir, es la distancia  $Z$  de una partícula sobre un plano de referencia. La energía potencial por unidad de peso tiene dimensiones de longitud.

**Energía cinética o carga de velocidad:** es la energía que posee un fluido debido a la velocidad. Si un cuerpo de peso  $W$  se mueve a través de una dirección  $S$  partiendo del reposo, en una superficie sin fricción y al final de un tiempo  $t$ , el cuerpo tendrá una velocidad  $V$ . La energía correspondiente a esta velocidad se obtiene a partir de la segunda ley de Newton, en donde la fuerza está relacionada con la aceleración y la energía cinética por unidad de peso y está dada por la ecuación  $V^2/2g$ . Como  $g$  es la

aceleración de la gravedad, las unidades de la energía cinética por unidad de peso son de longitud.

**Energía de presión, de flujo o caga de presión:** es la energía que posee un fluido debido a la magnitud de la presión a que está sometido, El término  $p/\gamma$  es la energía por unidad de peso que corresponde a la presión  $p$  del fluido.

Si el fluido analizado, es un fluido ideal (es decir, sin fricción), se pueden plantear entre dos puntos, los anteriores tipos de carga para obtener la ecuación de energía. Para un fluido incomprensible, la ecuación es de la siguiente forma:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_L$$

En donde  $h_L$  representa las pérdidas de energía entre los tramos analizados.

## 3.2 FLUJO EN TUBERÍAS.

### 3.2.1 Aspectos generales.

A medida que un fluido circula a través de un conducto, se presentan pérdidas de energía debido a la fricción interna del fluido. Como se aprecia en la ecuación de la energía, estas pérdidas generan una disminución de la presión entre dos puntos del flujo. Debido a la importancia que representan las pérdidas de energía en un sistema de distribución de agua, es necesario conocer los diversos métodos que existen para calcularlas. Para la determinación de las pérdidas de energía y con el fin de superar las dificultades que se presentan al momento de aplicar la ecuación de energía en la solución del problema del flujo en tuberías, se cuenta con una serie de fórmulas, que en su gran mayoría son esencialmente empíricas. Estas ecuaciones son aplicables solamente a flujos permanentes uniformes y sólo tienen en cuenta las pérdidas por fricción.

La magnitud de la pérdida de energía depende básicamente de las propiedades del fluido, la velocidad del flujo, el diámetro, la rugosidad de las paredes y la longitud de la tubería.

Son numerosos los factores que afectan la velocidad de flujo en los conductos. Mediante la ecuación de continuidad, se puede observar que la velocidad de flujo aumenta a medida que se reduce el diámetro de la tubería y viceversa, mientras que las pérdidas de energía aumentan y la presión disminuye a medida que la velocidad es mayor.

### 3.2.2 Pérdidas por fricción.

En la solución de problemas hidráulicos, es necesario utilizar adicionalmente, ecuaciones que permitan relacionar las pérdidas de carga continuas con las características del flujo y el caudal.

- **Pérdidas de energía por fricción.**

En la ecuación general de la energía

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_L$$

el término  $h_L$  se define como la energía perdida por el sistema. Las pérdidas de energía se deben, como se mencionó anteriormente, a la fricción del fluido cuando está en movimiento. La fricción es proporcional a la cabeza de velocidad del fluido y al cociente de la longitud entre el diámetro de la corriente de flujo, para el caso de flujo en conductos ó tubos cerrados; estas pérdidas pueden ser calculadas con ayuda de la ecuación de Darcy-Weisbach.

$$h_f = f \frac{L V_2^2}{D 2g}$$

Donde:

- $h_f$ : Pérdida de energía debido a la fricción.
- $f$ : Factor de fricción.
- $L$ : Longitud del tramo de conducción.
- $V_2$ : Velocidad promedio del flujo.
- $D$ : Diámetro del tubo.
- $g$ : Aceleración de la gravedad.

A su vez, el factor de fricción  $f$  es función de dos parámetros adimensionales:

- El número de Reynolds  $R_e$ , que expresa la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas de viscosidad.
- El factor de rugosidad relativa  $\varepsilon / D$ .

Con ayuda de la ecuación de Darcy, se puede observar que la pérdida de carga en una tubería es directamente proporcional a la energía cinética por unidad de peso del flujo, donde el coeficiente de proporcionalidad es función del diámetro y del factor de fricción.

El factor de fricción varía según el tipo de flujo, laminar, turbulento o de transición que se produce en la conducción, el cual es determinado por el número de Reynolds.

El número de Reynolds hace distinción entre regímenes de flujo en tuberías, tales como flujo laminar o turbulento, en la capa límite, o alrededor de objetos sumergidos. El valor particular depende de la situación.

**Pérdida de energía en flujo laminar:** En el caso del flujo laminar, es más importante la pérdida de energía en el seno del fluido que en las paredes de la conducción, ya que la rugosidad no tiene una influencia directa sobre el factor de fricción.

Cuando se presenta flujo laminar, el fluido parece desplazarse sobre capas, las cuales se desplazan una sobre otra; debido a la viscosidad, se genera una tensión de corte entre las capas del fluido. La energía se disipa debido al vencimiento de las fuerzas de fricción producidas por la tensión de corte. Mediante la ecuación de Hagen–Poiseuille es posible encontrar la relación entre la pérdida de energía y los parámetros medibles del tipo de flujo.

$$h_f = \frac{32\mu L}{\gamma D^2}$$

Donde:

$h_f$ : Pérdida de energía debido a la fricción.

$\mu$ : Viscosidad.

$L$ : Longitud del tramo de conducción.

$\gamma$ : Peso específico.

$D$ : Diámetro del tubo.

A su vez, el factor de fricción  $f$  es función de dos parámetros adimensionales.

La ecuación de Hagen-Poiseuille es aplicable para flujos laminares ( $R_e < 2000$ ). Igualando las expresiones de Hagen-Poiseuille de Darcy, se despeja el factor de fricción  $f$ , obteniendo la siguiente expresión:

$$f = \frac{64}{R_e}$$

**Pérdida de energía en flujo turbulento** (conductos lisos y rugosos): A partir de los experimentos de Nikuradse, Von Karman y Prandtl dedujeron la siguiente expresión para la determinación de la pérdida de energía para flujo turbulento en conducto liso:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{2.51}{R_e \sqrt{f}} \right)$$

La pérdida de carga para flujo turbulento en conducto rugoso, la dedujeron Von Karman y Prandtl, mediante la siguiente expresión:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\varepsilon}{3.7D} \right)$$

En donde el término  $\varepsilon$  representa la rugosidad del conducto. Siendo constante el factor de fricción  $f$  para una determinada rugosidad relativa, la pérdida de energía unitaria es directamente proporcional al cuadrado de la velocidad.

**Ecuación de Colebrook-White:** Colebrook y White combinaron las ecuaciones de Von Karman - Prandtl para conductos lisos y rugosos y obteniendo una aproximación para el régimen turbulento en tuberías comerciales:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[ \left( \frac{\varepsilon}{3.7D} \right) + \left( \frac{2.51}{R_e \sqrt{f}} \right) \right]$$

Ecuación que permite calcular el valor del factor  $f$  para cualquier régimen turbulento; en el caso de flujo turbulento liso el valor de  $R_e$  es bajo, por lo tanto, el segundo término de la ecuación es preponderante frente al primero, transformándose la ecuación de Colebrook-White en la ecuación de Von Karman-Prandtl para tubos lisos. En el caso de flujo turbulento rugoso el  $R_e$  es mucho más grande, con lo que se hace despreciable el segundo término de la ecuación, y se obtiene de esta forma la ecuación de Von Karman-Prandtl para tubos rugosos.

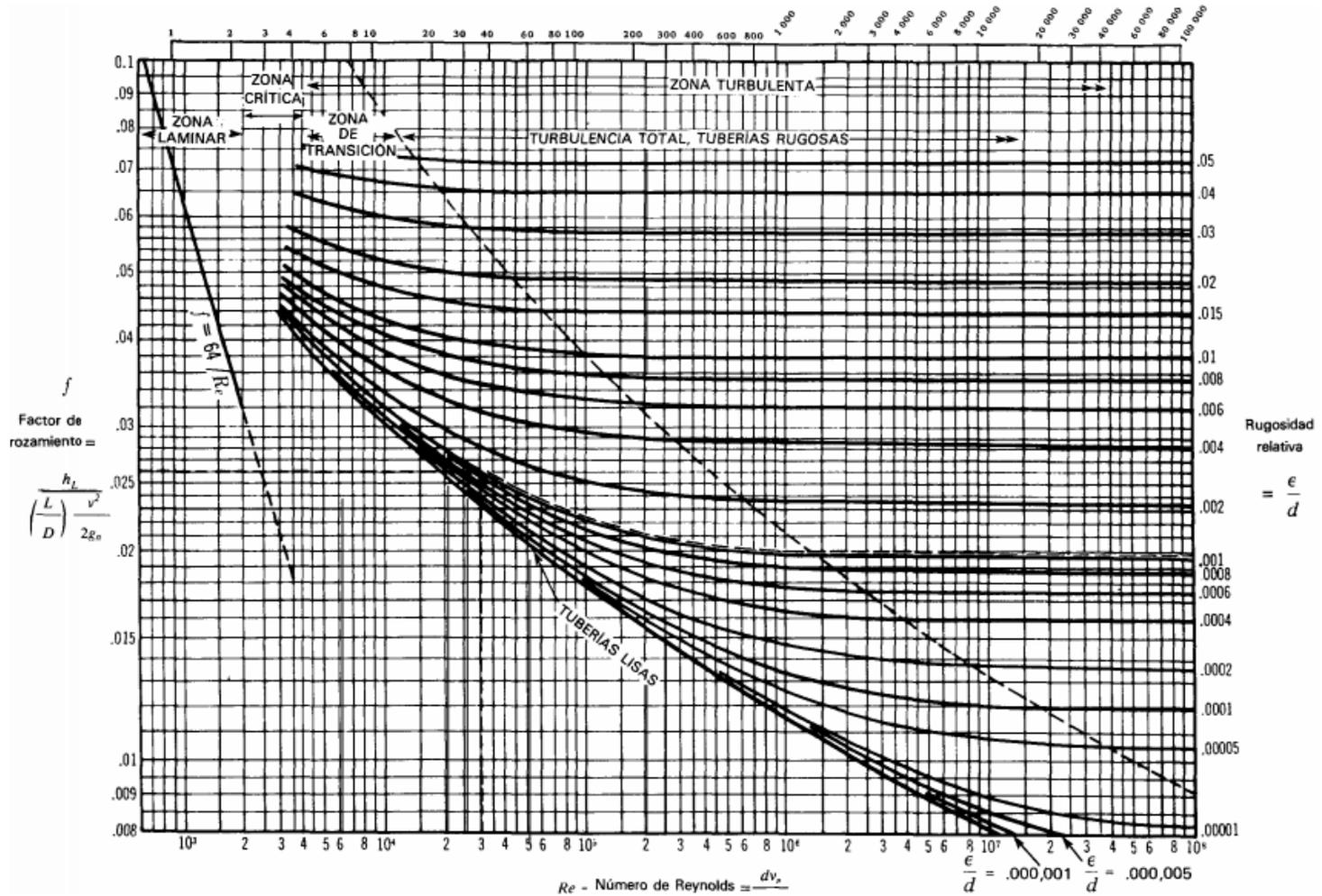
**Diagrama de Moody:** En 1944, L.F. Moody publicó los resultados de sus investigaciones en forma de gráfico, tratándose de un ábaco universal en el que los ejes se encuentran en forma logarítmica, indicando en las abscisas  $R_e$  y en las ordenadas  $f$ , así como una curva para cada valor de la rugosidad relativa.

El diagrama de Moody, presentado en la **Figura 3-2** se emplea como ayuda para la determinación del valor del factor de fricción  $f$ , para flujo turbulento. Deben conocerse los valores del número de Reynolds  $R_e$  y de la rugosidad relativa  $\varepsilon$ , que equivale al valor de la relación de la rugosidad absoluta y el diámetro de la conducción  $\varepsilon = K_s/D$ . Por tanto, los datos requeridos son el diámetro interior y material del conducto, la velocidad de flujo, el tipo de fluido y su temperatura para determinar el valor de la viscosidad.



Figura 3-2. Diagrama de Moody

Valores de  $(vd)$  para agua a 15°C (velocidad en m/s × diámetro en mm)



En la **Tabla 3-1** se indican los valores de rugosidad absoluta  $K_s$  para diferentes materiales empleados en la fabricación de tuberías.<sup>1</sup>

**Tabla 3-1. Valores de Rugosidad absoluta para diferentes materiales.**

Material	$K_s$
Acero	0.0460
Acero bridado	0.90 - 9.00
Acero comercial	0.4500
Acero galvanizado	0.1500
Arcilla vitrificada	0.1500
Asbesto - cemento	0.0300
CCP	0.1200
Concreto	0.30 - 3.00
Concreto bituminoso	0.2500
GRP	0.0300
Hierro dúctil	0.2500
Hierro forjado	0.0600
Hierro fundido	0.1500
Hierro dulce asfaltado	0.1200
Hierro galvanizado	0.1500
Madera cepillada	0.18 - 0.90
Polietileno	0.0070
PVC - CPVC	0.0015
Vidrio	0.0030

### 3.2.3 Fórmulas empíricas.

En la actualidad existe un gran número de fórmulas de origen empírico para el cálculo de las pérdidas de energía debidas a la fricción.

**Fórmula de Hazen-Williams:** El método de Hazen-Williams es muy popular puesto que su coeficiente de fricción ( $C$ ) no es una función de la velocidad o del diámetro de la tubería, lo que lo hace muy útil en el diseño y análisis de sistemas de agua. Su uso se limita al flujo de agua en conductos mayores de 0.052 m (2") y menores de 1.8 m de diámetro. La velocidad de flujo no debe exceder de 3.0 m/s y la temperatura ideal para agua es 24°C.

También se limita por usarse solamente para agua como fluido de estudio, mientras que encuentra ventajas por asociar únicamente su coeficiente a la rugosidad relativa del conducto, es decir, al material de la misma y el tiempo que este lleva de uso.

La fórmula de Hazen-Williams se expresa en el Sistema Internacional como:

<sup>1</sup> Datos recopilados por el autor de varias fuentes.



$$V = 0.85CR^{0.63}S^{0.54}$$

Donde:

- $V$ : Velocidad media del flujo (m/s).  
 $C$ : Coeficiente de Hazen-Williams, depende de la rugosidad del tubo (adimensional).  
 $R$ : Radio hidráulico del conducto,  $D_i/4$  para tubería trabajando a sección llena (m).  
 $S$ : Pendiente. Pérdida de carga por unidad de longitud del conducto  $h_f/L$  (m/m).

Debido a la existencia del radio hidráulico en la ecuación, se hace posible emplear la fórmula en secciones circulares y no circulares. En la **Tabla 3-2** se presentan algunos valores del coeficiente de Hazen-Williams.<sup>2</sup>

**Tabla 3-2. Coeficiente de Hazen-Williams.**

Material	Valor de $C$
Hierro Fundido, nuevo	130
Hierro Fundido, 10 años de edad	107 - 113
Hierro Fundido, 20 años de edad	89 - 100
Hierro Fundido, 30 años de edad	75 - 90
Hierro Fundido, 40 años de edad	64 - 83
Concreto	120 - 140
Fibrocemento	128
Cobre	130 - 140
Hierro Dúctil (DIP)	120
Hierro Galvanizado (HG)	120
Vidrio	140
Plomo	130 - 140
Plástico	140 - 150
PVC, CPVC	150
HDPE	150
Tubería Lisa Nueva	140
Acero - Nuevo	140 - 150
Acero	130
Acero soldado	90
Acero - Rolado	110

### 3.2.4 Pérdidas menores debidas a los accesorios.

En los sistemas de distribución, adicional a las pérdidas por fricción se presentan pérdidas menores ocasionadas por accesorios como codos, yees, uniones, válvulas, etc. Las pérdidas menores no deben despreciarse ya que resultan ser más importantes que las pérdidas por fricción.

<sup>2</sup> Datos recopilados por el autor de varias fuentes.

Las pérdidas menores se originan cuando se presenta un cambio en la sección transversal de la dirección de flujo ó cuando la trayectoria del flujo se encuentra obstruida, es así el caso de las válvulas. Las pérdidas de energía son proporcionales a la cabeza de velocidad de flujo al fluir éste alrededor de un accesorio, a través de una dilatación ó una contracción del conducto. Los valores experimentales de pérdidas de energía generalmente se reportan en términos de un coeficiente de resistencia  $K$ , de la siguiente forma:

$$h_L = K(V^2 / 2g)$$

Donde:

- $h_L$ : Pérdida menor de energía (m).
- $K$ : Coeficiente de pérdidas (adimensional).
- $V$ : Velocidad media de flujo en el conducto (m/s).
- $g$ : Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ ).

En algunos casos, puede darse más de una velocidad de flujo, como en el caso de las dilataciones y contracciones. El valor del coeficiente de resistencia depende de la geometría del accesorio que genera la pérdida y en algunas ocasiones depende de la velocidad del flujo.

El valor de coeficiente de pérdidas, utilizado en la red contraincendio modelada en esta trabajo, corresponde a material acero  $K_s = 0.046$  de acuerdo con los valores de la **Tabla 3-1**.

### 3.2.5 Límites de velocidad y selección de diámetro.

Las velocidades bajas tienden a formar depósitos de los materiales en suspensión y las velocidades altas ocasionan ruidos, vibraciones y peligro de golpe de ariete.

Los límites aceptados por la mayoría de códigos y normas son  $V_{min} = 0,60$  m/s y  $V_{máx} = 2,40$  m/s. Para las condiciones especiales de diseño y funcionamiento que requiere una red contraincendio y de diámetros mayores a 3", pueden utilizarse velocidades más altas<sup>3</sup>.

En los sistemas contraincendio, generalmente se define la velocidad por el efecto que tiene ésta en la fórmula de Hazen-Williams. Si la velocidad excede 9,75 m/s (32 pie/s), los valores de los coeficientes de Hazen-Williams no son confiables. Por esta razón se trabaja una  $V_{máx} = 9,75$  m/s (32 pie/s), aunque esto no está escrito

---

<sup>3</sup> GRANADOS, J.A. Redes Hidráulicas y Sanitarias en Edificaciones. Universidad Nacional de Colombia. Pág.157.

en las normas. Para la mayoría de los casos, las compañías aseguradoras requieren una  $V_{m\acute{a}x} = 6,10$  m/s (20 pie/s).

Como para cada punto (rociador, gabinete o hidrante) se define el caudal y presión requeridos de acuerdo con la clasificación de riesgo especificada por la norma NFPA 13, para el cálculo del diámetro de la tubería se proporciona aquel que suministre a dicho punto, el caudal y presión fijados, funcionando por debajo de la velocidad máxima límite. En este trabajo de grado se han corrido los modelos para los siguientes casos: a)  $V_{m\acute{a}x} = 2,5$  m/s para  $\varnothing \leq 3"$  y  $V_{m\acute{a}x} = 2,5$  m/s para  $\varnothing 3"$  y b)  $V_{m\acute{a}x} = 6,1$  m/s.

### 3.2.6 Descarga de agua a través de orificios

Cuando un líquido sale de una tubería, conducto o recipiente a través de un orificio a la atmósfera, la presión normal se convierte en altura de velocidad. El caudal del agua a través de un orificio puede expresarse en función de la velocidad y de la sección, siendo la relación básica  $Q = AV$ , del chorro. De las anteriores fórmulas sobre la presión de velocidad, se sabe que:

$$Q = A\sqrt{2gh}$$

Donde:

- $Q$ : Caudal ( $m^3/s$ ).
- $A$ : Área de la sección conducto ( $m^2$ ).
- $V$ : Velocidad en ese punto (m/s).
- $g$ : aceleración de la gravedad ( $m^3/s$ ).
- $h$ : Altura de presión a la que se alcanza esa velocidad (m).

### Coefficientes de Descarga

En condiciones reales con boquillas u orificios, la velocidad, considerada como velocidad media en toda la sección del chorro, a veces es algo inferior a la velocidad calculada a partir de la presión. Esta reducción se debe al rozamiento del agua contra la boquilla u orificio y a la turbulencia dentro de la boquilla u orificio y se expresa mediante un coeficiente de velocidad  $c_v$ . Los valores de  $c_v$  se calculan mediante pruebas de laboratorio. Cuando las boquillas están bien diseñadas, este coeficiente es casi constante y aproximadamente igual a 0,98.

Algunas boquillas están diseñadas de modo que la sección real del chorro sea algo menor que la del orificio. Esta diferencia se contempla mediante un coeficiente de contracción  $c_c$ . Para orificios con aristas vivas, su valor es aproximadamente de 0,62.

Generalmente los coeficientes de velocidad y contracción se combinan como un solo coeficiente de descarga denominado  $c_d$

$$c_d = c_v c_c$$

Por consiguiente, la ecuación básica del caudal se puede escribir así:

$$Q = 1,1c_d\phi^2\sqrt{p_v}$$

Donde:

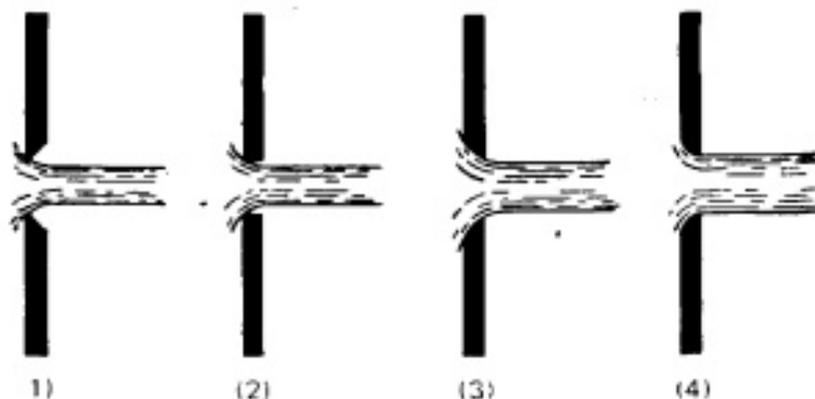
- $Q$ : Caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).  
 $c_d$ : Coeficiente de descarga.  
 $\phi$ : Diámetro del conducto (m).  
 $p_v$ : Presión (kPa),  $h = 0,102p_v$  (m).

El coeficiente de descarga  $c_d$  se define como la relación entre la velocidad de descarga real y teórica. Para un orificio o boquilla específica, los valores de  $c_d$  se calculan mediante procedimientos normalizados de ensayo a partir de esta definición.

### Orificio normalizado

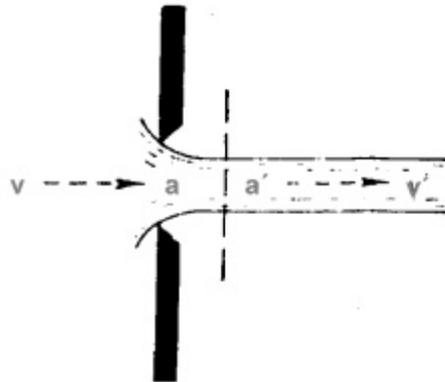
Un orificio con aristas vivas de entrada, como el que se ve en (1) de la **Figura 3-3**, se conoce como orificio normalizado y es el que se emplea comúnmente para la medición de caudales de agua. Al salir el agua por dichos orificios se contrae para formar un chorro cuya sección es inferior a la del orificio. La contracción es completa en el plano  $a'$  (**Figura 3-4**), que está situado a una distancia del plano del orificio aproximadamente igual a la mitad del diámetro del chorro.

**Figura 3-3. Orificios de diversas formas**



Si cambia la forma del orificio de modo que disminuya la contracción, aumentará su capacidad. La forma (1) es un orificio normalizado con aristas vivas por el lado de entrada. La forma (2) cuando el orificio está en una chapa delgada, da un chorro de las mismas características que el de la forma (1). La forma (3) es la inversa de la (1). En la forma (4) el borde del orificio está redondeado para ajustarse a la forma del chorro. Los coeficientes de descarga de (3) y (4) son mayores que los orificios normalizados, que se acercan a 1,0 en el caso de (4).

**Figura 3-4. Caudal a través de un orificio normalizado**



La cantidad de agua que fluye por el orificio es evidentemente igual en **a** que en la parte contraída **a'**, de modo que la cantidad descargada se puede calcular midiendo la velocidad y superficie en cualquiera de estos planos. Expresado en la siguiente fórmula:

$$Q = aV = a'V'$$

El coeficiente de descarga de un orificio normalizado es el producto del coeficiente de velocidad por el coeficiente de contracción, es decir,  $c_d = 0,98 \times 0,62 = 0,61$ .

### Otros orificios

Las características hidráulicas de una buena boquilla para chorro continuo deben ser adecuadas para una gran variedad de caudales. La velocidad en la superficie del chorro de la mayoría de las dichas boquillas se reduce ligeramente por la fricción en el orificio o boquilla. Generalmente se aplica un coeficiente de velocidad de 0,97 para tener esto en cuenta.

Existen coeficientes de descarga para la salida del agua a través de hidrantes, boquillas de mangueras, rociadores automáticos y otros orificios corrientes de protección contraincendios. En la **Tabla 3-3** se incluyen los valores representativos

de esos coeficientes de descarga. Estos coeficientes sólo se aplican cuando sale agua por todo el orificio o boquilla con un perfil de velocidad razonablemente uniforme.

**Tabla 3-3. Coeficientes de descarga típicos.** <sup>4</sup>

<b>Boquillas de chorro compacto</b>	<b><i>c</i></b>
Rociador normal medio (DN 1/2")	0,75
Rociador normal medio (DN 17/32")	0,95
Rociador normal medio (DN 0,64")	0,90
Orificio normalizado (aristas vivas)	0,62
Boquilla de bordes lisos, en general	0,96 - 0,98
Tubos ajustables underwriter o similares	0,97
Boquillas de diluvio o de divergencia	0,997
Tubería abierta lisa y bien redondeada	0,90
Tubería abierta, abertura con rebarbas	0,80
Boca de hidrante con salida lisa y bien redondeada a caudal lleno	0,90
Boca de hidrante con aristas vivas	0,80
Boca de hidrante con salida cuadrada que se introduce en el cuerpo del hidrante	0,70

### 3.3 REDES ABIERTAS.

Teóricamente, el flujo en tuberías comprende dos tipos: flujo en tuberías simples o flujo en tuberías en serie o en paralelo. En la práctica, en los sistemas de distribución de agua se presentan varios tipos de redes clasificados en: redes abiertas, redes malladas y redes de riego.

Las redes abiertas son conductos ramificados que se alimentan de uno o varios suministros y conducen el agua entre ellos o desde ellos y los extremos finales por un único recorrido posible. Se dice que una red es abierta cuando los tubos que la componen se ramifican sucesivamente sin interceptarse después para formar circuitos. Los extremos finales de las ramificaciones pueden terminar en un reservorio, aparato de consumo o descargar libremente a la atmósfera.

En puntos determinados de la red pueden ocurrir descargas o salidas de agua, además de las posibles ramificaciones. Esos puntos se denominan nudos de consumo. Pero también es un nudo el punto donde cambian las características del conducto, como su diámetro o su rugosidad, así no haya consumo ni ramificación.

La forma más sencilla en que funciona una red abierta, es con el uso simultáneo de todos los aparatos o puntos de toma.

<sup>4</sup> BOTTA, Néstor. Prevención y Control de Incendios. Pág. 8.

Una red contraincendio, donde en un evento de incendio pueden estar en uso todos los puntos, hidrantes, gabinetes y rociadores que conforman la red, es un ejemplo del uso masivo y simultáneo de los puntos de toma de agua.

### 3.3.1 Caudales simultáneos.<sup>5</sup>

Este método supone que funcionan todos los aparatos de la red al mismo tiempo. Este ocurre bajo condiciones extremas y la red deberá estar en capacidad de responder sin que se pierdan las condiciones mínimas de suministro en todos los puntos de toma.

El cálculo del caudal que va por cada uno de los tramos de la red, corresponde a la suma de los caudales que se suministran aguas abajo del tramo referenciado.

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i$$

Donde:

$Q$ : Caudal total del tramo.

$q_i$ : Caudal de cada uno de los nodos o puntos de toma que se encuentran aguas abajo.

En el caso de diseño por zonas de riesgo, el caso típico es el de sistema contraincendio con rociadores (sprinklers), donde al activarse una zona protegida, cada uno de los rociadores será un punto al cual se le suministra agua con la misma presión y con el mismo caudal (Norma NFPA 13). Para este caso se asemeja el funcionamiento de la red a una red de caudales simultáneos.

### 3.3.2 Caudales puntuales o zonales.<sup>6</sup>

Para redes contraincendio, dependiendo de la normatividad, la red deberá atender los puntos con una presión y un caudal. Para el caso de edificaciones donde se diseñan únicamente gabinetes, cada piso tendrá un gabinete con manguera y extintor, en cuyo caso de incendio, la manguera es el único punto de agua que se activará.

---

<sup>5</sup> CARDONA, Álvaro. RIVEROS, Ernesto. Programa para la Optimización por Costos de Redes Abiertas. Método de Redes Parciales Sucesivas. Escuela Colombiana de Ingeniería.

<sup>6</sup> CARDONA, Álvaro. RIVEROS, Ernesto. Programa para la Optimización por Costos de Redes Abiertas. Método de Redes Parciales Sucesivas. Escuela Colombiana de Ingeniería.

### 3.3.3 Método de simultaneidad por aparatos hidráulicos.<sup>7</sup>

Este método se basa en la aplicación de factores de simultaneidad ( $K$ ), el cual debe afectar el caudal máximo posible y para obtener el caudal máximo probable. El caudal está en función del número de aparatos alimentados por la tubería que se desea diseñar, de la utilización y del tipo de aparato.

Para un tramo de la red que alimenta un determinado número de aparatos, el caudal máximo posible es la suma de los caudales demandados por los aparatos suponiendo para éstos que su funcionamiento es simultáneo. El método del factor de simultaneidad determina un caudal máximo probable, que es el caudal del tramo suponiendo que no se presenta el funcionamiento de todos los aparatos de manera simultánea.

Este ha sido el método involucrado en el desarrollo del Programa de Redes Parciales Sucesivas, ya que para el análisis de redes abiertas permite realizar el análisis hidráulico de redes internas. Para el caso de las red contraincendio tiene un valor de  $K = 1$ .

## 3.4 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

Un método común en el diseño de un sistema de distribución de agua es el ensayo y error. En este caso no se utiliza un único analizador de redes para determinar cuál es el sistema óptimo desde los puntos de vista hidráulico y económico.

Debido a las diversas interacciones entre componentes, puede encontrarse dificultad en la identificación de cambios para mejorar un diseño. La aproximación a la que se llegue no brinda la seguridad de que se haya determinado una buena y óptima solución. Es por ello que se han desarrollado diferentes métodos de aproximación para encontrar con relativo éxito el diseño óptimo de un sistema de distribución.

Cuando se desea optimizar el diseño de un sistema de distribución de agua deben considerarse diferentes temas, entre los cuáles el principal suele ser el costo, que incluye el costo de construcción, operación y mantenimiento. Las principales restricciones que se presentan, son que las demandas deseadas se suministren con las presiones adecuadas y a su vez que sean mantenidas en puntos concretos.

El caudal y la presión para cada nodo, deben satisfacer las leyes de conservación de la energía y de la masa. En resumen, el objetivo es minimizar los costos de

---

<sup>7</sup> RODRÍGUEZ, Héctor A. Diseños Hidráulicos, Sanitarios y de Gas en Edificaciones. Ed. ECI. 2005.

inversión en la construcción y de energía durante la operación y mantenimiento, sujetos al cumplimiento de las condiciones hidráulicas de demanda y presión.

Para el caso de las redes contraincendio, los caudales y presiones a satisfacer son los requeridos en cada uno de los nodos de las redes modeladas, de acuerdo con la normatividad que aplique para las condiciones dadas. Adicionalmente, otras restricciones que se pueden tener en cuenta son el tipo, tamaño o material; ó, diferentes alternativas de rehabilitación (limpieza, revestimiento ó ambas), construcción por etapas, indefinición de la disposición en planta, etc.

Una restricción común es limitar el rango de velocidades de acuerdo con las normas; también se incluyen al problema requisitos de calidad del agua.

### 3.5 FORMULACIÓN MATEMÁTICA. <sup>8</sup>

La optimización de un problema se puede establecer matemáticamente en términos de alturas de presión nodal  $H$  y de varios parámetros de operación y diseño,  $R$ , incluyendo las relaciones generales que tengan en cuenta las restricciones del problema.

Objetivo:  $\text{minimizar costo} = f(H,R)$

Sujeto a:

$G(H,R) = 0$  Ecuaciones de conservación de masa y energía.

$H \leq \bar{H} < H$  Límites de altura de presión nodal.

$u \leq u(R) < \bar{u}$  Restricciones relacionadas con los límites de los parámetros de diseño/operación.

$w \leq w(H, R) < \bar{w}$  Restricciones relacionadas con los límites de los parámetros de diseño y alturas de presión.

Las variables de decisión  $R$  definen las dimensiones para cada componente del sistema, por ejemplo: el diámetro de la tubería, el tamaño de la bomba, ajuste de válvulas y el volumen del depósito o su elevación. Aquí, la función objetivo puede o no ser lineal. Como cada componente puede tener un término asociado con el costo de la función objetivo, puede considerarse la variabilidad de los costos debido a la situación de las instalaciones o su período de vida útil.

---

<sup>8</sup> MAYS, Larry W. Manual de Sistemas de Distribución de Agua. Ed. McGrawHill. 2000. Pág. 7.3.

En este tipo de formulación, los límites superior e inferior de las alturas de presión en los nodos se dan como límites estrictos. Otras optimizaciones basadas en la fiabilidad reconocen que pueden aceptarse ligeras desviaciones de los intervalos absolutos, dependiendo de la variación del costo del sistema. Las alturas de presión en los nodos para la red modelada en este trabajo, se determinan a partir de la metodología descrita para el cálculo de la presiones de diseño de rociadores en la norma NFPA-13, la cual es función del caudal determinado para el sistema y del coeficiente de descarga del rociador,  $P = 11,30 m$ .

Los límites de las variables de diseño ( $u$ ) se escriben en forma general, sin embargo, con frecuencia, los límites que definen el tamaño del componente son límites simples. Así, las decisiones pueden ser continuas o discretas. Muchas decisiones, como las de los diámetros de tuberías comercialmente disponibles, son discretas y hacen que el problema sea difícil de resolver. El tiempo de cálculo para un sistema de  $N$  tuberías es una función exponencial de  $N$ ; así, el tiempo de resolución aumente ampliamente con el número de tuberías. Muchos autores consideran que los diámetros son continuos y suponen que las soluciones por redondeo son casi óptimas, ó bien, separan la tubería en dos secciones con diámetros distintos en el diseño final.

El conjunto general de restricciones  $w$  incluye límites en términos que son funciones de las alturas de presión en los nodos y de las variables de diseño. Son ejemplos de estos términos la velocidad de la tubería, las restricciones de calidad del agua, los límites de presupuesto y las medidas de fiabilidad. En el modelo de la red de este trabajo se utilizaron velocidades máximas de  $V_{m\acute{a}x} = 2,5 m/s$  y  $V_{m\acute{a}x} = 6,1 m/s$ .

Las ecuaciones de conservación son un conjunto de ecuaciones no lineales que relacionan la distribución de caudales y alturas de presión con las demandas en los nodos y las variables de diseño seleccionadas. Esa condición de igualdad debe escribirse para cada condición de carga que se vaya a examinar. En tales ecuaciones están incluidas las demandas externas en los nudos. Estas ecuaciones se pueden escribir para redes ramificadas o en bucles, para una o más demandas, incluyendo un período de simulación extendida. Las ecuaciones de conservación imponen un grado de dificultad significativo para resolver el problema de optimización. La mayoría de aproximaciones intentan simplificar las ecuaciones, o resolverlas fuera de modelos de optimización para evitar que queden incluidas como restricciones. Muchos de los métodos consideran múltiples condiciones de demanda, pero esto aumenta el costo del cálculo.

El problema de la optimización en general y desde luego el de redes aún no ha sido resueltos, ya que es muy complejo encontrar una solución a modelos que integren todas o gran cantidad de las restricciones que se presentan. La mayoría de los esfuerzos se han centrado sobre la minimización de los costos de las redes con límites simples sin operaciones.

### 3.6 MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN.

Inicialmente, en los Métodos de Optimización de Redes Abiertas, la cota piezométrica disponible en la cabeza de una red y el caudal de servicio que debe circular por cada ramal fueron los condicionantes básicos en el diseño, los cuales solo permitían plantear el problema por tanteos y de manera indeterminada, generando gran número de soluciones de dimensionamiento para la red.

La necesidad en el diseño, de disponer de una adecuada metodología de cálculo, surge al comprobarse las diferencias de costo que se presentan entre las soluciones adoptadas. Como consecuencia se desarrollaron técnicas y normas que permitían mejores ajustes y más rápidos resultados que la metodología de los tanteos indeterminados, pero dichas soluciones continuaron lejos de la solución óptima. Es así como surge la metodología de los métodos de aproximación, donde los principales criterios condicionantes son la velocidad recomendable y el ordenamiento del cálculo de los ramales.

Más adelante, los métodos de aproximación fueron reemplazados por métodos más eficientes, que además buscaban que la solución fuera la más económica; dentro de éstas técnicas se destacan la programación lineal, la programación dinámica y la condición del óptimo de Lagrange. Para resolver las decisiones continuas de programación no lineal, el esfuerzo se ha centrado sobre técnicas de investigación estocásticas, como los algoritmos genéticos y "simulated annealing".

A pesar de una amplia investigación, la optimización no ha encontrado su camino en la práctica estándar de la ingeniería, en parte porque los algoritmos existentes no han sido típicamente empaquetados como herramientas de uso fácil. Con cualquier modelo, siempre existen diferencias entre este y la realidad. Esto es cierto para los modelos de optimización de los algoritmos que no captan plenamente el proceso de diseño. Sin embargo, la optimización no debe ser vista como un proceso automatizado de identificación que tenga una sola solución. Más bien, es un proceso mediante el cual se ofrecen soluciones alternativas y se genera una serie de costos y beneficios. Para lograrla, se requiere la plena participación de los ingenieros de diseño.

La mayoría de los algoritmos de optimización plantean el problema como la minimización de los costos sujetos a la factibilidad hidráulica, la satisfacción de las demandas, limitaciones de la presión. En realidad, los ingenieros de diseño deben considerar estos factores, incluyendo:

- Un nivel razonable de redundancia y fiabilidad.
- Las restricciones presupuestarias.



- Compensaciones entre diferentes objetivos (por ejemplo protección contraincendios, en comparación con la calidad del agua).
- Un futuro incierto.

Entre las técnicas que prometen, los algoritmos genéticos, son los más capaces de responder a las necesidades de los ingenieros de diseño. La optimización cada vez puede servir como una herramienta más para el ingeniero de diseño y es improbable reemplazarla como una buena práctica de la ingeniería.

A continuación se mencionan brevemente algunas de estas metodologías.

### **3.6.1 Aproximación por ensayo y error.**<sup>9</sup>

En la práctica, la experiencia adopta reglas generales y aprovecha la experiencia personal para evitar analizar todas las configuraciones posibles. Con la ayuda de un programa de resolución de redes hidráulicas, el diseñador tradicionalmente adopta el método de ensayo y error para producir algunas soluciones factibles (soluciones que satisfacen la restricción de diseño), que pueden ser el precio. En sistemas grandes, un problema puede tener muchas posibles soluciones, pero el número de soluciones alternas consideradas es limitado por el tiempo y los recursos financieros disponibles. Es probable que las soluciones desarrolladas mediante el procedimiento de ensayo y error brinden éxito en el cumplimiento de los criterios de diseño con respecto a la restricción (presión, velocidad, etc.), pero tienen menor éxito en la entrega de estos beneficios al menor costo.

### **3.6.2 Búsqueda exhaustiva.**<sup>10</sup>

Los algoritmos exhaustivos son aquellos que analizan todo el espacio de búsqueda para encontrar una o todas las soluciones y garantizan que pueden encontrar una solución óptima. El retroceso o vuelta atrás es una técnica de resolución de problemas que realiza una búsqueda exhaustiva, sistemática y organizada sobre el espacio de búsqueda del problema, aplicable a problemas de optimización, juegos, búsquedas entre otros.

Se llaman algoritmos de vuelta atrás, porque en el caso de no encontrar una solución a una subtarea se retrocede a la subtarea anterior y se prueba otro camino diferente a los probados anteriormente. Este tipo de estrategias tienen una premisa fundamental que afirma que si un problema tiene solución, este la encuentra.

---

<sup>9</sup> HAESTAD et al. Advance Water Distribution Modeling and Management. Haestad Press. 1<sup>st</sup> ed.

<sup>10</sup> Universidad Nacional de Colombia. Dirección Nacional de Servicios Académicos Virtuales. Sede Manizales. Análisis y Diseño de Algoritmos.

Los problemas que manejan los algoritmos exhaustivos, se caracterizan por:

- Se trata generalmente de problemas de optimización, con o sin restricciones.
- La solución es expresable en forma de una secuencia de decisiones.
- Existe una función denominada factible que permite averiguar si en una secuencia de decisiones, la solución en curso, viola o no las restricciones.
- Existe una función, denominada solución, que permite determinar si una secuencia de decisiones factible es solución al problema planteado.

El inconveniente con la búsqueda exhaustiva no sólo es que no siempre sea factible, sino que su mal comportamiento con respecto al aumento de tamaño del espacio de búsqueda, y el hecho de que necesite un tamaño de memoria de ordenador proporcional al tamaño del problema, hace que no se pueda aplicar en la mayor parte de los casos. Sin embargo, en algunos casos puede ser útil; por ejemplo, en la fase final de la resolución del problema cuando el subespacio de búsqueda esté suficientemente acotado.

### 3.6.3 Método de la pérdida de carga constante.<sup>11</sup>

Método basado en condicionar la elección del diámetro de cada tramo, de manera que la pérdida de carga en cada tramo sea lo más cercana posible a la media del tramo a que pertenece, es decir, se busca que para cada tramo la línea piezométrica se asemeje a una línea recta.

Inicialmente se determina la red que mayores pérdidas de energía presenta, igual que lo que se hace en el diseño hidráulico de redes de distribución en edificaciones; para este tramo se calculan la pérdida de carga máxima disponible  $H_0 - H_i$  y la longitud total del recorrido  $L$ , cuyo cociente corresponde a la pérdida de carga unitaria  $h_f$ .

El cálculo se realiza ordenadamente de cabeza a cola, luego se determina el primer diámetro teórico para el primer tramo teniendo en cuenta el caudal que fluye y la pérdida de carga unitaria igual a la media obtenida; se fija el diámetro comercial más próximo por debajo del diámetro teórico obtenido y se halla la pérdida unitaria real del tramo. En caso de que las condiciones del tramo siguiente aguas abajo obliguen a emplear un diámetro mayor al seleccionado en el primer tramo, se debe repetir el cálculo en el tramo anterior con el siguiente diámetro comercial.

---

<sup>11</sup> CARDONA, Álvaro. RIVEROS, Ernesto. Programa para la Optimización por Costos de Redes Abiertas. Método de Redes Parciales Sucesivas. Escuela Colombiana de Ingeniería.

Para cada caso, se tiene como restricción las velocidades de flujo, las cuales no deben sobrepasar los límites impuestos inicialmente para cada diámetro; este procedimiento se repite para cada tramo que conforman la red. Este método es simple, rápido y sus resultados son aproximados a la solución óptima.

#### 3.6.4 Método de la programación lineal.<sup>12</sup>

Basado en la formulación de  $n$  diámetros para un tramo determinado, se debe determinar la longitud óptima para cada diámetro que se haya propuesto. La función objetivo para determinar la longitud de cada subtramo se basa en el costo mínimo de todo el tramo.

Las restricciones no implícitas que debe verificar la función objetivo son, que sea suministrado el caudal proyectado y la presión de servicio mínima requerida a cada punto de toma. El planteamiento es simple con la facilidad de integrar el cálculo a los diferentes paquetes de programación lineal existentes.

#### 3.6.5 Método de Labye-Lechapt.<sup>13</sup>

Este método asume que los diámetros no se encuentran estandarizados y que es posible obtener en el mercado el diámetro exacto requerido. La pérdida de carga unitaria es función del caudal y del diámetro.

#### 3.6.6 Método discontinuo de Labye.<sup>14</sup>

A diferencia del anterior, para este método los diámetros de las tuberías se encuentran estandarizados por parte de los fabricantes y las velocidades máximas y mínimas del flujo dentro de los tramos se definen por el diseñador, así, se limita el número de tuberías posibles a emplear en un tramo determinado.

En un tramo en el que se conocen el caudal de diseño y la longitud, existen  $n$  diámetros que cumplen con las restricciones de velocidad. La pérdida de carga, suponiendo que todo el tramo es de un solo diámetro se expresa como  $\Delta H_i$  y el costo de dicho tramo se expresa como  $P_{t_i}$ .

A continuación se grafican las parejas de puntos  $\Delta H_i$ ,  $P_{t_i}$  correspondientes a cada diámetro seleccionado; con la nube de puntos obtenida y la poligonal envolvente se obtiene el campo en el cual se halla cualquier posible solución. Dentro de este

<sup>12</sup> CARDONA, Álvaro. RIVEROS, Ernesto. Programa para la Optimización por Costos de Redes Abiertas. Método de Redes Parciales Sucesivas. Escuela Colombiana de Ingeniería.

<sup>13</sup> CARDONA, Álvaro. RIVEROS, Ernesto. Programa para la Optimización por Costos de Redes Abiertas. Método de Redes Parciales Sucesivas. Escuela Colombiana de Ingeniería.

<sup>14</sup> CARDONA, Álvaro. RIVEROS, Ernesto. Programa para la Optimización por Costos de Redes Abiertas. Método de Redes Parciales Sucesivas. Escuela Colombiana de Ingeniería.

conjunto infinito de soluciones, existe una solución cuyo costo es inferior a las restantes

### 3.6.7 Sistemas ramificados.<sup>15</sup>

Para el dimensionamiento de tuberías en redes ramificadas se aplicó la programación lineal con tuberías divididas. De esta forma, cada tubería se divide en segmentos de diferentes diámetros y se optimizan las longitudes de cada tramo. Es así como los sistemas ramificados se adaptan a modelos lineales de optimización. Para eliminar la limitación de las longitudes de las tuberías divididas se aplica un algoritmo genético, para la disposición y diseño de una red ramificada.

Los sistemas ramificados o en árbol, como los sistemas de irrigación o las redes contraincendio, tienen un solo camino de flujo en cada nodo. Así, por conservación de la masa, el caudal en cada tubería puede calcularse para un conjunto de demandas nodales sumando la demanda total aguas abajo de la tubería. La pérdida de energía en cada tubería es función del diámetro y material seleccionado. Además la pérdida de energía y el costo de la tubería aumentan linealmente con la longitud de la misma.

La función objetivo suma los costos de cada segmento de tubería que constituye la longitud total entre cada nodo y suma todas las tuberías. La restricción requiere que la longitud total de los segmentos de diferentes diámetros en el conjunto de los diámetros admisibles sea igual a la distancia entre nodos para todas las tuberías.

La ecuación hidráulica es la de pérdida de carga a lo largo del camino desde la fuente con una presión nodal  $H_s$  hasta cada nodo N. Esta pérdida de energía está limitada para asegurar que la altura de presión nodal se encuentra entre las presiones mínima y máxima. Para tener en cuenta las bombas, se añade un término de altura de bomba.

Así, el modelo es lineal con respecto a las longitudes de los segmentos de tubería y puede resolverse por métodos de programación lineal estándar. Este modelo de únicas fuente y carga, puede extenderse a múltiples fuentes y condiciones de carga. Si el costo de adición de la altura de la bomba es lineal, éste se puede incluir en la función objetivo.

---

<sup>15</sup> MAYS, Larry W. Manual de Sistemas de Distribución de Agua. Ed. McGrawHill. 2000.

### 3.6.8 Método de programación no lineal.<sup>16</sup>

La programación no lineal, generalmente se ha aplicado a problemas más generales. Se une el modelo de simulación de la red con el modelo de simulación de modo que las restricciones hidráulicas puedan eliminarse del problema de optimización. Los modelos de programación no lineal pueden considerar múltiples condiciones de demanda y un amplio rango de las variables de diseño. El problema de diseño se resuelve utilizando una estructura de control optimizado que relaciona un modelo de simulación de la red con un optimizador no lineal, en cuyo caso, un conjunto de variables de decisión  $R$ , conocidas como variables de control en esta formulación, se pasan del optimizador al analizador de redes. El modelo de simulación resuelve las ecuaciones hidráulicas y determina las variables de estado, que corresponden a los valores de las alturas de presión nodales  $H$ . El conjunto de ecuaciones hidráulicas se resuelve implícitamente y se pueden evaluar las otras restricciones que contienen las variables de estado. Toda esta información se traslada al optimizador y de otra parte las variables de decisión  $R$  se modifican para encontrar una solución de menor costo, continuando con el proceso hasta que se cumpla un criterio de finalización.

Cuando el simulador está relacionado a un optimizador y suponiendo que  $H$  puede determinarse para todos los  $R$ , el problema de optimización se transforma en el problema reducido:

Objetivo:  $\text{minimizar costo} = f(H, (R), R) = F(R)$

Sujeto a:

$H \leq H(R) < \bar{H}$  Límites de altura de presión nodal.

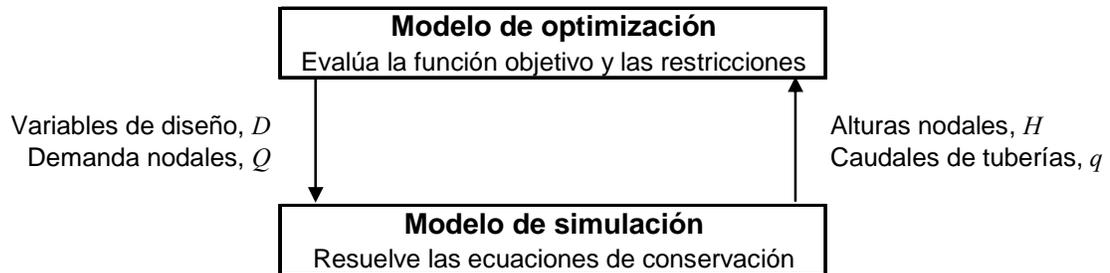
$u \leq u(R) \leq \bar{u}$  Límites relacionados con los parámetros de diseño/operación.

$w \leq w(H(R), R) \leq \bar{w}$  Límites relacionados con los parámetros de diseño y alturas de presión.

Hasta este momento, el problema se reduce porque la ecuación de conservación de masa y energía la resuelve el simulador. Los medios para optimizar  $R$ , los resuelve el optimizador. Los métodos de búsqueda directa utilizan la información de unos pocos puntos para determinar el próximo  $R$ . Los valores de la función objetivo, pueden determinarse de una manera más eficiente, con respecto a los cambios en las variables de diseño, mediante el uso de las ecuaciones del gradiente reducido para proporcionar información y definir una dirección de búsqueda.

<sup>16</sup> MAYS, Larry W. Manual de Sistemas de Distribución de Agua. Ed. McGrawHill. 2000.

**Figura 3-5. Modelo de enlace optimización-simulación para metodología de programación no lineal.**



El alteración de la función está gobernada por una de la varias posibles técnicas de optimización (por ejemplo, métodos tipo Newton, gradientes conjugados). Adicionalmente, permanecen las dificultades para manejar los límites que contengan las variables de estado. Normalmente están incluidas en la función objetivo en forma de una función de penalización como un término de Lagrange aumentado. Las violaciones a estos límites se multiplican por un factor e incrementan el costo de la solución. Los gradientes del objetivo con el término de la penalización se utilizan para cambiar  $R$ , y los límites se consideran directamente cuando se determinan los cambios en los parámetros de diseño.

Debido a que para esta formulación se utiliza un simulador de redes, se puede considerar en este tipo de modelo cualquier decisión que pueda formularse como variable continua en términos de costo. Tampoco se encuentra limitado el número de condiciones de demanda a evaluar, con excepción del incremento de los esfuerzos de cálculo. Es así, como pueden considerarse múltiples demandas para las condiciones de las redes contraincendio, ó, una secuencia de demandas que describan operaciones diarias de las redes de suministro.

### 3.6.9 Técnicas estocásticas de búsqueda.<sup>17</sup>

Para resolver el tema del dimensionamiento de tuberías, se ha empleado la simulación evolutiva, los algoritmos genéticos y el "simulated annealing". Los algoritmos genéticos fueron propuestos por Holland (1975) y luego desarrollados por Goldberg (1989) y otros.

En general, cuando se busca una solución optimizada con un algoritmo de búsqueda estocástico o aleatorio, la función objetivo se evalúa para un conjunto de soluciones  $R$ . Basándose únicamente en la función objetivo de las soluciones previas se generan nuevos vectores de decisión, cuyo proceso de generación varía de acuerdo con la aproximación, pero siempre conteniendo un elemento aleatorio. Los vectores de la nueva solución se evalúan y se genera otro conjunto

<sup>17</sup> MAYS, Larry W. Manual de Sistemas de Distribución de Agua. Ed. McGrawHill. 2000.

de soluciones usando esta información. Este proceso de generación y evaluación de soluciones continúa hasta que se alcanza el criterio de finalización.

Los problemas de optimización no restringida pueden ser resueltos por técnicas de investigación estocástica, es decir, sin límites que contengan variables de control  $H$ . Los diámetros de las tuberías se seleccionan dentro de rangos aceptables. En las etapas de evaluación de problema de diseño de la red se deben calcular las relaciones hidráulicas y los límites restantes, ejecutándolo en un analizador de redes. Si una solución no satisface las ecuaciones de conservación de masa y energía y de restricciones relacionadas con los límites de parámetros de diseño/operación, a la función objetivo puede asignársele un valor mayor de forma que la búsqueda no continúe sobre este punto, o las violaciones de los límites puedan ser incluidas en un término de penalización en la función objetivo (Savic y Walters, 1997).

Como durante el proceso de búsqueda se examinan muchas soluciones, esta técnica proporciona una solución óptima y un número de soluciones cercanas a la óptima. Un término de penalización tiene la ventaja de permitir soluciones poco viables a mantener durante el proceso de búsqueda. Es acá, donde el diseñador debe tomar la decisión de juzgar el costo de no satisfacer los límites al comparar el costo de las soluciones inviables con las viables, casi óptimas.

La búsqueda por métodos estocásticos solo utiliza valores de la función objetivo para dirigirse a unas mejores soluciones comparando la programación lineal y la programación no lineal, cuando se use la información del gradiente. Como estos métodos solo dependen de las evaluaciones de la función objetivo, pueden fácilmente manejar decisiones discretas respecto a la definición del tamaño de la tubería. Adicionalmente, en comparación con la programación no lineal, aunque no se ha demostrado, la experiencia señala que estos métodos tienden a producir soluciones globales óptimas que no pueden garantizarse por los métodos de programación no lineal.

La búsqueda por métodos estocásticos solo utiliza valores de la función objetivo para dirigirse a unas mejores soluciones comparando la programación lineal y la programación no lineal, cuando usen información del gradiente, Como los métodos de búsqueda estocástica solo dependen de las evaluaciones de la función objetivo, pueden fácilmente manejar decisiones discretas respecto a la determinación del tamaño de la tubería. Así, en comparación con la programación no lineal, aunque no se ha demostrado, la experiencia señala que estos métodos tienden a producir soluciones globales óptimas que no pueden garantizarse por los métodos de programación no lineal

Así mismo, es un defecto del método, la ventaja de no requerir gradientes. Como solo se requiere información de la función objetivo, se hace necesario un número

elevado de simulaciones para dirigirse a la solución óptima. Esto requiere de mucho tiempo y limita el tamaño del problema que llegar a resolverse. Esta queja se ha aplicado a la mayoría de las técnicas de optimización.

### **3.6.10 Algoritmos genéticos.** <sup>18</sup>

La mayoría de los modelos de redes reales son grandes o complejos y se manejan por cualquiera de los métodos de optimización anteriormente discutidos sin hacer simplificaciones importantes. Entre las técnicas que prometen avanzar, la de los algoritmos genéticos es la más capaz de satisfacer las necesidades de los ingenieros de diseño, sin necesidad de complicaciones para encajar el problema del algoritmo.

Los algoritmos genéticos tienen una historia relativamente corta pero prometedora. En términos generales, los algoritmos genéticos utilizan un modelo computacional de la evolución darwiniana, de "evolucionar" buenos diseños o soluciones, a problemas muy complejos para los que las técnicas clásicas de solución a menudo basados en la programación lineal o método del gradiente resultan insuficientes. El algoritmo genético, a menudo incorpora ideas tales como una población para la solución a un problema, la supervivencia del más fuerte (más adecuado) soluciones dentro de una población, natalidad, mortalidad, reproducción, herencia del material genético (parámetros de diseño) de los niños, y las mutaciones ocasionales de materiales (por lo tanto facilita nuevas posibilidades de diseño).

Un algoritmo genético desarrollado para la optimización de los sistemas de distribución utiliza:

- Una función objetivo definida en un conjunto de variables de decisión (por ejemplo, el diámetro del tubo).
- Un modelo de calibración del sistema, para simular su comportamiento hidráulico y para garantizar que la continuidad y las ecuaciones de pérdida de carga se cumplen en todo momento (restricción dura)
- Una pena de plazo para sancionar a los niveles insuficientes de servicio (restricción blanda), como las presiones en los nodos, el desequilibrio de los caudales de los reservorios.

Los siguientes son los pasos para correr un algoritmo genético estándar:

1. Generación aleatoria de una población de soluciones inicial.

---

<sup>18</sup> HAESTAD et al. Advance Water Distribution Modeling and Management. Haestad Press. 1<sup>st</sup> ed.



2. Calcular la aptitud de cada solución en la población inicial.
3. Generar una nueva población usando operadores inspirados biológicamente.
4. Calcular la aptitud de las nuevas soluciones.
5. Detenerse si se llegó a la condición de terminación, o repetir los pasos 3 a 5 para generar poblaciones sucesivas.

Los algoritmos genéticos utilizan alfabeto binario para crear los cromosomas. Los parámetros que se están optimizando son codificados usando cadenas binarias. Supone que la longitud de una cadena es de ocho y que la función  $f(x)$  a optimizar es igual al número de unos en el cromosoma. Generalmente los valores para el tamaño de la población están entre 50 y 1000. Luego de que la población inicial ha sido generada, los individuos de la población van a través del proceso de evolución. El valor de la función que se está optimizado para un conjunto determinado de valores (está definido por el cromosoma) de los parámetros se utiliza para evaluar la aptitud.

Hay que tener en cuenta que un algoritmo genético es independiente del problema, lo cual lo hace un algoritmo robusto, por ser útil para cualquier problema, pero a la vez débil, pues no está especializado en ninguno.

Las soluciones codificadas en un cromosoma compiten para ver cuál constituye la mejor solución (aunque no necesariamente la mejor de todas las soluciones posibles). El ambiente constituido por las otras soluciones, ejercerá una presión selectiva sobre la población, de forma que sólo los mejor adaptados (aquellos que resuelvan mejor el problema) sobrevivan o transmitan su material genético a las siguientes generaciones, igual que en la evolución de las especies.

En la naturaleza lo único que hay que optimizar es la supervivencia, y eso significa a su vez maximizar diversos factores y minimizar otros. Un algoritmo genético se usará habitualmente para optimizar sólo una función, no diversas funciones relacionadas entre sí simultáneamente. Este tipo de optimización, denominada optimización multimodal, también se suele abordar con un algoritmo genético especializado.

Por lo tanto, un algoritmo genético consiste en lo siguiente: hallar de qué parámetros depende el problema, codificarlos en un cromosoma, y se aplican los métodos de la evolución: selección y reproducción sexual con intercambio de información y alteraciones que generan diversidad.

### **3.7 DIFICULTADES DE LOS MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN.<sup>19</sup>**

#### **3.7.1 Repercusión de los costos.**

Los datos de costos son con frecuencia, los más presentados en los análisis de diseño. Dependiendo del problema, hay miles de soluciones que difieren en el costo por sólo uno o dos por ciento, sin embargo los costos son solo exactos para +/- 20%. Esto puede parecer un grave error en la optimización, pero este tipo de error no es tan dramático siempre y cuando los costos relativos sean consistentes.

Sin embargo cuando la optimización se emplea para comparar diferentes rutas, las diferencias de costos no son causadas simplemente por el tamaño, sino por factores como el costo de la excavación, la pavimentación, derechos de vía, tal que, la incertidumbre en la comparación de costos puede conducir a soluciones engañosas si los factores no son considerados con precisión. Los efectos del costo del pavimento pueden ser mayores que los efectos de los diámetros y la incertidumbre en estos costos puede conllevar a soluciones óptimas equivocadas.

Es decir, el costo de la instalación de una tubería no es función solo de la longitud y el diámetro. Las funciones de costo (costo vs. diámetro) utilizadas en cualquier optimización deben reflejar el costo actual de la instalación de la tubería. El uso de una simple función de costos puede generar en soluciones óptimas erróneas.

#### **3.7.2 Fiabilidad / Redundancia.**

Sin tener en cuenta los métodos de optimización, la optimización reduce el costo al reducir el diámetro de las tuberías o en caso tal por su total eliminación. Esto tiende a dejar el sistema con apenas la capacidad suficiente para satisfacer las demandas del mismo y sin capacidad para responder a las roturas de las tuberías o las demandas que excedan los valores de diseño, sin dejar de alcanzar el nivel de funcionamiento exigidos. Los métodos generalmente obligan al cierre de bucles mediante la fijación de diámetros mínimos en las tuberías o la evaluación de soluciones que contemplan tubos fuera del servicio.

#### **3.7.3 Incertidumbre en la planificación del sistema.**

La mayor fuente de incertidumbre en la planeación del sistema son las proyecciones de la demanda. En sistemas pequeños, la recesión económica, el cierre de una fábrica, la instalación del sistema de rociadores contraincendios en una escuela, puede hacer incorrectos la mayoría de los planes óptimos. Para grandes sistemas, aunque un evento simple no puede afectar las proyecciones de

---

<sup>19</sup> HAESTAD et al. Advance Water Distribution Modeling and Management. Haestad Press. 1<sup>st</sup> ed.

demanda, todavía existe una gran incertidumbre, por ejemplo con la proyección de la demanda futura.

### **3.7.4 Tamaño de la tubería y el control de demandas.**

Otro factor que dificulta el diseño óptimo es que los métodos de optimización a menudo asumen que el tamaño del tubo no tiene un efecto mensurable sobre la demanda. En realidad, sin embargo, la determinación de la capacidad de la tubería afecta de manera significativa la evolución de la demanda. De hecho, los urbanizadores tienden a desarrollar proyectos en terrenos que se encuentran cerca de los servicios públicos con capacidad para atender el desarrollo planificado.

### **3.7.5 El tratamiento de las bombas y depósitos.**

La presencia de bombas requiere que tanto el diseño y la operación de la red deben ser considerados en la optimización; esto significa que el costo de una solución debe incluir no sólo los costos de capital, expresado en valor presente equivalente. El método desarrollado por Savic, et al. en 2000, permite la selección óptima de las bombas para su instalación en nuevas o mejoradas estaciones de bombeo.

La disposición de un servicio de almacenamiento o ampliación del existente, requiere de la simulación de llenado y vaciado de los depósitos a través de los ciclos de demanda diarios (o más), además del análisis del pico instantáneo y los flujos de emergencia. La simulación completa de la respuesta del sistema a las variaciones de la demanda durante un día, es demasiado exigente para su uso en un programa de diseño óptimo que requiera de la evaluación de un gran número de diseños. Por lo tanto, sólo un pequeño número de períodos de referencia en el día pueden ser considerados para la evaluación del rendimiento del sistema durante la optimización, con un total de 24 horas de simulación para comprobar la viabilidad del proyecto final. El uso de una muestra espacial de la distribución de la demanda en lugar de una simulación completa de 24 horas, requiere una técnica de aproximación que se utilizará para garantizar la coherencia entre los volúmenes de almacenamiento, niveles de los embalses, y las entradas y salidas de los depósitos.

Además de introducir nuevas variables (que aumentan las dimensiones del problema), el tratamiento del depósito y el bombeo dentro de la optimización, requiere de un algoritmo para tratar no sólo las variables discretas, sino también una mezcla de variables discretas y continuas. Así se hace difícil encontrar un óptimo global. Los algoritmos genéticos y otras técnicas de búsqueda adaptativa ofrecen una solución potencial al problema.

#### **4. PROGRAMA OPTIMIZACIÓN DE REDES PARCIALES SUCESIVAS.<sup>20</sup>**

El programa para Optimización de Redes Parciales Sucesivas es un programa de computador que permita al usuario calcular y ver los diferentes resultados hidráulicos de una red abierta óptima, aquella capaz de satisfacer las necesidades de agua y presión establecidas y cuyo costo es mínimo. Para la determinación de las pérdidas de energía se han realizado diferentes procedimientos de cálculo y la determinación de los caudales a transportar por cada tramo de la red se realiza por el método de la simultaneidad de caudales, en el cual el gasto a suplir debe definirse de acuerdo a la demanda. El análisis se enmarca bajo en el método de redes parciales sucesivas, con el fin de buscar la red que proporcione los requerimientos de suministro mínimo requerido, tales como, presión y caudal en cada nodo de la red.

El método de las redes parciales sucesivas se fundamenta en un método de programación lineal, que mediante un proceso iterativo que se desarrolla de cabeza a cola de una red abierta (sin ningún anillo de suministro), debe mejorar en cada iteración la presión total o parcialmente de todos los puntos de toma aguas abajo de la red que se hallen con presión deficiente bajo la premisa del menor costo de instalación y tubería.

El fundamento teórico del programa se desarrolla teniendo en cuenta los postulados de la hidráulica a presión, la programación lineal y la programación por objetos bajo el lenguaje de programación Visual Basic para Aplicaciones de Microsoft.

El programa es una herramienta que permite evaluar diferentes alternativas de diseño para una red abierta en forma ágil y totalmente confiable, asegurando que su costo es mínimo. Adicionalmente, las redes obtenidas se pueden observar directamente en AutoCAD por medio de una interfaz gráfica del programa que permite visualizar la red en planta con las longitudes y diámetros obtenidos en forma de texto sobre cada tramo analizado, complementado con la opción de poder dibujar los perfiles de: terreno, línea de presión calculada y línea de presión específica solicitada, mediante líneas que unen los nodos.

El programa se utiliza en este trabajo como apoyo para la verificación de los resultados que se obtengan por EPANET, MATLAB y EPAMAT.

---

<sup>20</sup> CARDONA, Álvaro. RIVEROS, Ernesto. Programa para la Optimización por Costos de Redes Abiertas. Método de Redes Parciales Sucesivas. Escuela Colombiana de Ingeniería.



## 5. EPANET.<sup>21</sup>

EPANET es un software de código abierto desarrollado por LA Rossman distribuido libremente por la Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU. (EPA). Es una herramienta para simulaciones de comportamiento hidráulico y de calidad del agua en tiempo extendido, en redes de distribución a presión. El modelo consta de tuberías, nudos (conexiones entre tuberías), bombas, válvulas y tanques de almacenamiento o depósitos.

El software determina el caudal que circula por cada una de las conducciones, la presión en cada uno de los nudos, el nivel de agua en cada tanque y la concentración de diferentes componentes químicos a través de la red durante un determinado periodo de simulación para diferentes intervalos de tiempo. Además del conocimiento de la concentración de diferentes componentes químicos, es posible determinar el tiempo de permanencia del agua en las tuberías, así como estudios de la procedencia del agua en cada punto de la red.

Puede emplearse bajo sistemas operativos Windows, con un entorno de trabajo integrado para la edición de los datos de entrada de la red, para el cálculo hidráulico y las simulaciones de la calidad del agua, y para poder visualizar los resultados obtenidos en una amplia variedad de formatos. Esta variedad de formatos incluye planos de la red con códigos de colores, tablas de datos, gráficos con evoluciones temporales de diferentes variables, y planos con curvas de isoniveles.

Se consideraron las siguientes características del modelo para su empleo en este trabajo:

- No existe límite en el tamaño de la red que se desea analizar.
- Calcula las pérdidas por fricción en las conducciones mediante las expresiones de Darcy-Weisbach, Hazen-Williams o Chézy-Manning.
- Incluye pérdidas menores en elementos tales como codos, acoplamientos, etc.
- Modela bombas funcionando tanto a velocidad de giro constante como a velocidades de giro variables.
- Modela diferentes tipos de válvulas, incluyendo válvulas de regulación, válvulas de retención, válvulas de aislamiento, válvulas reductoras de presión, válvulas de control de caudal, etc.

---

<sup>21</sup> EPANET 2.0 en Español. Manual del Usuario. I.I.A.M.A. Grupo REDHISP.



- Permite el almacenamiento de agua en tanques que presenten cualquier geometría (por ejemplo que la sección del tanque sea variable con la altura del mismo).
- Considera la posibilidad de establecer diferentes categorías de consumo en los nudos, cada una de ellas con su propia curva de modulación.
- Modela consumos dependientes de la presión que salen al exterior del sistema a través de emisores (rociadores, aspersores).

El modelo se utiliza en este trabajo, con el fin de determinar la altura de bombeo que requiere suministrarse a la red de distribución de agua de un sistema contra incendio y poder verificar las restricciones que se tienen definidas para los diámetros previamente calculados, es decir, se termina por optimizar la red de acuerdo con las limitaciones en velocidad, las exigencias en demandas de caudal y cabezas de presión.



## 6. MATLAB.<sup>22</sup>

MATLAB (abreviatura de MATrix LABoratory, "laboratorio de matrices") es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows y Apple Mac OS X.

Sus utilidades básicas son: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, a saber, Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las cajas de herramientas (toolboxes); y las de Simulink con los paquetes de bloques (blocksets).

Fue creado por Cleve Moler en 1984, surgiendo la primera versión con la idea de emplear paquetes de subrutinas escritas en Fortran en los cursos de álgebra lineal y análisis numérico, sin necesidad de escribir programas en dicho lenguaje. El lenguaje de programación M fue creado en 1970 para proporcionar un sencillo acceso al software de matrices LINPACK y EISPACK sin tener que usar Fortran.

MATLAB es un programa de cálculo numérico orientado a matrices. Por tanto, es más eficiente si se diseñan los algoritmos en términos de matrices y vectores. En el siguiente numeral se justifica el uso del MATLAB.

El MATLAB se emplea en este trabajo de grado como una herramienta para el desarrollo de un código que permite la estimación de la altura de bombeo del sistema contraincendio calculado en el capítulo anterior, con ajuste de los diámetros de diseño a los diámetros comerciales disponibles en el mercado para el material seleccionado de la red de distribución. También se utiliza para la generación de funciones en la solución de ecuaciones y en la optimización, aplicados al ejercicio modelado en EPANET, es decir, que genera funciones en el archivo EPANET y las reprograma para optimizar la función objetivo mediante las funciones del `toolbox` denominadas `fsolve`, `fmincon`, `ga`, y `optimset`.

`fsolve` resuelve sistemas de ecuaciones no lineales de varias variables de la forma:  $\mathbf{F}(\mathbf{X})=0$ , donde  $\mathbf{F}$  y  $\mathbf{X}$  pueden ser vectores o matrices.

---

<sup>22</sup> MATLAB R2008b. The MathlabWorks™.

**`X=fsolve(fun,X0)`** se inicia en el **`X0`** de la matriz y trata de resolver la o las ecuaciones de la función **`fun`**; acepta la entrada de **`x`** y devuelve un vector (matriz) de los valores de la ecuación **`F`** evaluada en **`x`**. A su vez, encuentra una raíz (cero) de un sistema de ecuaciones no lineales, para lo cual, se requiere hacer un código en un archivo **`.m`** que describa los parámetros, las funciones y las variables involucradas, donde, se debe suministrar una rutina para evaluar el vector de la función.

**`fmincon`** encuentra un mínimo obligado de una función de varias variables que intenta resolver los problemas de la forma:

$$\begin{array}{lll} \min F(X) \text{ sujeto a:} & A * X \leq b, Aeq * X = beq & \text{(restricción lineal)} \\ X & C(X) \leq 0, Ceq(X) = 0 & \text{(restricciones no lineales)} \\ & LB \leq X \leq UB & \text{(límites)} \end{array}$$

**`X=fmincon(fun,X0,A,b)`** se inicia en **`X0`** y encuentra un mínimo **`x`** de la función **`fun`**, sujeto a las desigualdades lineales **`A*X<=B`**. **`fun`** acepta como entrada **`x`** y devuelve un valor escalar de la función **`F`** evaluada en **`X0`**. **`x`** puede ser un escalar, vector o matriz.

**`X=fmincon(fun,X0,A,b,Aeq,beq,LB,UB,NONLCON,options)`** minimiza con los parámetros de optimización por defecto reemplazando por los valores de la estructura **`options`**, un argumento creado con la función **`optimset`**.

**`ga`** es un método de optimización restringida mediante algoritmos genéticos que intenta resolver los problemas de la forma:

$$\begin{array}{lll} \min F(X) \text{ sujeta a:} & A * X \leq b, Aeq * x = beq & \text{(restricciones lineales)} \\ X & C(X) \leq 0, Ceq(X) = 0 & \text{(restric. no lineales)} \\ & LB \leq X \leq UB & \text{(límites)} \end{array}$$

**`x=ga(fitnessfcn,nvars,A,b,Aeq,beq,LB,UB,nonlcon,options)`**

minimiza con los parámetros reemplazados de optimización por valores de la estructura de opciones, que se pueden crear utilizando la función **`gaoptimset`**.

**`x=ga(problem)`** encuentra el mínimo de problemas, donde el problema es una estructura que contiene los siguientes campos:



<b>fitnessfcn</b>	Función Fitness
<b>nvars</b>	Número de variables de diseño
<b>Aineq</b>	Una matriz de restricciones de desigualdad lineales
<b>Bineq</b>	b vector de restricciones de desigualdad lineales
<b>Aeq</b>	Una matriz de restricciones de igualdad lineal
<b>Beq</b>	b vector de restricciones de igualdad lineal
<b>lb</b>	Límite inferior de x
<b>Ub</b>	Límite superior de x
<b>nonlcon</b>	función de restricción no lineal
<b>randstate</b>	Campo opcional para restablecer el estado rand
<b>randnstate</b>	Campo opcional para restablecer el estado randn
<b>solver</b>	'ga'
<b>options</b>	Estructura de opciones creado con gaoptimset

```
options=optimset('Display','iter','TolFun',1,'TolX',1)
```

**optimset** crea o edita la estructura de las opciones de optimización que puede pasar como argumento de entrada a las siguientes cuatro funciones de optimización de MATLAB: **fminbnd**, **fminsearch**, **fzero**, **lsqnonneg**.

**Display**: crea opciones de llamada en la que se establece el parámetro de pantalla como **'iter'** y el parámetro se establece en **TolFun 1**.

**TolFun**: es la terminación de la tolerancia en el valor de la función.

**TolX**: es la terminación de la tolerancia en **x**.



## 6.1 EPAMAT (EPANET & MATLAB)<sup>23</sup>

El consultor inglés, PhD. en ingeniería de la Universidad de Exeter, Philip Jonkergouw desarrolló algunos códigos en el año 2007, sobre el uso de MATLAB para llamar a EPANET y facilitar algunas formas de simulación. En la Universidad de Chipre, Demetrios G. Eliades en el año 2009, mejoró y modificó los códigos originalmente desarrollados por Jonkergouw.

EPAMAT es un conjunto de códigos ejecutados desde MATLAB, los cuales generan funciones típicas de EPANET y se reprograman para optimizar la función requerida.

Muchos de estos códigos son programados por separado, pero se pueden unir en una sola función para ejecutar todo un procedimiento, transformando los códigos en un algoritmo. Por esta razón, se considera que los códigos de EPAMAT son de gran utilidad para dar cumplimiento al objetivo de este trabajo, porque se prestan como una herramienta poderosa para la optimización de las redes simuladas en EPANET.

La manera de utilizar EPANET con MATLAB, es descargar este conjunto de códigos de MATLAB en una carpeta nueva, con los archivos epanet2.dll y epanet2.h, y la configuración de MATLAB para trabajar dentro de esa carpeta.

Inicialmente, debe exportarse el archivo.net para convertirlo en archivo .inp. Los siguientes son los códigos desarrollados en MATLAB para poder interactuar con EPANET. Ver Anexo A - 1 hasta A - 15.

- **epanetloadfile.m**: carga la biblioteca dll y el archivo de la red del inp que es el archivo plano base del EPANET, mediante `wdsfile='archivo'.inp`.

Sintaxis: `[errorcode] = epanetloadfile(wdsfile)`

Entradas: `wdsfile` – nombre del archivo INP.

Salidas: `errorcode` – código de error de acuerdo con EPANET.

Ejemplo: `[errorcode]=epanetloadfile('Net1.inp')`

- **getdata.m**: obtiene de EPANET, los coeficientes de ciertos parámetros de la red (en este trabajo no se utilizan los parámetros de calidad del agua).

Sintaxis: `[x, t] = getdata (code, id)`

---

<sup>23</sup> The MathlabWorks™. Matlab Central.



**Entradas:** `code` - código de acuerdo con las especificaciones de EPANET.

`id` - identificador del elemento a ajustar.

**Salidas:** `x` - resultado de series temporales.

`t` - paso de tiempo.

**Ejemplo:** `x = getdata ('EN_PATCOUNT');`

devuelve el número de patrones

`[x, t] = getdata ('EN_DEMAND');`

devuelve las demandas de cada paso de tiempo y el paso de tiempo.

- **setdata.m:** establece los coeficientes de ciertos parámetros en la red.

**Sintaxis:** `[errorcode] = setdata (code, value, id)`

**Entradas:** `code` -el código de acuerdo a las especificaciones EPANET.

`value` -el valor que se establece.

`id` -el identificador del elemento a ajustar.

**Salidas:** `errorcode` - código de error de acuerdo con EPANET.

**Ejemplo:** `[errorcode] = setdata ('EN_KBULK', -0,5)`

establece la tasa reacción a granel con -0,5.

`[errorcode]=setdata('SET_PATTERN', [1,1.1,1.2,1.3], 2);`

patrón establecido con `id = 2, [1,1.1,1.2,1.3]`

- **getenconstant.m:** devuelve el código de EPANET para una cadena dada (matriz de caracteres); los valores los copia directamente desde el código fuente EPANET.



Argumentos:

- `en_constant (char)`: matriz de caracteres para los cuales se requiere el código de EPANET, por ejemplo `'EN_PRESSURE'`.

Devuelve:

- `valor (int)`: código de EPANET por ejemplo 11 para `'EN_PRESSURE'`; devuelve -1 si la cadena de entrada no fue encontrada.

- **`epanetclose.m`**: cierra la biblioteca dll.

Sintaxis: `[errorcode] = epanetclose ()`

Entradas: ninguno

Salidas: `errorcode` - código de error de acuerdo con EPANET.

Las siguientes son las variables utilizadas y su sintaxis en códigos para EPAMAT:

Elevación:	<code>'EN_ELEVATION'</code>
Demanda base:	<code>'EN_BASEDEMAND'</code>
Demanda:	<code>'EN_DEMAND'</code>
Cabeza:	<code>'EN_HEAD'</code>
Presión:	<code>'EN_PRESSURE'</code>
Diámetro:	<code>'EN_DIAMETER'</code>
Longitud:	<code>'EN_LENGTH'</code>
Rugosidad:	<code>'EN_ROUGHNESS'</code>
Pérdidas menores:	<code>'EN_MINORLOSS'</code>
Caudal:	<code>'EN_FLOW'</code>
Velocidad:	<code>'EN_VELOCITY'</code>
Número de nodos:	<code>'EN_NODECOUNT'</code>
Número de tramos:	<code>'EN_LINKCOUNT'</code>



## 7. EJEMPLO BÁSICO DE OPTIMIZACIÓN.

Para la aplicación de los algoritmos descritos en el capítulo anterior, se ha escogido como ejemplo un problema de diseño de tuberías en serie<sup>24</sup>, donde las variables conocidas son las rugosidades absolutas, los coeficientes de pérdidas menores, la densidad y viscosidad del fluido, el caudal de suministro al final de la serie, los caudales demandados al final de cada tramo y las longitudes de cada uno de ellos. Las incógnitas son los diámetros para el sistema.

El diseño debe realizarse según el criterio económico, que depende de los coeficientes de pérdidas menores y en mayor grado de las pérdidas por fricción; lo anterior, con el fin de garantizar un correcto funcionamiento hidráulico y una optimización en los costos.

Debido a su similitud con las redes contraincendio, por ser redes abiertas, el planteamiento del problema se realiza en una de las tuberías principales de un sistema de riego localizado de alta frecuencia, que debe conectar la estación de fertirrigación con sus módulos de riego que operan en forma simultánea. En primer lugar el modelo se realiza en EPANET.

Paso seguido, se elaboraron los códigos en MATLAB, definiendo las funciones para minimizar costos  $ct=CostosTub(x)$ , la función que establece los diámetros mínimos y diámetros máximos  $[c,ceq]=restr53(D)$  y la función de cálculo de la presión en el nudo final  $HT=sald53EPA(D)$ .

Se ejecutó el cálculo con las siguientes variaciones, obteniendo una minimización en los diámetros para las dos últimas opciones, las cuales coincidieron:

- Sin definición de tolerancias.
- Con menos tolerancias.
- Con menos tolerancias más búsqueda exhaustiva.

Es de resaltar, que siendo un problema simple, cada corrida dura un poco más de 50 min. Las siguientes son las especificaciones del equipo de trabajo: 160 GB HDD, 1.73 GHz, 0.99 GB de RAM.

A continuación, se presentan los códigos elaborados.

<sup>24</sup> SALDARRIAGA, Juan G. Hidráulica de Tuberías. Ed. McGrawHill. 1998. Pág. 212. Ej. 5.3.



- **Ajuste de los diámetros – función.**

**[c,ceq]=restr53(D)**

```
%ajuste de los diametros

function [c,ceq]=restr53(D)
c=[];
ceq(1)=sald53EPA(D);
epanetclose();
```

- **Cálculo de la altura requerida de la bomba – función.**

**HT=sald53EPA(D)**

```
%calculo de la altura requerida de la bomba

function HT=sald53EPA(D)
wdsfile='sald53.inp';
epanetloadfile(wdsfile);

setdata('EN_DIAMETER',D);

z=getdata('EN_ELEVATION');
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% RESOVER LA HIDRAULICA
Hfm = getdata('EN_HEAD');
HT=z(4)-sum(Hfm);
%epanetclose();
```

- **Cálculo del costo de la tubería para toda la red – función.**

**ct=CostosTub(x)**

```
%calculo del costo de la tubería para toda la red

function ct=CostosTub(x)
%datos del problema
L=[350 123 174];
x = x/1000;
y = 10333 * x .^ 3 - 2270.8 * x .^ 2 + 777.56 * x - 7.5238;
ct=sum((y.*L)');
```

- **Minimización sin definición de tolerancias, Algoritmo Genético.**

```
%----- BEGIN CODE -----
diam=[101.6, 101.6, 101.6];
HT=sald53EPA(diam)

diam=[254, 203.2, 203.2];
HT=sald53EPA(diam)

[c,ceq]=restr53(diam);
ct=CostosTub(diam);
```



```
dmin=[203.2, 152.4, 152.4];dmax=[254, 203.2, 203.2];
HT=sald53EPA(dmin)
ct=CostosTub(dmin)
HT=sald53EPA(dmax)
ct=CostosTub(dmax)
options = optimset('Display','iter');
[dga,ctga]=ga(@CostosTub,3,[],[],[],[],dmin,dmax,@restr53,options)
```

- **Minimización con menos tolerancias, Algoritmo Genético.**

```
%----- BEGIN CODE -----

diam=[101.6, 101.6, 101.6];
HT=sald53EPA(diam)

diam=[254, 203.2, 203.2];
HT=sald53EPA(diam)

[c,ceq]=restr53(diam);
ct=CostosTub(diam);
dmin=[203.2, 152.4, 152.4];dmax=[254, 203.2, 203.2];
HT=sald53EPA(dmin)
ct=CostosTub(dmin)
HT=sald53EPA(dmax)
ct=CostosTub(dmax)

options = optimset('Display','iter','TolFun',1,'TolX',1);
[dga,ctga]=ga(@CostosTub,3,[],[],[],[],dmin,dmax,@restr53,options)
```

- **Minimización con menos tolerancias más búsqueda exhaustiva, Algoritmo Genético.**

```
%----- BEGIN CODE -----

diam=[101.6, 101.6, 101.6];
HT=sald53EPA(diam);

diam=[254, 203.2, 203.2];
HT=sald53EPA(diam);
%[dd,ht]=fsolve(@sald53EPA,diam);

% Diámetros comerciales
diamcom=[101.6,152.4,203.2,254,304.8,355.6];
nc=5;

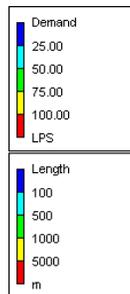
di=[diamcom(1),diamcom(1),diamcom(1)];
[c,ceq]=restr53(diam);
ct=CostosTub(diam);
dmin=[203.2, 152.4, 152.4];dmax=[254, 203.2, 203.2];
HT=sald53EPA(dmin)
```

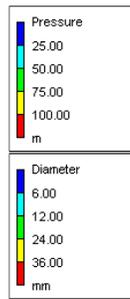


```
ct=CostosTub(dmin)
HT=sald53EPA(dmax)
ct=CostosTub(dmax)
%options = optimset('Display','iter','TolFun',1,'TolX',1);
%[dga,ctga]=ga(@CostosTub,3,[],[],[],[],dmin,dmax,@restr53,options)
diam=[254, 203.2, 203.2];

dopt=di;
ctopt=CostosTub(dmax);
for i=1:nc
    for j=1:nc
        for k=1:nc
            diam=[diamcom(i),diamcom(j),diamcom(k)];
            HT=sald53EPA(diam);
            if HT>0
                ct=CostosTub(diam);
                if ct<ctopt
                    dopt=diam
                    ctopt=ct
                end
            end
        end
    end
end
dopt
ctopt
HT=sald53EPA(dopt)
```

- **Esquemas resultado de EPANET.**





Los diámetros mínimos obtenidos por medio de EPAMAT son:  
 $\varnothing_1 = 10''$ ,  $\varnothing_1 = 8''$   $\varnothing_1 = 6''$ , con un costo de \$76.520, logrando reducir los diámetros calculados por EPANET.



## 8. REDES CONTRA INCENDIO.

Un sistema de distribución de agua debe proveer un suministro seguro de agua potable en cantidad suficiente y a una presión adecuada para usos domésticos, industriales y de protección contra incendios. Los requisitos de presión para combatir incendios dependen de las técnicas y los equipos empleados. Se mencionan a continuación cuatro métodos para combatir incendios:

- Uso de carros bombero que toman agua de un hidrante, con una presión requerida de 137,9 kPa (20 psi) en el área inmediata al incendio.
- Mantenimiento de una presión adecuada en todo momento en el sistema de distribución para poder conectar directamente las mangueras en los hidrantes. En comunidades pequeñas sin camiones bombero, con una presión requerida de 344,7-517,1 kPa (50-75 psi).
- Uso de bombas estacionarias contra incendios en diversos puntos en el sistema de distribución para aumentar la presión durante un incendio y permitir la conexión directa de las mangueras con los hidrantes. No es muy seguro y por lo mismo no es muy empleado.
- Uso de un sistema separado, de distribución a alta presión, sólo para incendios. Al presentarse un sistema doble de distribución es muy costoso. Suele utilizarse en áreas comerciales.

Los sistemas de distribución se suelen instalar en un sistema de emparrillado, con conexiones transversales a diversos intervalos. Deben evitarse los tubos muertos porque ocasionan problemas con la calidad del agua.

Para redes contra incendios las velocidades son altas. Pueden utilizarse tubos de 4" y 6" de diámetro, dependiendo de la zona, residencial o comercial.

Es necesario suministrar agua a los bomberos en cantidades suficientes y adecuadas para combatir incendios. Si es necesario deben tenerse facilidades para almacenaje y/o bombeo; para tal fin, puede utilizarse un tanque elevado, cuyo suministro puede aumentarse mediante una bomba contra incendios. La presión debe ser por lo menos de 103,4 kPa (15 psi) en el nivel más alto de los rociadores, con un flujo base de por lo menos 15,8-31,5 l/s (250-500 gpm), dependiendo del riesgo de la zona.

El medio usual de aplicar agua manualmente a los incendios en el interior de los edificios, es utilizar mangueras que reciben el agua de los tubos verticales. Estos se requieren en pisos de más de 15 m de altura y deben localizarse de manera que



ninguna parte del piso esté a más de 30-40 m de la válvula de salida del tubo vertical. Las bajantes hasta de 23 m de altura pueden ser de 4" y de 6" para alturas mayores. En general, las válvulas de las mangueras son de 2 ½" de diámetro.

Los rociadores son muy eficaces para evitar que se propague el fuego en edificaciones y constan esencialmente de tubos horizontales paralelos, instalados cerca los techos. El agua que se mantiene bajo presión se descarga de las tuberías a través de los rociadores que están ajustados para abrirse cuando la temperatura del aire sube rápidamente o llega a un nivel específico, generalmente de 57°C-70°C

El objetivo del análisis hidráulico de un sistema de distribución de agua contraincendio, es verificar si las demandas de presión y caudal pueden cumplirse a partir de los equipos de bombeo contraincendio existentes o propuestos y la red de distribución existente.

Para la simulación de redes de redes contraincendio, se debe contar con un plano claramente definido, especificar las cotas de cada uno de los aparatos a servir y la presión de servicio mínima requerida en cada aparato.

Uno de los aspectos a tener muy en cuenta por el diseñador es la selección de diámetros posibles a emplear para el diseño de redes de distribución contraincendio, al igual que el costo de suministro e instalación de las mismas.

Se debe tener en cuenta que la definición de los caudales requeridos, depende del área y tipo de riesgo indicados en la normatividad correspondiente. La red de agua deberá tener varias tomas para incendios que aseguren de forma inmediata y continua el caudal de agua requerido durante una hora, una hora y media o tres horas según el tipo de almacenamiento y clase de producto almacenado. Igualmente se especifican unas presiones mínimas de funcionamiento de la red.

Teniendo en cuenta el cumplimiento de lo anterior, una vez sean calculadas las máximas demandas de agua contraincendio para cada bloque de incendio se comienza el análisis hidráulico del sistema completo de abastecimiento de agua contraincendio teniendo en cuenta caudales y presiones. Para la determinación de la presión mínima residual para cada bloque de incendio se puede considerar que las presiones operativas serán las indicadas por el método de aplicación del agua contraincendio, que ha sido definido en una etapa anterior al análisis. Los monitores e hidrantes requieren unas presiones de operación del orden de 799,8 a 999,7 kPa (116 a 145 psi). Los sistemas de difusores de agua están usualmente proyectados para una presión de entrada a la válvula de 689,5 kPa (100 psi), pero puede ser necesaria más presión si están combinados con inyección de espuma. Sistemas especiales de aplicación de espuma, tales como inyección de espuma por debajo de la superficie del líquido o de inundación total sobre la superficie del líquido para protección de tanques de almacenamiento pueden requerir presiones de operación de 799,8 a 1206,6 kPa (116 a 175 psi).

Para el diseño de las instalaciones de agua contra incendios se puede tener en cuenta algunos detalles importantes como son la elección de tubería según material y tamaño.

Para el cálculo hidráulico y optimización de los sistemas contra incendio, se recrea la trayectoria del agua dentro de la red contra incendio, desde el punto de consumo, llámese los rociadores ubicados en la "zona de operación remota", las mangueras contra incendios o gabinetes, los hidrantes, etc., hasta llegar al equipo de bombeo contra incendios.

Después de llevar a cabo la "corrida" del cálculo hidráulico, mediante el modelo EPANET, el modelo de Redes Parciales Sucesivas y el código desarrollado en MATLAB se concluye si el diseño preliminar satisface los requerimientos generados por el nivel de riesgo definido en la normatividad NFPA.

Cuando el resultado del cálculo no es el esperado, se regresa a corregir el diseño y se inicia de nuevo el procedimiento. Esto, para los modelos EPANET y RPS, no para el caso de EPAMAT, pues en el código se ajustan los diámetros suministrados a los diámetros comerciales disponibles y mediante la función *fsolve* se garantiza que se tiene la solución única para determinar la altura de la bomba que se requiere.

### 8.1.1 Ejemplo de red contra incendio.

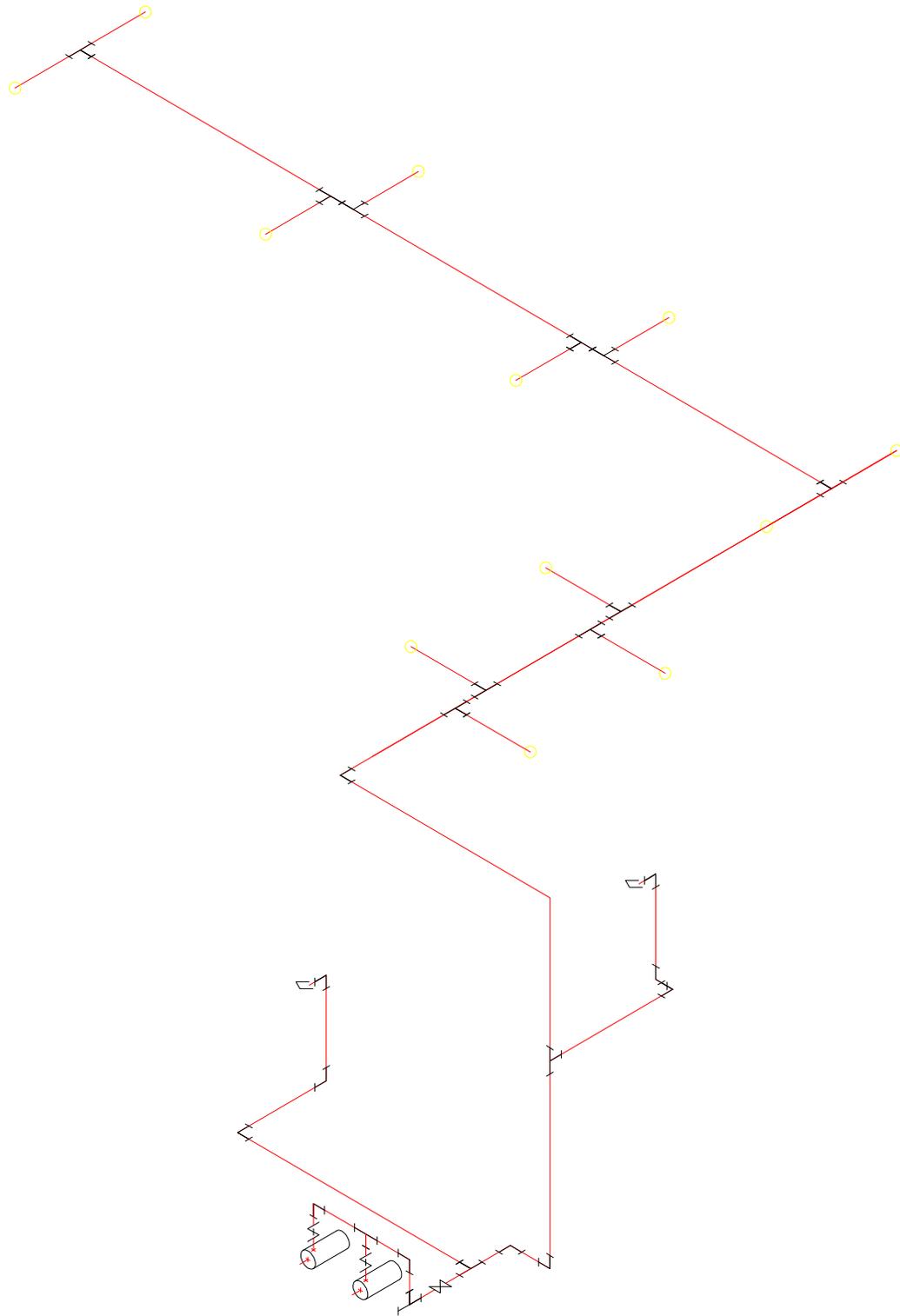
Red para edificación con dos gabinetes y doce rociadores, en la que se asume para el evento crítico, que funcionarán todos los puntos.

De acuerdo con los parámetros de diseño, calculados siguiendo lo estipulado por la NFPA13, se tiene una presión mínima por rociador de 11,30 m; un caudal por rociador de 0,0142 m<sup>3</sup>/s; un caudal por mangueras de 0,0063 m<sup>3</sup>/s.

Las restricciones de velocidad que se tienen son las siguientes:  $V_{m\acute{a}x} = 2,0 \text{ m/s}$  para diámetros menores o iguales a  $\varnothing 3''$ ,  $V_{m\acute{a}x} = 2,5 \text{ m/s}$  para diámetros mayores a  $\varnothing 3''$  También se modela la red con un valor mayor para la restricción de velocidad máxima  $V_{m\acute{a}x} = 6,1 \text{ m/s}$ , de acuerdo con lo expuesto en capítulos anteriores para el caso de las redes contra incendio.

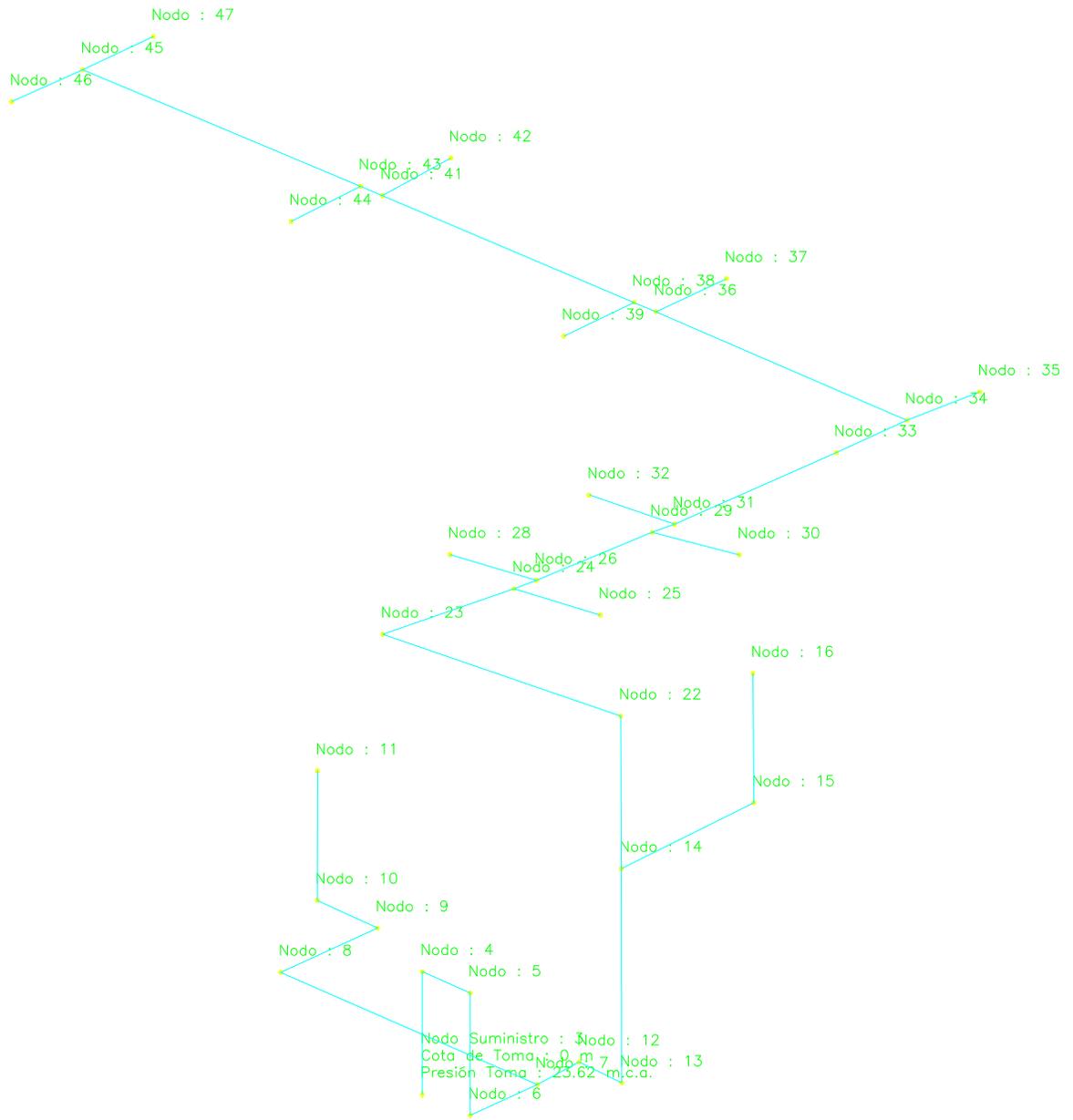
Con los datos conocidos y las restricciones definidas, se calcula la altura de la bomba o de las bombas que requiera el sistema y se definen los diámetros comerciales que deberán utilizarse en cada uno de los tramos de la red.

En la siguiente figura se presenta la configuración física de la red contra incendio (arquitectura) para su modelación los programas de Redes Parciales Sucesivas y EPANET.



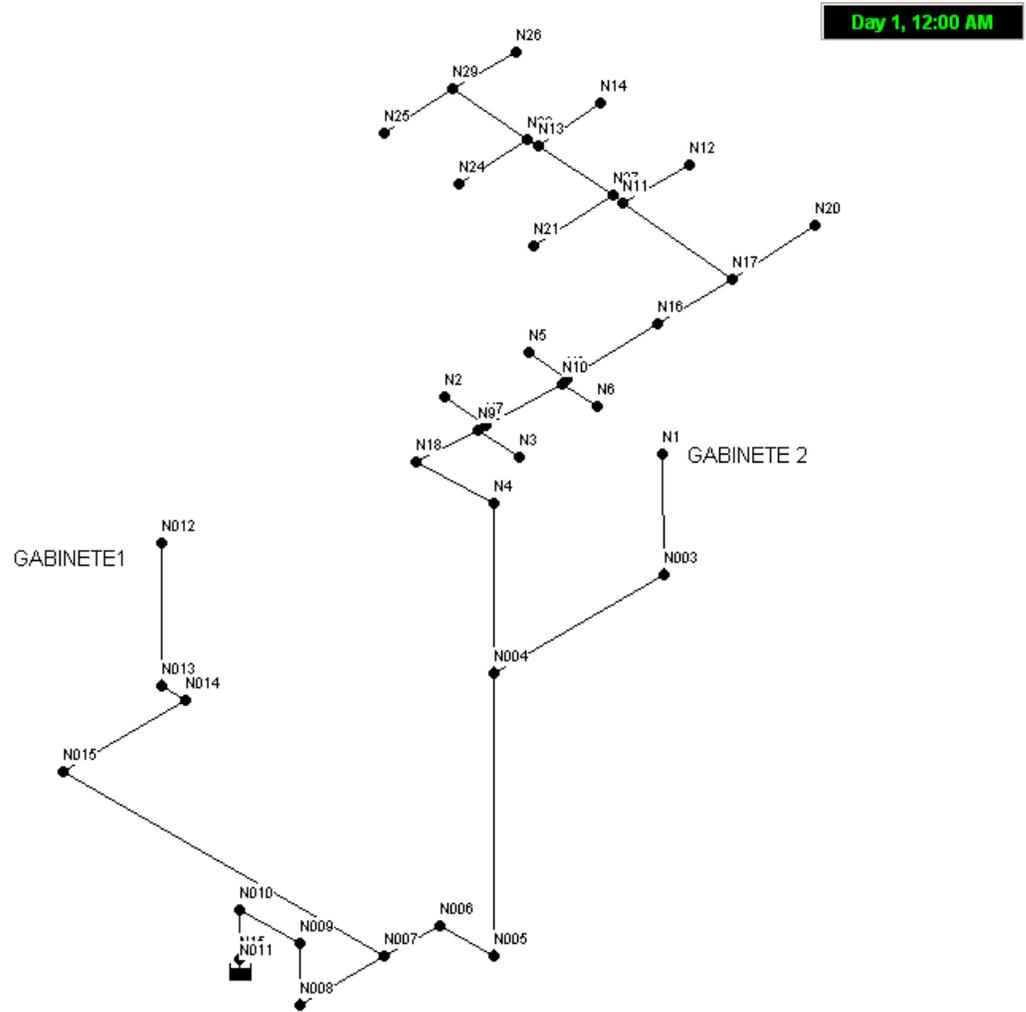


### Modelo de la red en Redes Parciales Sucesivas.





### Modelo de la red en EPANET.





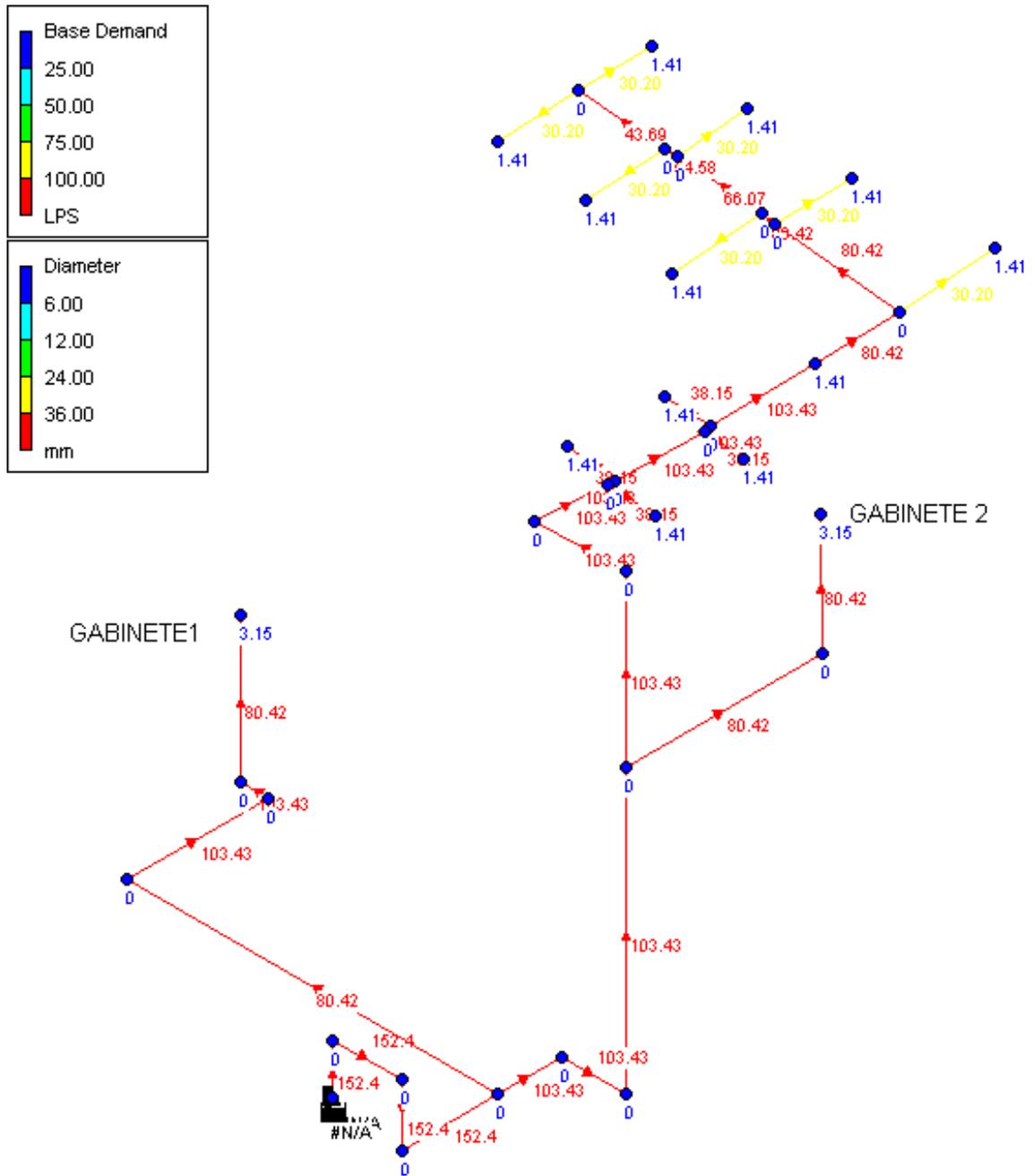
Hoja de cálculo en Excel, sobre el ramal principal.

Para calculo insertar valores en rojo.	Columna en EPANET	Tramo	L	z	Q		φ calculado		φ nom ajustado a com		Vc ajust.	V <sup>2</sup> /2g	NR	f	hf <sub>unit</sub>	Hf <sub>total</sub>	Accesorios	Suma K	Hm = KV <sup>2</sup> /2g	Presion final (m)	
			(m)	(m)	(l/s)	(m <sup>3</sup> /s)	(m)	(")	(")	(m)	(m/s)	(m)			m/m	m			m		
g (m/s <sup>2</sup> ) = 9.81	20	1-2	1.15	0.00	1.41	0.0014	0.030	1 1/6	1 1/4	0.030	1.97	0.20	52140.2	0.0209	0.137	0.157	1C	0.90	0.178	11.63	
V <sub>max1</sub> (m/s) = 2.00	18	2-3	4.43	0.00	2.82	0.0028	0.042	1 2/3	1 1/2	0.044	1.88	0.18	72089.0	0.0195	0.081	0.357	1TL,1R	1.87	0.337	12.33	
V <sub>max2</sub> (m/s) = 2.50	35	3-4	0.35	0.00	4.23	0.0042	0.052	2	2	0.055	1.81	0.17	86560.5	0.0188	0.057	0.020	1TD,1R	0.47	0.078	12.43	
ε (mm) = 0.000046	33	4-5	4.03	0.00	5.64	0.0056	0.060	2 1/3	2 1/2	0.066	1.65	0.14	95339.5	0.0184	0.038	0.155	1TL,1R	1.97	0.272	12.85	
v (m <sup>2</sup> /s) = 1.14E-06	32	5-6	0.35	0.00	7.05	0.0071	0.067	2 2/3	3	0.080	1.39	0.10	97912.8	0.0183	0.022	0.008	1TL,1R	1.87	0.184	13.05	
φ nom (")	φ com (m)	36	6-7	4.03	0.00	8.46	0.0085	0.073	2 8/9	3	0.080	1.67	0.14	117495.4	0.0177	0.031	0.125	1TD	0.30	0.042	13.21
3/4	0.019	30	7-8	1.15	0.00	9.87	0.0099	0.079	3 1/8	3	0.080	1.94	0.19	137077.9	0.0172	0.041	0.047	1TL	1.80	0.346	13.61
1	0.024	27	8-9	2.60	0.00	11.28	0.0113	0.085	3 1/3	4	0.103	1.34	0.09	121826.8	0.0176	0.016	0.041	1TL,1R	1.97	0.181	13.83
1 1/4	0.030	26	9-10	0.35	0.00	12.69	0.0127	0.090	3 1/2	4	0.103	1.51	0.12	137055.1	0.0172	0.019	0.007	1TD	0.30	0.035	13.87
1 1/2	0.044	24	10-11	1.85	0.00	14.1	0.0141	0.095	3 3/4	4	0.103	1.68	0.14	152283.5	0.0168	0.023	0.043	1TD	0.30	0.043	13.96
2	0.055	13,14,23	11-12	0.35	0.00	15.51	0.0155	0.099	4	4	0.103	1.85	0.17	167511.8	0.0165	0.028	0.010	1TD	0.30	0.052	14.02
2 1/2	0.066	2,3,4	12-13	8.00	2.24	16.92	0.0169	0.093	3 2/3	4	0.103	2.01	0.21	182740.2	0.0163	0.033	0.260	1TD,2C	2.10	0.434	16.95
3	0.080	5	13-14	4.55	3.15	20.07	0.0201	0.101	4	4	0.103	2.39	0.29	216760.9	0.0158	0.044	0.202	1TD,2C	2.10	0.611	20.92
4	0.103	6,7,37	14-15	1.09	0.00	23.22	0.0232	0.109	4 2/7	6	0.152	1.27	0.08	170174.9	0.0165	0.009	0.010	1TD,1R	0.56	0.046	20.97
6	0.152	38	15-16	4.37	1.80	23.22	0.0232	0.109	4 2/7	6	0.152	1.27	0.08	170174.9	0.0165	0.009	0.039	2TL,1C,1Reg,1Ch	7.20	0.595	23.41
			16-17	0.10	0.00	23.22	0.0232	0.109	4 2/7	6	0.152	1.27	0.08	170174.9	0.0165	0.009	0.001		0.000	23.41	
															Sum	1.481			3.435	23.41	

Ramal	Condición	Tramo XLS	Tramo EPA	Cantidad	Accesorios			
Principal	Open	13-14	2	1	TSD			
Principal	Open		3	1	Cd			
Principal	Open		4	2	Rdc6	Cd		
Principal	Open	14-15	5	1	TSD			
Principal	Open	15-16	6	1	Cd			
Principal	Open		7	1	Cd			
Principal	Open	12-13	13	1	Cd			
Principal	Open		14	1	Cd			
Principal	Open	7-8	15	1	TSL			
Principal	Open	2-3	18	2	TSL	Rdc1		
Principal	Open	1-2	20	1	Cd			
Principal	Open	12-13	23	1	TSD			
Principal	Open	11-12	24	1	TSD			
Principal	Open	10-11	26	1	TSD			
Principal	Open	9-10	27	1	TSD			
Principal	Open	5-6	32	2	TSD	Rdc4		
Principal	Open	4-5	33	2	TSD	Rdc3		
Principal	Open	3-4	35	2	TSD	Rdc3		
Principal	Open	6-7	36	1	TSD			
Principal	Open	16-17	37					
Principal	Open	15-16	38	5	TSL	TSL	Cd	R
								Ch

Cd = 0.9; codo.  
TSD = 0.3; tee salida directa.  
TSL = 1.8; tee salida lateral.  
Ch = 2.5; válvula cheque.  
R = 0.2; registro.  
Rdc1 = 0.07; reducción de 1" a 1 1/2".  
Rdc2 = 0.17; reducción de 1 1/2" a 2".  
Rdc3 = 0.17; reducción de 2" a 2 1/2".  
Rdc4 = 0.07; reducción de 2 1/2" a 3".  
Rdc5 = 0.17; reducción de 4" a 3".  
Rdc6 = 0.26; reducción de 6" a 4".







## Modelo de la red en MATLAB.

Para la red del Ejemplo 1, inicialmente se desarrolló un código que permite estimar la altura de la bomba y ajustar los diámetros de la red a los comerciales existentes, a partir de la definición del valor de la velocidad máxima permitida en las tuberías. Este cálculo se desarrolla a partir de la red principal.

```
%----- PROYECTO DE GRADO - RICARDO BEJARANO CABALLERO -----
% RED 2: dos gabinetes y doce rociadores, material: acero, eps: 0.046 mm
% V min = 0.8 m/s, V max = 2.0 m/s para Ø<=3" y V max = 2.5 m/s para Ø>3",
% el modelo se realiza para el ramal principal.

%----- BEGIN CODE -----
%Ingrese el nombre del archivo de extension .inp
wdsfile = 'red2prcp.inp';
epanetloadfile(wdsfile);

%Parametros de diseno, define la velocidad maxima 2.0 para d<=3" y 2.5 para d>3"
[L] = getdata('EN_LENGTH');
[Z] = getdata('EN_ELEVATION');
[Q] = getdata('EN_FLOW');
[Ks] = getdata('EN_ROUGHNESS');
km = getdata('EN_MINORLOSS');
nt = getdata('EN_LINKCOUNT');
Vmax1 = 2.0;
Vmax2 = 2.5;
nu = 0.00000114;

%-----Ajuste de los diametros a las velocidades maximas permitidas-----
for i = 1 : nt
    d(i) = (4 * (Q(i)/1000)/ (pi * Vmax1)) ^ 0.5 * 1000;

    if d(i) <= 30.203138112921
        dc(i) = 30.203138112921;
    elseif (d(i) > 30.203138112921) && (d(i) <= 43.6903190027617)
        dc(i) = 43.6903190027617;
    elseif (d(i) > 43.6903190027617) && (d(i) <= 54.5790572691001)
        dc(i) = 54.5790572691001;
    elseif (d(i) > 54.5790572691001) && (d(i) <= 66.071118688927)
        dc(i) = 66.071118688927;
    elseif (d(i) > 66.071118688927) && (d(i) <= 80.4182993784103)
        dc(i) = 80.4182993784103;
    elseif (d(i) > 80.4182993784103) && (d(i) <= 103.41215841609)
        dc(i) = 103.41215841609;
    elseif (d(i) > 103.41215841609) && (d(i) <= 152.395437550776)
        dc(i) = 152.395437550776;
    end

    if dc(i) > 80.4182993784103
        d(i) = (4 * (Q(i)/1000)/ (pi * Vmax2)) ^ 0.5 * 1000;
    end

    if (d(i) > 80.4182993784103) && (d(i) <= 103.41215841609)
        dc(i) = 103.41215841609;
    elseif (d(i) > 103.41215841609) && (d(i) <= 152.395437550776)
```



```

        dc(i) = 152.395437550776;
    end

%-----ESTIMACION DE PERDIDAS-----
%Coeficiente de fricción
Vc(i) = (Q(i)/1000)/(pi/4*((dc(i)/1000)^2));
NR(i) = Vc(i)*dc(i)/1000/nu;

    if NR(i)== 0
        fric(i) = 0;
    elseif ( NR(i)<0 || NR(i) > 0)
        y = 50;
        I = 0.1;
        while I>0.0000001
            fy(i) = y + 0.869 * log((Ks(i)/1000) / (3.7) + (2.51 / NR(i)) * y);
            dfydy(i) = 1 + (0.869 * ((2.51 / NR(i))) / (((Ks(i)/1000) / (3.7)) +
                2.51 * y / NR(i)));
            if dfydy(i) == 0
                fric(i) = 0;
            elseif ( dfydy(i)<0 || dfydy(i) > 0)
                I = fy(i)/dfydy(i);
                y = y-I;
            end
        end
        fric(i) = 1/(y^2);
    end

%Perdidas por fricción
    hf(i) = fric(i)*L(i)*(Vc(i)^2/(2*9.81))/(dc(i)/1000);
%Perdidas menores por conectores-accesorios,
    hm(i)= km(i)* (Vc(i)^2/19.62)';

end

% ----- CALCULO DE PERDIDAS MENORES, TOTALES Y ALTURA DE LA BOMBA ---
%calculo de las perdidas de fricción en el ramal principal
ntp = input('Numero de tubos en la red principal: ');
for t=1:ntp
    u = input('Columna id EPANET: ');
    hfp(u) = hf(u)
    sum(hfp(u))
end

tf = input('Tramo final (# columna EPANET): ');
hs = input('Altura de succion: ');
pf = input('Presion en nodo final: ');

%calculo de la altura de la bomba
Hb = pf + Z(tf) + sum(hfp) + sum(hm) + hs;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% SOLUCION ECONOMICA
%La curva corresponde al diametro (mm) VS. Costo ($/ml)
%ct es el costo total de la red en pesos colombianos de octubre de 2010.
qf = -0.001 * dc .^ 3 + 0.3466 * dc .^ 2 + 586.3622 * dc + 107.947;
ct = (qf* L)';

epanetclose();

```



Como se observa el código requiere el suministro de los accesorios en cantidad y tipo para cada uno de los tramos. En la siguiente tabla se enumeran los accesorios utilizados en la red principal comenzando por el tramo más lejano.

Tramo EPA	Cantidad	Accesorios				
2	1	TSD				
3	1	Cd				
4	2	Rdc6	Cd			
5	1	TSD				
6	1	Cd				
7	1	Cd				
13	1	Cd				
14	1	Cd				
15	1	TSL				
18	2	TSL	Rdc1			
20	1	Cd				
23	1	TSD				
24	1	TSD				
26	1	TSD				
27	1	TSD				
32	2	TSD	Rdc4			
33	2	TSD	Rdc3			
35	2	TSD	Rdc3			
36	1	TSD				
37	5	TSL	TSL	Cd	R	Ch

Para el cálculo de la altura de la bomba, se simula un embalse cuya altura requerida es la que debe suministrar la bomba al sistema de distribución.

El código también preguntará el número de nodos de la red principal: 22 y la fila 'id' en los resultados EPANET correspondiente a cada tramo de la red principal.

Tramo final (# columna EPANET): 20

Altura de succión: 1.8

Presión en nodo final: 11.3

Los resultados obtenidos se presentan a continuación.



Command Window

```
Altura de succion: 1.8
Presion en nodo final: 11.3
>> Hb

Hb =

    23.4072

>> dc

dc =

Columns 1 through 7

    54.5791    103.4122    103.4122    103.4122    152.3954    152.3954    152.3954

Columns 8 through 14

    54.5791    54.5791    54.5791    54.5791    54.5791    103.4122    103.4122

Columns 15 through 21

    80.4183    30.2031    30.2031    43.6903    30.2031    30.2031    30.2031

Columns 22 through 28

    30.2031    103.4122    103.4122    30.2031    103.4122    103.4122    30.2031

Columns 29 through 35

    30.2031    103.4122    30.2031    80.4183    66.0711    30.2031    54.5791

Columns 36 through 38

    80.4183    152.3954    152.3954

fx >> |
```

Puede observarse que los resultados son los mismos que en el cálculo por la hoja electrónica. Para las restricciones de velocidad definidas  $V_{m\acute{a}x} = 2,0 \text{ m/s}$  para diámetros menores o iguales a  $\text{Ø}3''$ ,  $V_{m\acute{a}x} = 2,5 \text{ m/s}$  para diámetros mayores a  $\text{Ø}3''$  se determina que  $H_B = 23,41\text{m}$ .



```
Command Window
>> Hb
Hb =
    60.7762
>> dc
dc =
Columns 1 through 8
    30.2031    66.0711    66.0711    66.0711    80.4183    80.4183    80.4183    30.2031
Columns 9 through 16
    30.2031    30.2031    30.2031    30.2031    66.0711    66.0711    54.5791    19.0000
Columns 17 through 24
    19.0000    30.2031    19.0000    19.0000    19.0000    19.0000    66.0711    66.0711
Columns 25 through 32
    19.0000    54.5791    54.5791    19.0000    19.0000    54.5791    19.0000    43.6903
Columns 33 through 38
    43.6903    19.0000    30.2031    43.6903    80.4183    80.4183
fx >> |
```

Para las restricciones de velocidad definidas  $V_{m\acute{a}x} = 6,1 \text{ m/s}$  se determina que  $H_B = 60,78 \text{ m}$  y los diámetros son menores que para el caso anterior. Los costos en tubería deben ser menores, pero el costo de la bomba aumenta.

Se intentó ajustar los códigos desarrollados para el ejemplo de las tres tuberías, del ejemplo 5.3 del texto Hidráulica de Tuberías, pero en la ejecución de los modelos, el programa MATLAB en interacción con EPANET, consumen más de cinco horas sin obtener resultados. Esto puede deberse a complejidad en el desarrollo de los algoritmos genéticos y los algoritmos de búsqueda exhaustiva.

Paralelamente, se compararon los resultados de los modelos EPANET y Redes Parciales Sucesivas, encontrando que al ajustar los diámetros el programa de RPS, logra optimizar hidráulicamente en lo mínimo, pero tal optimización es más evidente cuando se incluyen los precios de las tuberías. Los resultados se presentan en las siguientes tablas.

### Tabla de resultados red.

### Comparación de resultados entre Redes Parciales Sucesivas y EPANET.

Tabla de Resultados Red 1

Optimización: Hidráulica

Tramo	Caudal (lps)	Presion		Velocidad Flujo (m/s)	Longitud total (m)	Longitud al inicio (m)	Longitud al final (m)	Diametro al inicio (m)	Diametro al final (m)	Diametro al inicio (")	Diametro al final (")	Costo / ml (\$ x 10 <sup>3</sup> )	Costo / ml (\$ x 10 <sup>3</sup> )	Valor tramo (\$ x 10 <sup>3</sup> )	Caudal (lps)	Presion		Velocidad Flujo (m/s)	Longitud (m)	Diametro (m)	Diametro (")	Costo / ml (\$ x 10 <sup>3</sup> )	Valor tramo (\$ x 10 <sup>3</sup> )												
		al inicio (mca)	al final (mca)													al inicio (mca)	al final (mca)																		
3 - 4	23.2	23.6	21.8	1.31	2.57	0.86	1.71	0.20	0.15	7.9	5.9	\$ 130.0	\$ 95.0	\$ 274.5	23.2	23.6	21.8	1.27	1.80	0.15	6.0	\$ 95.0	\$ 171.0												
4 - 5	23.2	21.8	21.8	1.31	0.78	0.78		0.15		5.9		\$ 95.0		\$ 73.9	23.2	21.8	21.2	1.27	0.77	0.15	6.0	\$ 95.0	\$ 73.2												
5 - 6	23.2	21.8	23.4	2.96	2.57	0.78	1.79	0.15	0.10	5.9	3.9	\$ 95.0	\$ 58.0	\$ 177.9	23.2	21.2	22.9	1.27	1.80	0.15	6.0	\$ 95.0	\$ 171.0												
6 - 7	23.2	23.4	23.4	1.31	1.10	1.10		0.15		5.9		\$ 95.0		\$ 104.6	23.2	22.9	22.9	1.27	1.09	0.15	6.0	\$ 95.0	\$ 103.6												
7 - 12	20.1	23.4	23.4	2.56	0.70	0.70		0.10		3.9		\$ 58.0		\$ 40.6	20.1	22.9	22.3	2.39	0.70	0.10	4.1	\$ 58.0	\$ 40.6												
12 - 13	20.1	23.4	23.3	2.56	0.71	0.71		0.10		3.9		\$ 58.0		\$ 41.0	20.1	22.3	22.2	2.39	0.70	0.10	4.1	\$ 58.0	\$ 40.6												
13 - 14	20.1	23.3	19.9	2.56	4.50	4.50		0.10		3.9		\$ 58.0		\$ 261.0	20.1	22.2	18.9	2.39	3.15	0.10	4.1	\$ 58.0	\$ 182.7												
14 - 22	16.9	19.9	17.5	2.15	3.20	3.20		0.10		3.9		\$ 58.0		\$ 185.6	16.9	18.9	16.6	2.01	2.24	0.10	4.1	\$ 58.0	\$ 129.9												
22 - 23	16.9	17.5	17.4	2.15	3.75	3.75		0.10		3.9		\$ 58.0		\$ 217.3	16.9	16.6	16.5	2.01	3.71	0.10	4.1	\$ 58.0	\$ 215.2												
23 - 24	16.9	17.4	17.3	2.15	2.07	2.07		0.10		3.9		\$ 58.0		\$ 120.1	16.9	16.5	16.0	2.01	2.05	0.10	4.1	\$ 58.0	\$ 118.9												
24 - 26	15.5	17.3	17.2	3.51	0.35	0.35		0.08		3.0		\$ 49.4		\$ 17.3	15.5	16.0	15.9	1.85	0.35	0.10	4.1	\$ 58.0	\$ 20.3												
26 - 29	14.1	17.2	17.0	3.19	1.87	1.87		0.08		3.0		\$ 49.4		\$ 92.2	14.1	15.9	15.8	1.68	1.85	0.10	4.1	\$ 58.0	\$ 107.3												
29 - 31	12.7	17.0	16.9	2.87	0.35	0.35		0.08		3.0		\$ 49.4		\$ 17.5	12.7	15.8	15.8	1.51	0.35	0.10	4.1	\$ 58.0	\$ 20.3												
31 - 33	11.3	16.9	16.7	2.55	2.63	2.63		0.08		3.0		\$ 49.4		\$ 129.9	11.3	15.8	15.5	1.34	2.60	0.10	4.1	\$ 58.0	\$ 150.8												
33 - 34	9.9	16.7	16.6	2.23	1.16	1.16		0.08		3.0		\$ 49.4		\$ 57.4	9.9	15.5	15.1	1.94	1.15	0.08	3.2	\$ 49.4	\$ 56.8												
34 - 36	8.5	16.6	16.4	1.91	4.07	4.07		0.08		3.0		\$ 49.4		\$ 201.1	8.5	15.1	15.0	1.67	4.03	0.08	3.2	\$ 49.4	\$ 199.1												
36 - 38	7.1	16.4	16.3	3.59	0.35	0.35		0.05		2.0		\$ 25.4		\$ 9.0	7.1	15.0	14.8	1.39	0.35	0.08	3.2	\$ 49.4	\$ 17.3												
38 - 41	5.6	16.3	15.6	2.87	4.07	4.07		0.05		2.0		\$ 25.4		\$ 103.4	5.6	14.8	12.5	1.65	4.03	0.07	2.6	\$ 37.9	\$ 152.7												
41 - 43	4.2	15.6	15.6	2.15	0.35	0.35		0.05		2.0		\$ 25.4		\$ 9.0	4.2	12.5	12.4	1.81	0.35	0.05	2.1	\$ 25.4	\$ 8.9												
43 - 45	2.8	15.6	15.4	2.55	4.48	4.48		0.04		1.5		\$ 21.0		\$ 94.2	2.8	12.4	11.7	1.88	4.44	0.04	1.7	\$ 25.4	\$ 112.8												
45 - 47	1.4	15.4	14.9	2.87	1.16	1.16		0.03		1.0		\$ 17.0		\$ 19.7	1.4	11.7	11.3	1.97	1.15	0.03	1.2	\$ 21.0	\$ 24.2												
45 - 46	1.4	15.4	14.9	2.87	1.16	1.16		0.03		1.0		\$ 17.0		\$ 19.8	1.4	11.7	11.5	1.97	1.15	0.03	1.2	\$ 21.0	\$ 24.2												
43 - 44	1.4	15.6	15.1	2.87	1.16	1.16		0.03		1.0		\$ 17.0		\$ 19.7	1.4	12.4	12.2	1.97	1.15	0.03	1.2	\$ 21.0	\$ 24.2												
41 - 42	1.4	15.6	15.1	2.87	1.15	1.15		0.03		1.0		\$ 17.0		\$ 19.5	1.4	12.5	12.3	1.97	1.15	0.03	1.2	\$ 21.0	\$ 24.2												
38 - 39	1.4	16.3	15.9	2.87	1.16	1.16		0.03		1.0		\$ 17.0		\$ 19.7	1.4	14.8	14.6	1.97	1.15	0.03	1.2	\$ 21.0	\$ 24.2												
36 - 37	1.4	16.4	15.9	2.87	1.16	1.16		0.03		1.0		\$ 17.0		\$ 19.7	1.4	15.0	14.8	1.97	1.15	0.03	1.2	\$ 21.0	\$ 24.2												
34 - 35	1.4	16.6	16.2	2.87	1.16	1.16		0.03		1.0		\$ 17.0		\$ 19.7	1.4	15.1	15.0	1.97	1.15	0.03	1.2	\$ 21.0	\$ 24.2												
31 - 32	1.4	16.9	16.4	2.87	1.34	1.34		0.03		1.0		\$ 17.0		\$ 22.8	1.4	15.8	15.7	1.23	1.33	0.04	1.5	\$ 21.0	\$ 27.9												
29 - 30	1.4	17.0	16.4	2.87	1.34	1.34		0.03		1.0		\$ 17.0		\$ 22.8	1.4	15.8	15.7	1.23	1.33	0.04	1.5	\$ 21.0	\$ 27.9												
26 - 28	1.4	17.2	16.7	2.87	1.34	1.34		0.03		1.0		\$ 17.0		\$ 22.8	1.4	15.9	15.8	1.23	1.33	0.04	1.5	\$ 21.0	\$ 27.9												
24 - 25	1.4	17.3	16.7	2.87	1.34	1.34		0.03		1.0		\$ 17.0		\$ 22.8	1.4	16.0	15.9	1.23	1.33	0.04	1.5	\$ 21.0	\$ 27.9												
14 - 15	3.2	19.9	19.8	2.85	2.20	2.20		0.04		1.5		\$ 21.0		\$ 46.2	3.2	18.9	18.9	0.62	2.18	0.08	3.2	\$ 58.0	\$ 126.4												
15 - 16	3.2	19.8	17.7	2.85	2.71	2.71		0.04		1.5		\$ 21.0		\$ 57.0	3.2	18.9	17.0	0.62	1.90	0.08	3.2	\$ 58.0	\$ 110.2												
7 - 8	3.2	23.4	23.2	1.60	4.17	0.37	3.81	0.08	0.05	3.0	2.0	\$ 49.4	\$ 25.4	\$ 114.7	3.2	22.9	22.9	0.62	4.13	0.08	3.2	\$ 58.0	\$ 239.5												
8 - 9	3.2	23.2	23.1	2.85	1.59	1.59		0.04		1.5		\$ 21.0		\$ 33.3	3.2	22.9	22.9	0.37	1.57	0.10	4.1	\$ 58.0	\$ 91.1												
9 - 10	3.2	23.1	23.1	2.85	0.99	0.99		0.04		1.5		\$ 21.0		\$ 20.8	3.2	22.9	22.9	0.37	0.98	0.10	4.1	\$ 58.0	\$ 56.8												
10 - 11	3.2	23.1	21.0	2.85	2.71	2.71		0.04		1.5		\$ 21.0		\$ 57.0	3.15	22.90	20.99	0.62	1.90	0.08	3.2	\$ 49.4	\$ 93.9												
Total																																Total			
Total																																\$ 2 785.7		\$ 3 092	

Optimización: Hidráulica y Económica

Modelo 1: Redes parciales Sucesivas													Modelo 2: EPANET																		
Tramo	Caudal	Presion al inicio	Presion al final	Velocidad Flujo	Longitud total	Longitud al inicio	Longitud al final	Diametro al inicio	Diametro al final	Diametro al inicio	Diametro al final	Costo / ml	Costo / ml	Valor tramo	Caudal	Presion al inicio	Presion al final	Velocidad Flujo	Longitud	Diametro	Diametro	Costo / ml	Valor tramo								
	(lps)	(mca)	(mca)	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(")	(")	(\$ x 10 <sup>3</sup> )	(\$ x 10 <sup>3</sup> )	(\$ x 10 <sup>3</sup> )	(lps)	(mca)	(mca)	(m/s)	(m)	(m)	(")	(\$ x 10 <sup>3</sup> )	(\$ x 10 <sup>3</sup> )								
3-4	23.2	23.6	21.8	1.31	2.57	0.86	1.71	0.20	0.15	7.9	5.9	\$ 130.0	\$ 95.0	\$ 274.5	23.2	23.6	21.8	1.27	1.80	0.15	6.0	\$ 95.0	\$ 171.0								
4-5	23.2	21.8	21.7	2.96	0.78	0.78		0.10		3.9		\$ 58.0		\$ 45.1	23.2	21.8	21.2	1.27	0.77	0.15	6.0	\$ 95.0	\$ 73.2								
5-6	23.2	21.7	23.3	2.96	2.57	2.57		0.10		3.9		\$ 58.0		\$ 149.1	23.2	21.2	22.9	1.27	1.80	0.15	6.0	\$ 95.0	\$ 171.0								
6-7	23.2	23.3	23.2	2.96	1.10	1.10		0.10		3.9		\$ 58.0		\$ 63.9	23.2	22.9	22.9	1.27	1.09	0.15	6.0	\$ 95.0	\$ 103.6								
7-12	20.1	23.2	23.2	2.56	0.70	0.70		0.10		3.9		\$ 58.0		\$ 40.6	20.1	22.9	22.3	2.39	0.70	0.10	4.1	\$ 58.0	\$ 40.6								
12-13	20.1	23.2	23.2	2.56	0.71	0.71		0.10		3.9		\$ 58.0		\$ 41.0	20.1	22.3	22.2	2.39	0.70	0.10	4.1	\$ 58.0	\$ 40.6								
13-14	20.1	23.2	19.7	2.56	4.50	4.50		0.10		3.9		\$ 58.0		\$ 261.0	20.1	22.2	18.9	2.39	3.15	0.10	4.1	\$ 58.0	\$ 182.7								
14-22	16.9	19.7	17.4	2.15	3.20	3.20		0.10		3.9		\$ 58.0		\$ 185.6	16.9	18.9	16.6	2.01	2.24	0.10	4.1	\$ 58.0	\$ 129.9								
22-23	16.9	17.4	17.2	2.15	3.75	3.75		0.10		3.9		\$ 58.0		\$ 217.3	16.9	16.6	16.5	2.01	3.71	0.10	4.1	\$ 58.0	\$ 215.2								
23-24	16.9	17.2	17.1	2.15	2.07	2.07		0.10		3.9		\$ 58.0		\$ 120.1	16.9	16.5	16.0	2.01	2.05	0.10	4.1	\$ 58.0	\$ 118.9								
24-26	15.5	17.1	17.0	3.51	0.35	0.35		0.08		3.0		\$ 49.4		\$ 17.3	15.5	16.0	15.9	1.85	0.35	0.10	4.1	\$ 58.0	\$ 20.3								
26-29	14.1	17.0	16.8	3.19	1.87	1.87		0.08		3.0		\$ 49.4		\$ 92.2	14.1	15.9	15.8	1.68	1.85	0.10	4.1	\$ 58.0	\$ 107.3								
29-31	12.7	16.8	16.8	2.87	0.35	0.35		0.08		3.0		\$ 49.4		\$ 17.5	12.7	15.8	15.8	1.51	0.35	0.10	4.1	\$ 58.0	\$ 20.3								
31-33	11.3	16.8	16.5	2.55	2.63	2.63		0.08		3.0		\$ 49.4		\$ 129.9	11.3	15.8	15.5	1.34	2.60	0.10	4.1	\$ 58.0	\$ 150.8								
33-34	9.9	16.5	16.5	2.23	1.16	1.16		0.08		3.0		\$ 49.4		\$ 57.4	9.9	15.5	15.1	1.94	1.15	0.08	3.2	\$ 49.4	\$ 56.8								
34-36	8.5	16.5	16.3	1.91	4.07	4.07		0.08		3.0		\$ 49.4		\$ 201.1	8.5	15.1	15.0	1.67	4.03	0.08	3.2	\$ 49.4	\$ 199.1								
36-38	7.1	16.3	16.2	3.59	0.35	0.35		0.05		2.0		\$ 25.4		\$ 9.0	7.1	15.0	14.8	1.39	0.35	0.08	3.2	\$ 49.4	\$ 17.3								
38-41	5.6	16.2	15.4	2.87	4.07	4.07		0.05		2.0		\$ 25.4		\$ 103.4	5.6	14.8	12.5	1.65	4.03	0.07	2.6	\$ 37.9	\$ 152.7								
41-43	4.2	15.4	15.4	2.15	0.35	0.35		0.05		2.0		\$ 25.4		\$ 9.0	4.2	12.5	12.4	1.81	0.35	0.05	2.1	\$ 25.4	\$ 8.9								
43-45	2.8	15.4	15.2	2.55	4.48	4.48		0.04		1.5		\$ 21.0		\$ 94.2	2.8	12.4	11.7	1.88	4.44	0.04	1.7	\$ 25.4	\$ 112.8								
45-47	1.4	15.2	14.7	2.87	1.16	1.16		0.03		1.0		\$ 17.0		\$ 19.7	1.4	11.7	11.3	1.97	1.15	0.03	1.2	\$ 21.0	\$ 24.2								
45-46	1.4	15.2	14.7	2.87	1.16	1.16		0.03		1.0		\$ 17.0		\$ 19.8	1.4	11.7	11.5	1.97	1.15	0.03	1.2	\$ 21.0	\$ 24.2								
43-44	1.4	15.4	14.9	2.87	1.16	1.16		0.03		1.0		\$ 17.0		\$ 19.7	1.4	12.4	12.2	1.97	1.15	0.03	1.2	\$ 21.0	\$ 24.2								
41-42	1.4	15.4	14.9	2.87	1.15	1.15		0.03		1.0		\$ 17.0		\$ 19.5	1.4	12.5	12.3	1.97	1.15	0.03	1.2	\$ 21.0	\$ 24.2								
38-39	1.4	16.2	15.7	2.87	1.16	1.16		0.03		1.0		\$ 17.0		\$ 19.7	1.4	14.8	14.6	1.97	1.15	0.03	1.2	\$ 21.0	\$ 24.2								
36-37	1.4	16.3	15.8	2.87	1.16	1.16		0.03		1.0		\$ 17.0		\$ 19.7	1.4	15.0	14.8	1.97	1.15	0.03	1.2	\$ 21.0	\$ 24.2								
34-35	1.4	16.5	16.0	2.87	1.16	1.16		0.03		1.0		\$ 17.0		\$ 19.7	1.4	15.1	15.0	1.97	1.15	0.03	1.2	\$ 21.0	\$ 24.2								
31-32	1.4	16.8	16.2	2.87	1.34	1.34		0.03		1.0		\$ 17.0		\$ 22.8	1.4	15.8	15.7	1.23	1.33	0.04	1.5	\$ 21.0	\$ 27.9								
29-30	1.4	16.8	16.2	2.87	1.34	1.34		0.03		1.0		\$ 17.0		\$ 22.8	1.4	15.8	15.7	1.23	1.33	0.04	1.5	\$ 21.0	\$ 27.9								
26-28	1.4	17.0	16.5	2.87	1.34	1.34		0.03		1.0		\$ 17.0		\$ 22.8	1.4	15.9	15.8	1.23	1.33	0.04	1.5	\$ 21.0	\$ 27.9								
24-25	1.4	17.1	16.5	2.87	1.34	1.34		0.03		1.0		\$ 17.0		\$ 22.8	1.4	16.0	15.9	1.23	1.33	0.04	1.5	\$ 21.0	\$ 27.9								
14-15	3.2	19.7	19.6	2.85	2.20	2.20		0.04		1.5		\$ 21.0		\$ 46.2	3.2	18.9	18.9	0.62	2.18	0.08	3.2	\$ 58.0	\$ 126.4								
15-16	3.2	19.6	17.6	2.85	2.71	2.71		0.04		1.5		\$ 21.0		\$ 57.0	3.2	18.9	17.0	0.62	1.90	0.08	3.2	\$ 58.0	\$ 110.2								
7-8	3.2	23.2	23.1	1.60	4.17	1.07	3.11	0.08	0.05	3.0	2.0	\$ 49.4	\$ 25.4	\$ 131.5	3.2	22.9	22.9	0.62	4.13	0.08	3.2	\$ 58.0	\$ 239.5								
8-9	3.2	23.1	23.0	1.60	1.59	0.22	1.36	0.08	0.05	3.0	2.0	\$ 4.4	\$ 25.4	\$ 35.6	3.2	22.9	22.9	0.37	1.57	0.10	4.1	\$ 58.0	\$ 91.1								
9-10	3.2	23.0	22.9	2.85	0.99	0.99		0.04		1.5		\$ 21.0		\$ 20.8	3.2	22.9	22.9	0.37	0.98	0.10	4.1	\$ 58.0	\$ 56.8								
10-11	3.2	22.9	21.0	0.71	2.71	2.71		0.08		3.0		\$ 49.4		\$ 134.1	3.15	22.90	20.99	0.62	1.90	0.08	3.2	\$ 49.4	\$ 93.9								
														Total		\$ 2 784												Total		\$ 3 092	



## 9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. En la práctica, los modelos de optimización son de uso limitado, a pesar del esfuerzo que se aplica en el desarrollo de los mismos.
2. La crítica a los métodos de optimización se enfoca en la incertidumbre que se tiene al definir los parámetros de diseño, incluidos los coeficientes de costo, los coeficientes futuros de rugosidad y las demandas de consumo.
3. Las soluciones óptimas que proporcionan diámetros continuos o tuberías separadas, generan problemas de diseño. Igualmente, la optimización de modelos ha caído en el problema de eliminar redundancias en el diseño, ya que termina enfocándose en la minimización de los costos.
4. Debe tenerse especial juicio profesional, para el proceso de optimización y modelación matemática, es decir, que los métodos de optimización son una herramienta para el diseñador, en la determinación de soluciones eficientes a bajo costo para determinadas condiciones de diseño, las cuales a su vez tienen incidencia sobre los procesos de ensayo y error y sobre los métodos de optimización.
5. En el caso de redes contraincendio, inicialmente se tienen restricciones al definir los diámetros, los cuales están en función de las velocidades que se establezcan y del material que se considere como apropiado.
6. Los diámetros nominales que son los diámetros con los que se conocen comercialmente las tuberías, no corresponden exactamente con los diámetros internos que son los diámetros reales. Esta diferencia afecta considerablemente el cálculo de las pérdidas por fricción, si se tiene en cuenta que el diámetro se encuentra elevado a la quinta potencia.
7. En el desarrollo de métodos de optimización para redes contraincendio o redes abiertas debe procurarse integrar todas las restricciones posibles, ya que al obtener resultados en función de unas pocas, los resultados no son siempre convergentes.
8. Es importante continuar con el ajuste de códigos para EPAMAT, que logren simplificar los procesos iterativos de los algoritmos, con el fin de reducir los tiempos de ejecución de los procesos de optimización y el de obtener resultados confiables en la modelación de redes abiertas con EPANET.



## 10. BIBLIOGRAFÍA

- STREETER, Victor L., WYLIE, E. Benjamin. Mecánica de los Fluidos. Editorial McGraw-Hill. Tercera edición en español.
- SOTELO ÁVILA, Gilberto. Hidráulica General, Volumen 1, Fundamentos. Editorial Limusa.
- SALDARRIAGA V., Juan G. Hidráulica de Tuberías. Editorial McGraw-Hill Interamericana S.A. 1998.
- RODRÍGUEZ DÍAZ, Héctor Alfonso. Diseños Hidráulicos, Sanitarios y de Gas en Edificaciones. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- GRANADOS ROBAYO, Jorge Armando. Redes Hidráulicas y Sanitarias en Edificios. Editorial Unibiblos. Universidad Nacional de Colombia. 2002.
- PÉREZ CARMONA, Rafael. Instalaciones Hidráulicas, Sanitarias y de Gas en Edificaciones. Editorial ESCALA.
- CARDONA, Álvaro. RIVEROS, Ernesto. Tesis de Grado. Programa para la Optimización por Costos de Redes Abiertas. Método de Redes Parciales Sucesivas. Escuela Colombiana de Ingeniería. 2008.
- DIAZ, Jhon. VASQUEZ, Manuel. Tesis de Grado. Redes Contraincendio en Edificaciones. Escuela Colombiana de Ingeniería. 2009.
- CALDERÓN DÍAZ, John. Instalaciones Hidráulicas, Sanitarias en Edificios.
- PARDO ALUMA, LUIS EMILIO. Flujo en tuberías.
- MAYS, Larry W. Manual de Sistemas de Distribución de Agua. Editorial McGraw-Hill. Primera edición en español.
- HAESTAD, WALSKI, CHASE, SAVIC, GRAYMAN, BECKWITH, KOELLE. Advanced Water Distribution Modeling and Management. 1ª Ed. Haestad Press.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN - ICONTEC. Código Colombiano de Fontanería, Norma NTC 1500.



- Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS 2000.
- NFPA 13. Sprinklers. 1985.
- NFPA 14. Standard for the Installation of Standpipe and Hose Systems. 2003.
- LINDER, KENNETH W. Hydraulics for Fire Protection. Chapter 3. Section 15. Fire Protection Handbook – Operation of Fire Protection Systems. NFPA.
- AWWA M11, Steel Pipe - A Guide for Design and Installation, American Water Works Association, Denver, CO, 1989.
- IESO. Industrias Especializadas Oliva. Sistemas Contraincendio. <http://www.ieso.com.mx/>
- MERELO, J.J. Técnicas heurísticas de resolución de problemas: computación evolutiva y redes neuronales. <http://geneura.ugr.es/~jmerelo/tutoriales/heuristics101/>.
- Algoritmos exhaustivos. <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4060024/Lecciones/Capitulo%20III/aexhaustivos.htm>

**OPTIMIZACIÓN DE REDES CONTRA INCENDIO**

**RICARDO BEJARANO CABALLERO**

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA “JULIO GARAVITO”  
ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO AMBIENTE**

**BOGOTÁ**

**2011**



## **OPTIMIZACIÓN DE REDES CONTRAINCENDIO**

**RICARDO BEJARANO CABALLERO**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de  
Especialista en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.**

**Director  
Dr. GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS**

**ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA "JULIO GARAVITO"  
ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO AMBIENTE**

**BOGOTÁ**

**2011**



## NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado "**OPTIMIZACIÓN DE REDES CONTRAINCENDIO**" presentado por Ricardo Bejarano Caballero, en cumplimiento del requisito parcial para optar el título de Especialista en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente, fue aprobado por el director del trabajo, Dr. Germán Ricardo Santos Granados.

---

**Firma Director**

Bogotá, D.C. Enero de 2011



A DIOS y su HIJO, por toda la Gracia que me han dado,  
a mi esposa Clara Inés quien sabia y amorosamente  
me ha dado todo su apoyo, a Juan Guillermo y Carolina,  
por regalarme todo este tiempo y a todos aquellos  
que de una u otra forma me han brindado ánimo.

Agradezco especialmente a mis profesores  
Dr. Germán Eduardo Acero Riveros  
Dr. Germán Ricardo Santos Granados  
Dr. Héctor Alfonso Rodríguez Díaz



## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
1. INTRODUCCIÓN.	1
2. OBJETIVOS.	3
2.1 OBJETIVO GENERAL.	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	3
3. MARCO TEÓRICO.	4
3.1 FUNDAMENTOS.	4
3.1.1 Hidráulica de sistemas a presión.	4
3.2 FLUJO EN TUBERÍAS.	6
3.2.1 Aspectos generales.	6
3.2.2 Pérdidas por fricción.	7
3.2.3 Fórmulas empíricas.	11
3.2.4 Pérdidas menores debidas a los accesorios.	12
3.2.5 Límites de velocidad y selección de diámetro.	13
3.2.6 Descarga de agua a través de orificios	14
3.3 REDES ABIERTAS.	17
3.3.1 Caudales simultáneos.	18
3.3.2 Caudales puntuales o zonales.	18
3.3.3 Método de simultaneidad por aparatos hidráulicos.	19
3.4 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.	19
3.5 FORMULACIÓN MATEMÁTICA.	20
3.6 MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN.	22
3.6.1 Aproximación por ensayo y error.	23
3.6.2 Búsqueda exhaustiva.	23
3.6.3 Método de la pérdida de carga constante.	24
3.6.4 Método de la programación lineal.	25
3.6.5 Método de Labye-Lechapt.	25
3.6.6 Método discontinuo de Labye.	25
3.6.7 Sistemas ramificados.	26
3.6.8 Método de programación no lineal.	27
3.6.9 Técnicas estocásticas de búsqueda.	28
3.6.10 Algoritmos genéticos.	30
3.7 DIFICULTADES DE LOS MÉTODOS DE OPTIMIZACIÓN.	32
3.7.1 Repercusión de los costos.	32
3.7.2 Fiabilidad / Redundancia.	32
3.7.3 Incertidumbre en la planificación del sistema.	32
3.7.4 Tamaño de la tubería y el control de demandas.	33
3.7.5 El tratamiento de las bombas y depósitos.	33
4. PROGRAMA OPTIMIZACIÓN DE REDES PARCIALES SUCESIVAS.	34
5. EPANET.	35
6. MATLAB.	37



6.1	EPAMAT (EPANET & MATLAB)	40
7.	EJEMPLO BÁSICO DE OPTIMIZACIÓN.	43
8.	REDES CONTRAINCENDIO.	48
8.1.1	Ejemplo de red contraincendio.	50
9.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	64
10.	BIBLIOGRAFÍA	65

### TABLAS

Tabla 3-1.	Valores de Rugosidad absoluta para diferentes materiales. ....	11
Tabla 3-2.	Coeficiente de Hazen-Williams. ....	12
Tabla 3-3.	Coeficientes de descarga típicos. ....	17

### FIGURAS

Figura 3-1.	Tubo de Corriente .....	4
Figura 3-2.	Diagrama de Moody .....	10
Figura 3-3.	Orificios de diversas formas .....	15
Figura 3-4.	Caudal a través de un orificio normalizado.....	16
Figura 3-5.	Modelo de enlace optimización-simulación para metodología de programación no lineal. ....	28



## **ANEXOS**



## CÓDIGOS MATLAB

- **epanetloadfile.m**

```
%----- BEGIN CODE -----  
  
% Load the EPANET 2 dynamic link library ...  
if ~libisloaded('epanet2') loadlibrary('epanet2', 'epanet2.h'); end  
  
% Open the water distribution system ...  
s = which(wdsfile);  
if ~isempty(s) wdsfile = s; end  
  
[errorcode] = calllib('epanet2', 'ENopen', wdsfile, 'temp1.$$$', 'temp2.$$$');  
if (errorcode)  
    fprintf('Could not open network ''%s''.\nReturned empty array.\n', wdsfile);  
    return;  
else  
    fprintf('File ''%s'' opened successfully.\n', wdsfile);  
end  
  
%----- END OF CODE -----
```



- **getdata.m**

```
%----- BEGIN CODE -----  
  
% Initialise a few variables ...  
code = upper(code);  
errorcode = 0;  
x = []; t = [];  
if (nargin < 2)  
    id = [];  
end  
  
% Find out what is required ...  
  
% Static node value?  
s =  
'EN_ELEVATIONEN_BASEDEMANDEN_PATTERNEN_EMITTEREN_INITQUALEN_SOURCEQUALEN_SOURCEPATEN_SOURCETYPEEN_  
TANKLEVEL';  
if ~isempty(findstr(s,code))  
    isstatic = 1;  
    location = 'node';  
end  
  
% Dynamic node value?  
s = 'EN_DEMANDEN_HEADEN_PRESSUREEN_QUALITYEN_SOURCEMASS';  
if ~isempty(findstr(s, code))  
    isstatic = 0;  
    location = 'node';  
end  
  
% Static link value?  
s = 'EN_DIAMETEREN_LENGTHEN_ROUGHNESSEN_MINORLOSSEN_INITSTATUSEN_INITSETTINGEN_KBULKEN_KWALL';
```



```
if ~isempty(findstr(s, code))
    isstatic = 1;
    location = 'link';
end

% Dynamic link value?
s = 'EN_FLOWEN_VELOCITYEN_HEADLOSSEN_STATUSEN_SETTINGEN_ENERGY';
if ~isempty(findstr(s, code))
    isstatic = 0;
    location = 'link';
end

%Code insertd by Demetris Eliades 7/8/07
s='EN_NODECOUNTEN_TANKCOUNTEN_LINKCOUNTEN_PATCOUNTEN_CURVECOUNTEN_CONTROLCOUNT';
if ~isempty(findstr(s, code))
    countcode = getenconstant(code);
    countpointer = libpointer('int32Ptr',0);
    calllib('epanet2','ENgetcount', countcode , countpointer);
    x=get(countpointer,'Value');
    return
end
% Water quality data?
ishydraulic = 1;
if strcmp(code, 'EN_QUALITY') ishydraulic = 0; end

% Retrieve the indices ...
nlocations = length(id);
if ~nlocations
    % Retrieve data for all nodes/links
    countcode = getenconstant(['EN_', upper(location), 'COUNT']);
    [errorcode, nlocations] = calllib('epanet2', 'ENgetcount', countcode, nlocations);
    if (errorcode)
        fprintf(['Problem retrieving number of ', location, 's.\n']);
        [errorcode] = calllib('epanet2', 'ENclose');
        unloadlibrary('epanet2');
```



```
        return;
    end
    nlocations = double(nlocations);
    index = 1:nlocations;
else
    getindexfunc = ['ENget', location, 'index'];
    for n = 1:nlocations
        index(1,n) = 0;
        [errorcode, id{n}, index(1,n)] = calllib('epanet2', getindexfunc, id{n}, index(1,n));
        if (errorcode)
            fprintf(['Problem retrieving index for ', location, ' ', id{n}, ' ' '\n']);
            [errorcode] = calllib('epanet2', 'ENClose');
            unloadlibrary('epanet2');
            return;
        end
    end
end
end

getvaluefunc = ['ENget', location, 'value'];
% Obtain correct epanet code ...
epanetcode = getenconstant(code);

if isstatic
    % Static output required. No need to run simulation ...
    for n = 1:nlocations
        x(n) = 0;
        [errorcode, x(n)] = calllib('epanet2', getvaluefunc, index(n), epanetcode, x(n));
        if (errorcode)
            s = ' ';
            getidfunc = ['ENget', location, 'id'];
            [errorcode, s] = calllib('epanet2', getidfunc, index(n), s);
            if (errorcode)
                fprintf(['Problem retrieving value for ', location, ' ', x(n), ' ' '\n']);
            end
        end
    end
end
```



```
        fprintf(['Problem retrieving value for ', location, ' ', s, '(id).\n']);
    end
    [errorcode] = calllib('epanet2', 'ENclose');
    unloadlibrary('epanet2');
    return;
end
end
else
    % Non-static output required. Run simulation ...
    nextfunc = 'ENnextH';
    initflag = 11;
    enflag = 'H';
    if ~ishydraulic
        enflag = 'Q';
        nextfunc = 'ENstepQ';
        % Solve hydraulics prior to running WQ simulation ...
        [errorcode] = calllib('epanet2', 'ENSolveH');
        initflag = 0;
    end

    % Assign function calls (WQ or Hydraulic) ...
    initfunc = ['ENinit', enflag];
    openfunc = ['ENopen', enflag];
    runfunc = ['ENrun', enflag];
    closefunc = ['ENclose', enflag];

    % Open and initialise the (WQ/Hydraulic) solver ...
    [errorcode] = calllib('epanet2', openfunc);
    [errorcode] = calllib('epanet2', initfunc, initflag);

    % Initialise some variables ...
    tval = 0; tstep = 1; value = 0.0; pt = 0;

    % Loop through simulation ...
    while tstep && ~errorcode
```



```
[errorcode, tval] = calllib('epanet2', runfunc, tval);
pt = pt + 1;
for n = 1:nlocations
    [errorcode, value] = calllib('epanet2', getvaluefunc, index(n), epanetcode, value);
    x(pt, n) = double(value);
end
t(pt) = double(tval)/3600;
% Continue to the next time step ...
[errorcode, tstep] = calllib('epanet2', nextfunc, tstep);
end
% Close the solver
[errorcode] = calllib('epanet2', closefunc);
end

% Convert to double precision ...
x = double(x);
```



- **setdata.m**

```
%----- BEGIN CODE -----  
  
% Initialise a few variables ...  
code = upper(code);  
errorcode = 0;  
if (nargin < 3) id = []; end  
  
s= 'SET_PATTERN';  
if ~isempty(findstr(s, code))  
    patternpointer = libpointer('singlePtr',value);  
    lengthpattern=length(value);  
    [errorcode]=calllib('epanet2','ENsetpattern',id,patternpointer,lengthpattern);  
    return  
end  
  
s =  
'EN_DURATIONEN_HYDSTEPEN_QUALSTEPEN_PATTERNSTEPEN_PATTERNSTARTEN_REPORTSTEPEN_REPORTSTARTEN_RULESTEPEN_  
STATISTIC';  
if ~isempty(findstr(s, code))  
    epanetcode = getenconstant(code);  
    [errorcode]=calllib('epanet2','ENsettimeparam', epanetcode , value);  
    return  
end  
  
location = 'node';  
s='EN_DIAMETEREN_LENGTHEN_ROUGHNESSEN_MINORLOSSEN_INITSTATUSEN_INITSETTINGEN_KBULKEN_KWALLEN_STATUSEN_S  
ETTING';  
if ~isempty(findstr(s, code))  
    location = 'link';  
end
```



```
s= 'SET_CONTROLS'; %setdata('SET_CONTROLS',{ 'EN_LOWLEVEL','P110','OPEN',14,'T1'},7)
%setdata('SET_CONTROLS',{ 'EN_TIMER','10','OPEN',20000})
if ~isempty(findstr(s, code))
    if (nargin < 3)
        % to use the last control rule (EPANET cannot add rules!!!)
        lc=getdata('EN_CONTROLCOUNT');
        cindex=lc;
    end
    ctype=getenconstant(value{1})
    lindex=0
    [errorcode, value{2}, lindex] = calllib('epanet2', 'ENgetlinkindex', value{2}, lindex)

    setting=value{3}; % numerical
    if value{3}=='OPEN'
        setting=1;
    elseif value{3}=='CLOSED'
        setting=0;
    end
    nindex=0;
    level=value{4};
    if ctype<2
        nindex=0
        [errorcode, value{5}, nindex] = calllib('epanet2', 'ENgetlinkindex', value{5}, nindex)
    end
    setting=single(setting);level=single(level);nindex=int32(nindex);ctype=int32(ctype);
    [errorcode]=calllib('epanet2','ENsetcontrol',cindex, ctype, lindex, setting, nindex, level);
    return
end

% Retrieve the indices ...
nlocations = length(id);
if ~nlocations
    % Retrieve data for all nodes/links
    countcode = getenconstant(['EN_', upper(location), 'COUNT']);
    [errorcode, nlocations] = calllib('epanet2', 'ENgetcount', countcode, nlocations);
end
```



```
    if (errorcode)
        fprintf(['Problem retrieving number of ', location, 's.\n']);
        [errorcode] = calllib('epanet2', 'ENClose');
        unloadlibrary('epanet2');
        return;
    end
    nlocations = double(nlocations);
    index = 1:nlocations;
else
    getindexfunc = ['ENget', location, 'index'];
    for n = 1:nlocations
        index(1,n) = 0;
        [errorcode, id{n}, index(1,n)] = calllib('epanet2', getindexfunc, id{n}, index(1,n));
        if (errorcode)
            fprintf(['Problem retrieving index for ', location, ' ', id{n}, '.\n']);
            [errorcode] = calllib('epanet2', 'ENClose');
            unloadlibrary('epanet2');
            return;
        end
    end
end
end

s='EN_DIAMETEREN_LENGTHEN_ROUGHNESSEN_MINORLOSSEN_INITSTATUSEN_INITSETTINGEN_KBULKEN_KWALLEN_STATUSEN_SETTING';
if ~isempty(findstr(s, code))
    epanetcode = getenconstant(code);
    if length(index)==length(value)
        for i=1:length(index)
            [errorcode]=calllib('epanet2','ENsetlinkvalue', index(i) ,epanetcode, value(i));
        end
    elseif length(value)==1
        for i=1:length(index)
            [errorcode]=calllib('epanet2','ENsetlinkvalue', index(i) ,epanetcode, value);
        end
    end
else
```



```
        disp('ENsetlinkvalue: Index and value dimensions do not match')
    end
    return
end

if ~isempty(findstr(s, code))
    epanetcode = getenconstant(code);
    [errorcode]=calllib('epanet2','ENsetlinkvalue', index , epanetcode ,value);
    return
end

s='EN_ELEVATIONEN_BASEDEMANDEN_PATTERNEN_EMITTEREN_INITQUALEN_SOURCEQUALEN_SOURCEPATEN_SOURCETYPEEN_TAN
KLEVEL';
if ~isempty(findstr(s, code))
    epanetcode = getenconstant(code);
    if length(index)==length(value)
        for i=1:length(index)
            [errorcode]=calllib('epanet2','ENsetnodevalue', index(i) ,epanetcode, value(i));
        end
    elseif length(value)==1
        for i=1:length(index)
            [errorcode]=calllib('epanet2','ENsetnodevalue', index(i) ,epanetcode, value);
        end
    else
        disp('ENsetnodevalue: Index and value dimensions do not match');
    end
    return
end
%----- END OF CODE -----
```



- **getenconstant.m:**

```
function value = getenconstant(en_constant)

value = -1;

switch en_constant
    case 'EN_ELEVATION'
        value = 0;
    case 'EN_BASEDEMAND'
        value = 1;
    case 'EN_PATTERN'
        value = 2;
    case 'EN_EMITTER'
        value = 3;
    case 'EN_INITQUAL'
        value = 4;
    case 'EN_SOURCEQUAL'
        value = 5;
    case 'EN_SOURCEPAT'
        value = 6;
    case 'EN_SOURCETYPE'
        value = 7;
    case 'EN_TANKLEVEL'
        value = 8;
    case 'EN_DEMAND'
        value = 9;
    case 'EN_HEAD'
        value = 10;
    case 'EN_PRESSURE'
        value = 11;
    case 'EN_QUALITY'
        value = 12;
    case 'EN_SOURCEMASS'
        value = 13;

    case 'EN_DIAMETER'
        value = 0;
    case 'EN_LENGTH'
        value = 1;
    case 'EN_ROUGHNESS'
        value = 2;
    case 'EN_MINORLOSS'
        value = 3;
    case 'EN_INITSTATUS'
        value = 4;
    case 'EN_INITSETTING'
        value = 5;
    case 'EN_KBULK'
        value = 6;
    case 'EN_KWALL'
        value = 7;
    case 'EN_FLOW'
```



```
        value = 8;
    case 'EN_VELOCITY'
        value = 9;
    case 'EN_HEADLOSS'
        value = 10;
    case 'EN_STATUS'
        value = 11;
    case 'EN_SETTING'
        value = 12;
    case 'EN_ENERGY'
        value = 13;

    case 'EN_DURATION'
        value = 0;
    case 'EN_HYDSTEP'
        value = 1;
    case 'EN_QUALSTEP'
        value = 2;
    case 'EN_PATTERNSTEP'
        value = 3;
    case 'EN_PATTERNSTART'
        value = 4;
    case 'EN_REPORTSTEP'
        value = 5;
    case 'EN_REPORTSTART'
        value = 6;
    case 'EN_RULESTEP'
        value = 7;
    case 'EN_STATISTIC'
        value = 8;
    case 'EN_PERIODS'
        value = 9;

    case 'EN_NODECOUNT'
        value = 0;
    case 'EN_TANKCOUNT'
        value = 1;
    case 'EN_LINKCOUNT'
        value = 2;
    case 'EN_PATCOUNT'
        value = 3;
    case 'EN_CURVECOUNT'
        value = 4;
    case 'EN_CONTROLCOUNT'
        value = 5;

    case 'EN_JUNCTION'
        value = 0;
    case 'EN_RESERVOIR'
        value = 1;
    case 'EN_TANK'
        value = 2;
```



```
case 'EN_CVPIPE'  
    value = 0;  
case 'EN_PIPE'  
    value = 1;  
case 'EN_PUMP'  
    value = 2;  
case 'EN_PRV'  
    value = 3;  
case 'EN_PSV'  
    value = 4;  
case 'EN_PBV'  
    value = 5;  
case 'EN_FCV'  
    value = 6;  
case 'EN_TCV'  
    value = 7;  
case 'EN_GPV'  
    value = 8;  
%Quality analysis types  
case 'EN_NONE'  
    value = 0;  
case 'EN_CHEM'  
    value = 1;  
case 'EN_AGE'  
    value = 2;  
case 'EN_TRACE'  
    value = 3;  
  
%Source quality types  
case 'EN_CONCEN'  
    value = 0;  
case 'EN_MASS'  
    value = 1;  
case 'EN_SETPOINT'  
    value = 2;  
case 'EN_FLOWPACED'  
    value = 3;  
  
%Flow units types  
case 'EN_CFS'  
    value = 0;  
case 'EN_GPM'  
    value = 1;  
case 'EN_MGD'  
    value = 2;  
case 'EN_IMGd'  
    value = 3;  
case 'EN_AFD'  
    value = 4;  
case 'EN_LPS'  
    value = 5;  
case 'EN_LPM'  
    value = 6;
```



```
case 'EN_MLD'
    value = 7;
case 'EN_CMH'
    value = 8;
case 'EN_CMD'
    value = 9;
% Misc. options
case 'EN_TRIALS'
    value = 0;
case 'EN_ACCURACY'
    value = 1;
case 'EN_TOLERANCE'
    value = 2;
case 'EN_EMITEXPON'
    value = 3;
case 'EN_DEMANDMULT'
    value = 4;
% Control types
case 'EN_LOWLEVEL'
    value = 0;
case 'EN_HILEVEL'
    value = 1;
case 'EN_TIMER'
    value = 2;
case 'EN_TIMEOFDAY'
    value = 3;
% Time statistic types
case 'EN_AVERAGE'
    value = 1;
case 'EN_MINIMUM'
    value = 2;
case 'EN_MAXIMUM'
    value = 3;
case 'EN_RANGE'
    value = 4;
% Save-results-to-file flag
case 'EN_NOSAVE'
    value = 0;
case 'EN_SAVE'
    value = 1;
% Re-initialize flow flag
case 'EN_INITFLOW'
    value = 10;
end

if ~(value + 1)
    fprintf('Could not retrieve EPANET code for ''%s''.\n', en_constant);
end
```



- **epanetclose.m**

```
%----- BEGIN CODE -----  
  
% Close EPANET ...  
[errorcode] = calllib('epanet2', 'ENclose');  
if (errorcode) fprintf('EPANET error occurred. Code %g\n',  
    num2str(errorcode)); end  
  
    if libisloaded('epanet2') unloadlibrary('epanet2'); end
```



Figura para la determinación de la presión. (S. Inglés)

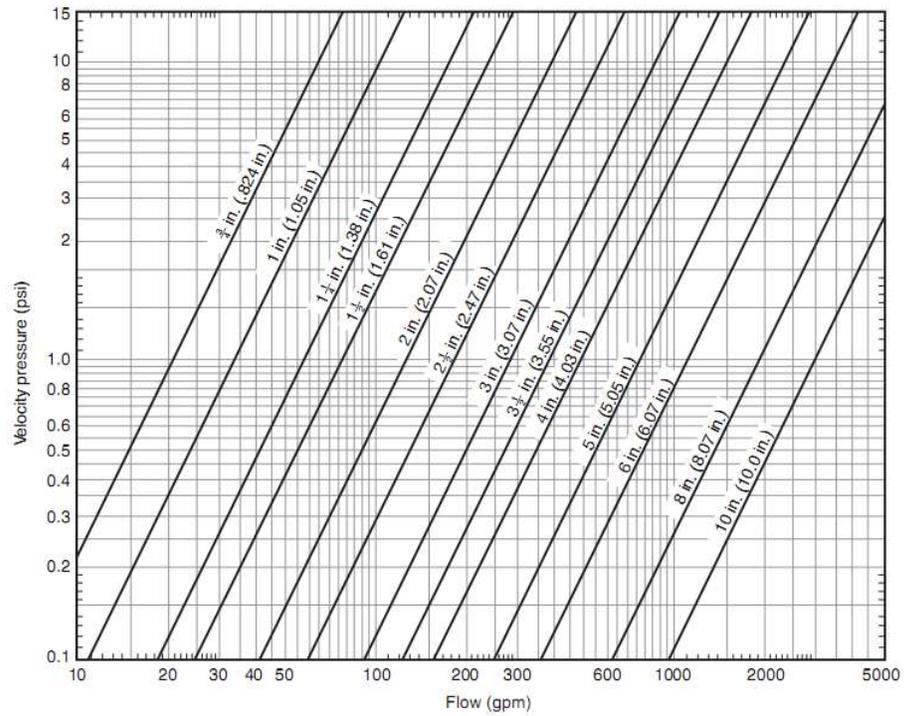
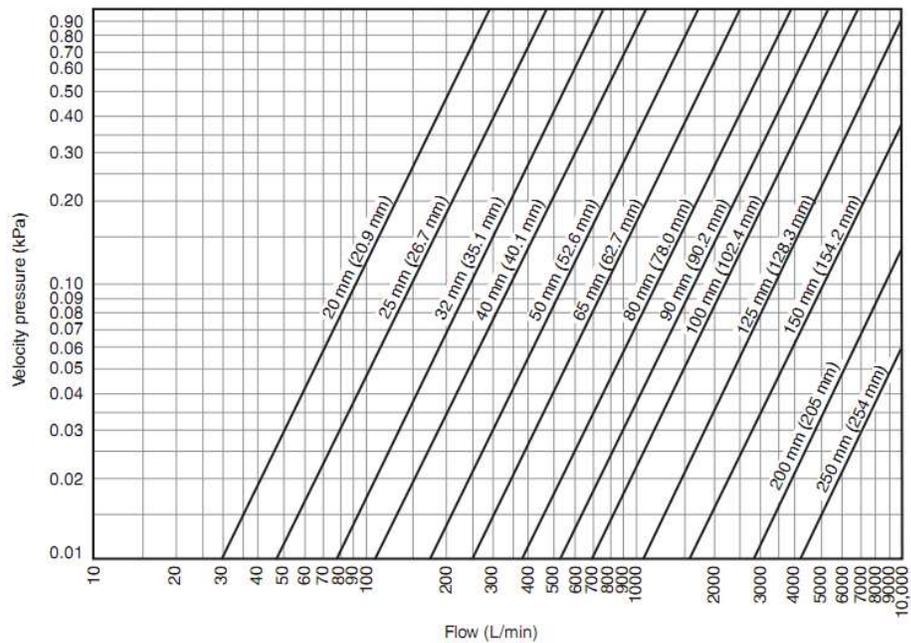


Figura para la determinación de la presión. (S. Internacional)





### Flujo teórico a través de orificios circulares<sup>25</sup>

This table may be computed from the formula  $Q = 29.84cd^2\sqrt{h}$  ( $Q = 0.0666cd^2\sqrt{h}$ ) with  $c = 1.00$ . The theoretical discharge from seawater, as from fireboat nozzles, may be found by subtracting 1 percent from the figures in the following table or from the value computed using the formulas.

When pressures are read with a Pitot gage at a nozzle, the nozzle discharge in most cases will correspond to the values in the table within a range of 1 to 3 percent for nozzles up to 1½ in. (38 mm) in diameter. For larger diameter nozzles, the principles discussed in "Nozzle Method of Measuring Flow" in this chapter of the handbook apply. Appropriate coefficients should be applied where it is read from a hydrant outlet. Where more accurate results are required, a coefficient appropriate to the particular nozzle must be selected and applied to the figures of the table.

The discharge from circular openings of sizes other than those in the table may readily be computed by applying the principles that quantity discharged under a given head varies as the square of the diameter of the opening.

Pressure psi (kPa)	Velocity ft/sec (m/sec)	Orifice Diameter in. (mm)																					
		0.375 (9.53)	0.5 (12.7)	0.625 (15.9)	0.75 (19.1)	0.875 (22.2)	1 (25.4)	1.125 (28.6)	1.25 (31.8)	1.5 (38.1)	1.75 (44.5)	2 (50.8)	2.25 (57.2)	2.375 (60.3)	2.5 (63.5)	2.625 (66.7)	2.75 (69.9)	3 (76.2)	3.25 (82.6)	3.5 (88.9)	3.75 (95.25)	4 (102)	4.5 (114)
1	12.2	4.20	7.46	11.7	16.8	22.8	29.8	37.8	46.6	67.1	91.4	119	151	168	187	206	226	269	315	366	420	477	604
(6.89)	(3.71)	(15.9)	(28.2)	(44.1)	(63.4)	(86.4)	(113)	(143)	(176)	(254)	(345)	(451)	(571)	(636)	(705)	(777)	(853)	(1020)	(1190)	(1380)	(1590)	(1800)	(2280)
2	17.2	5.93	10.6	16	23.7	32.3	42.2	53.4	65.9	95.0	129	169	214	238	264	291	319	380	446	517	593	675	855
(13.8)	(5.25)	(22.4)	(39.9)	(62.4)	(89.8)	(122)	(160)	(202)	(249)	(359)	(489)	(638)	(808)	(900)	(998)	(1100)	(1210)	(1440)	(1690)	(1960)	(2240)	(2550)	(3230)
3	21.1	7.27	12.9	20.2	29.1	39.6	51.7	65.4	80.8	116	158	207	262	292	323	356	391	465	546	633	727	827	1050
(20.7)	(6.43)	(27.5)	(48.9)	(76.4)	(110)	(150)	(195)	(247)	(305)	(440)	(599)	(782)	(990)	(1100)	(1220)	(1350)	(1480)	(1760)	(2060)	(2390)	(2750)	(3130)	(3960)
4	24.4	8.39	14.9	23.3	33.6	45.7	59.7	75.5	93.3	134	183	239	302	337	373	411	451	537	630	731	839	955	1210
(27.6)	(7.43)	(31.7)	(56.4)	(88.2)	(127)	(173)	(226)	(286)	(353)	(508)	(691)	(903)	(1140)	(1270)	(1410)	(1560)	(1710)	(2030)	(2380)	(2770)	(3170)	(3610)	(4570)
5	27.3	9.38	16.7	26.1	37.5	51.1	66.7	84.4	104	150	204	267	338	376	417	460	505	601	705	817	938	1070	1350
(34.5)	(8.31)	(35.5)	(63.1)	(98.6)	(142)	(193)	(252)	(319)	(394)	(568)	(773)	(1010)	(1280)	(1420)	(1580)	(1740)	(1910)	(2270)	(2670)	(3090)	(3550)	(4040)	(5110)
6	29.9	10.3	18.3	28.6	41.1	56.0	73.1	92.5	114	164	224	292	370	412	457	504	553	658	772	895	1030	1170	1480
(41.4)	(9.10)	(38.9)	(69.1)	(108)	(156)	(212)	(276)	(350)	(432)	(622)	(847)	(1110)	(1400)	(1560)	(1730)	(1910)	(2090)	(2490)	(2920)	(3390)	(3890)	(4420)	(5600)
7	32.3	11.1	19.7	30.8	44.4	60.4	78.9	100	123	178	242	316	400	445	493	544	597	711	834	967	1110	1260	1600
(48.3)	(9.83)	(42.0)	(74.7)	(117)	(168)	(229)	(299)	(378)	(467)	(672)	(915)	(1190)	(1510)	(1680)	(1870)	(2060)	(2260)	(2690)	(3150)	(3660)	(4200)	(4780)	(6050)
8	34.5	11.9	21.1	33.0	47.5	64.6	84.4	107	132	190	258	338	427	476	528	582	638	760	891	1030	1190	1350	1710
(55.2)	(10.5)	(44.9)	(79.8)	(125)	(180)	(244)	(319)	(404)	(499)	(718)	(978)	(1280)	(1620)	(1800)	(2000)	(2200)	(2410)	(2870)	(3370)	(3910)	(4490)	(5110)	(6460)
9	36.6	12.6	22.4	35.0	50.4	68.5	89.5	113	140	201	274	358	453	505	560	617	677	806	946	1100	1260	1430	1810
(62.0)	(11.1)	(47.6)	(84.6)	(132)	(190)	(259)	(338)	(428)	(529)	(761)	(1040)	(1350)	(1710)	(1910)	(2110)	(2330)	(2560)	(3040)	(3570)	(4140)	(4760)	(5410)	(6850)
10	38.6	13.3	23.6	36.9	53.1	72.2	94.4	119	147	212	289	377	478	532	590	650	714	849	997	1160	1330	1510	1910
(68.9)	(11.7)	(50.2)	(89.2)	(139)	(201)	(273)	(357)	(451)	(557)	(802)	(1090)	(1430)	(1810)	(2010)	(2230)	(2460)	(2700)	(3210)	(3770)	(4370)	(5020)	(5710)	(7220)
11	40.4	13.9	24.7	38.7	55.7	75.8	99.0	125	155	223	303	396	501	558	619	682	748	891	1050	1210	1390	1580	2000
(75.8)	(12.3)	(52.6)	(93.5)	(146)	(210)	(286)	(374)	(473)	(585)	(842)	(1150)	(1500)	(1890)	(2110)	(2340)	(2580)	(2830)	(3370)	(3950)	(4580)	(5260)	(5990)	(7580)
12	42.2	14.5	25.8	40.4	58.1	79.1	103	131	162	233	317	413	523	583	646	712	782	930	1090	1270	1450	1650	2090
(82.7)	(12.9)	(54.9)	(97.7)	(153)	(220)	(299)	(391)	(495)	(611)	(879)	(1200)	(1560)	(1980)	(2200)	(2440)	(2690)	(2950)	(3520)	(4130)	(4790)	(5490)	(6250)	(7910)
13	44.0	15.1	26.9	42.0	60.5	82.4	108	136	168	242	329	430	545	607	672	741	814	968	1140	1320	1510	1720	2180
(89.6)	(13.4)	(57.2)	(102)	(159)	(229)	(311)	(407)	(515)	(636)	(915)	(1250)	(1630)	(2060)	(2290)	(2540)	(2800)	(3080)	(3660)	(4300)	(4980)	(5720)	(6510)	(8240)
14	45.6	15.7	27.9	43.6	62.8	85.5	112	141	174	251	342	447	565	630	698	769	844	1000	1180	1370	1570	1790	2260
(96.5)	(13.9)	(59.4)	(106)	(165)	(237)	(323)	(422)	(534)	(660)	(950)	(1290)	(1690)	(2140)	(2380)	(2640)	(2910)	(3190)	(3800)	(4460)	(5170)	(5940)	(6750)	(8550)
15	47.2	16.3	28.9	45.1	65.0	88.5	116	146	181	260	354	462	585	652	722	796	874	1040	1220	1420	1630	1850	2340
(103)	(14.4)	(61.3)	(109)	(170)	(245)	(334)	(436)	(552)	(681)	(981)	(1340)	(1740)	(2210)	(2460)	(2730)	(3000)	(3300)	(3920)	(4610)	(5340)	(6130)	(6980)	(8830)
16	48.8	16.8	29.8	46.6	67.1	91.4	119	151	187	269	366	477	604	673	746	822	903	1070	1260	1460	1680	1910	2420
(110)	(14.8)	(63.4)	(113)	(176)	(253)	(345)	(451)	(570)	(704)	(1010)	(1380)	(1800)	(2280)	(2540)	(2820)	(3110)	(3410)	(4060)	(4760)	(5520)	(6340)	(7210)	(9130)
17	50.3	17.3	30.8	48.1	69.2	94.2	123	156	192	277	377	492	623	694	769	848	930	1110	1300	1510	1730	1970	2490
(117)	(15.3)	(65.4)	(116)	(182)	(261)	(356)	(465)	(588)	(726)	(1050)	(1420)	(1860)	(2350)	(2620)	(2900)	(3200)	(3510)	(4180)	(4910)	(5690)	(6540)	(7440)	(9410)

(continued)

<sup>25</sup> LINDER, Kenneth W. Water Supplies for Fixed Fire Protection. Chapter 3. Hydraulics for Fire Protection.



Pressure psi (kPa)	Velocity ft/sec (m/sec)	0.375	0.5	0.625	0.75	0.875	1	1.125	1.25	1.5	1.75	2	2.25	2.375	2.5	2.625	2.75	3	3.25	3.5	3.75	4	4.5
		(9.53)	(12.7)	(15.9)	(19.1)	(22.2)	(25.4)	(28.6)	(31.8)	(38.1)	(44.5)	(50.8)	(57.2)	(60.3)	(63.5)	(66.7)	(69.9)	(76.2)	(82.6)	(88.9)	(95.25)	(102)	(114)
18	51.7	17.8	31.7	49.5	71.2	96.9	127	160	198	285	388	506	641	714	791	872	957	1140	1340	1550	1780	2,030	2,560
(124)	(15.7)	(67.3)	(120)	(187)	(269)	(366)	(478)	(606)	(748)	(1080)	(1470)	(1910)	(2420)	(2700)	(2990)	(3300)	(3620)	(4310)	(5050)	(5860)	(6730)	(7,660)	(9,690)
19	53.1	18.3	32.5	50.8	73.2	100	130	165	203	293	398	520	658	734	813	896	984	1170	1370	1590	1830	2,080	2,630
(131)	(16.2)	(69.2)	(123)	(192)	(277)	(377)	(492)	(622)	(768)	(1110)	(1510)	(1970)	(2490)	(2770)	(3070)	(3390)	(3720)	(4430)	(5190)	(6020)	(6920)	(7,870)	(9,960)
20	54.5	18.8	33.4	52.1	75.1	102	133	169	209	300	409	534	676	753	834	920	1010	1200	1410	1630	1880	2,140	2,700
(138)	(16.6)	(71.0)	(126)	(197)	(284)	(386)	(505)	(639)	(789)	(1140)	(1550)	(2020)	(2560)	(2850)	(3150)	(3480)	(3820)	(4540)	(5330)	(6180)	(7100)	(8,080)	(10,200)
21	55.9	19.2	34.2	53.4	76.9	105	137	173	214	308	419	547	692	771	855	942	1030	1230	1440	1680	1920	2,190	2,770
(145)	(17.0)	(72.8)	(129)	(202)	(291)	(396)	(517)	(655)	(808)	(1160)	(1580)	(2070)	(2620)	(2920)	(3230)	(3570)	(3910)	(4660)	(5470)	(6340)	(7280)	(8,280)	(10,500)
22	57.2	19.7	35.0	54.7	78.7	107	140	177	219	315	429	560	709	789	875	964	1060	1260	1480	1710	1970	2,240	2,830
(152)	(17.4)	(74.5)	(132)	(207)	(298)	(406)	(530)	(670)	(828)	(1190)	(1620)	(2120)	(2680)	(2990)	(3310)	(3650)	(4010)	(4770)	(5600)	(6490)	(7450)	(8,480)	(10,700)
23	58.5	20.1	35.8	55.9	80.5	110	143	181	224	322	438	572	724	807	894	986	1080	1290	1510	1750	2010	2,290	2,900
(159)	(17.8)	(76.2)	(135)	(212)	(305)	(415)	(542)	(686)	(847)	(1220)	(1660)	(2170)	(2740)	(3060)	(3390)	(3730)	(4100)	(4880)	(5720)	(6640)	(7620)	(8,670)	(11,000)
24	59.7	20.6	36.5	57.1	82.2	112	146	185	228	329	448	585	740	825	914	1010	1110	1320	1540	1790	2060	2,340	2,960
(165)	(18.2)	(77.6)	(138)	(216)	(310)	(423)	(552)	(699)	(862)	(1240)	(1690)	(2210)	(2790)	(3110)	(3450)	(3800)	(4170)	(4970)	(5830)	(6760)	(7760)	(8,830)	(11,200)
25	61.0	21.0	37.3	58.3	83.9	114	149	189	233	336	457	597	755	842	933	1030	1130	1340	1580	1830	2100	2,390	3,020
(172)	(18.5)	(79.2)	(141)	(220)	(317)	(431)	(564)	(713)	(880)	(1270)	(1730)	(2250)	(2850)	(3180)	(3520)	(3880)	(4260)	(5070)	(5950)	(6900)	(7920)	(9,020)	(11,400)
26	62.2	21.4	38.0	59.4	85.6	116	152	193	238	342	466	609	770	858	951	1050	1150	1370	1610	1860	2140	2,430	3,080
(179)	(18.9)	(80.8)	(144)	(225)	(323)	(440)	(575)	(728)	(898)	(1290)	(1761)	(2299)	(2910)	(3240)	(3590)	(3960)	(4350)	(5170)	(6070)	(7040)	(8080)	(9,200)	(11,600)
27	63.3	21.8	38.8	60.6	87.2	119	155	196	242	349	475	620	785	875	969	1070	1170	1400	1640	1900	2180	2,480	3,140
(186)	(19.3)	(82.4)	(147)	(229)	(330)	(449)	(586)	(742)	(916)	(1320)	(1795)	(2344)	(2970)	(3310)	(3660)	(4040)	(4430)	(5270)	(6190)	(7180)	(8240)	(9,380)	(11,900)
28	64.5	22.2	39.5	61.7	88.8	121	158	200	247	355	484	632	799	891	987	1090	1190	1420	1670	1930	2220	2,530	3,200
(193)	(19.6)	(83.9)	(149)	(233)	(336)	(457)	(597)	(755)	(933)	(1340)	(1830)	(2390)	(3020)	(3370)	(3730)	(4110)	(4510)	(5370)	(6310)	(7310)	(8390)	(9,550)	(12,100)
29	65.7	22.6	40.2	62.8	90.4	123	161	203	251	362	492	643	814	906	1004	1110	1220	1450	1700	1970	2260	2,570	3,250
(200)	(20.0)	(85.5)	(152)	(237)	(342)	(465)	(608)	(769)	(949)	(1370)	(1860)	(2430)	(3080)	(3430)	(3800)	(4190)	(4600)	(5470)	(6420)	(7440)	(8550)	(9,720)	(12,300)
30	66.8	23.0	40.9	63.8	91.9	125	163	207	255	368	501	654	827	922	1020	1130	1240	1470	1730	2000	2300	2,620	3,310
(207)	(20.3)	(86.9)	(155)	(241)	(348)	(473)	(618)	(782)	(966)	(1390)	(1890)	(2470)	(3130)	(3490)	(3860)	(4260)	(4680)	(5560)	(6530)	(7570)	(8690)	(9,890)	(12,500)
31	67.9	23.4	41.5	64.9	93.5	127	166	210	260	374	509	665	841	937	1040	1140	1260	1500	1750	2040	2340	2,660	3,360
(214)	(20.7)	(88.4)	(157)	(246)	(354)	(481)	(629)	(796)	(982)	(1410)	(1920)	(2510)	(3180)	(3550)	(3930)	(4330)	(4750)	(5660)	(6640)	(7700)	(8840)	(10,100)	(12,700)
32	69.0	23.7	42.2	65.9	95.0	129	169	214	264	380	517	675	855	952	1060	1160	1280	1520	1780	2070	2370	2,700	3,420
(221)	(21.0)	(89.8)	(160)	(250)	(359)	(489)	(639)	(808)	(998)	(1440)	(1960)	(2560)	(3230)	(3600)	(3990)	(4400)	(4830)	(5750)	(6750)	(7820)	(8980)	(10,200)	(12,900)
33	70.0	24.1	42.9	67.0	96.4	131	171	217	268	386	525	686	868	967	1070	1180	1300	1540	1810	2100	2410	2,740	3,470
(228)	(21.4)	(91.2)	(162)	(253)	(365)	(497)	(649)	(821)	(1014)	(1460)	(1990)	(2600)	(3280)	(3660)	(4050)	(4470)	(4910)	(5840)	(6850)	(7950)	(9120)	(10,400)	(13,100)
34	71.1	24.5	43.5	68.0	97.9	133	174	220	272	391	533	696	881	981	1090	1200	1320	1570	1840	2130	2450	2,780	3,520
(234)	(21.6)	(92.4)	(164)	(257)	(370)	(503)	(657)	(832)	(1030)	(1480)	(2010)	(2630)	(3330)	(3710)	(4110)	(4530)	(4970)	(5920)	(6940)	(8050)	(9240)	(10,500)	(13,300)
35	72.1	24.8	44.1	69.0	99.3	135	177	223	276	397	541	706	894	996	1100	1220	1340	1590	1860	2160	2480	2,820	3,570
(241)	(22.0)	(93.8)	(167)	(261)	(375)	(511)	(667)	(844)	(1040)	(1500)	(2040)	(2670)	(3380)	(3760)	(4170)	(4600)	(5040)	(6000)	(7050)	(8170)	(9380)	(10,700)	(13,500)
36	73.1	25.2	44.8	69.9	101	137	179	227	280	403	548	716	906	1010	1120	1230	1350	1610	1890	2190	2520	2,860	3,630
(248)	(22.3)	(95.2)	(169)	(264)	(381)	(518)	(677)	(856)	(1060)	(1520)	(2070)	(2710)	(3430)	(3820)	(4230)	(4660)	(5120)	(6090)	(7150)	(8290)	(9520)	(10,800)	(13,700)
37	74.2	25.5	45.4	70.9	102	139	182	230	284	408	556	726	919	1020	1130	1250	1370	1630	1920	2220	2550	2,900	3,680
(255)	(22.6)	(96.5)	(172)	(268)	(386)	(525)	(686)	(868)	(1070)	(1540)	(2100)	(2740)	(3470)	(3870)	(4290)	(4730)	(5190)	(6180)	(7250)	(8410)	(9650)	(11,000)	(13,900)
38	75.2	25.9	46.0	71.9	103	141	184	233	287	414	563	736	931	1040	1150	1270	1390	1660	1940	2250	2590	2,940	3,720
(262)	(22.9)	(97.8)	(174)	(272)	(391)	(532)	(695)	(880)	(1090)	(1560)	(2130)	(2780)	(3520)	(3920)	(4350)	(4790)	(5260)	(6260)	(7350)	(8520)	(9780)	(11,100)	(14,100)
39	76.1	26.2	46.6	72.8	105	143	186	236	291	419	571	745	943	1050	1160	1280	1410	1680	1970	2280	2620	2,980	3,770
(269)	(23.2)	(99.1)	(176)	(275)	(396)	(540)	(705)	(892)	(1100)	(1590)	(2160)	(2820)	(3570)	(3980)	(4400)	(4860)	(5330)	(6340)	(7440)	(8630)	(9910)	(11,300)	(14,300)



40	77.1	26.3	47.2	73.7	106	144	189	239	295	425	578	755	955	1060	1180	1300	1430	1700	1,990	2,310	2,650	3,020	3,820
(276)	(23.5)	(100)	(178)	(279)	(402)	(547)	(714)	(903)	(1120)	(1610)	(2190)	(2860)	(3610)	(4030)	(4460)	(4920)	(5400)	(6420)	(7,540)	(8,740)	(10,000)	(11,400)	(14,500)
41	78.1	26.9	47.8	74.6	107	146	191	242	299	430	585	764	967	1080	1190	1320	1440	1720	2,020	2,340	2,690	3,060	3,870
(283)	(23.8)	(102)	(181)	(282)	(407)	(553)	(723)	(915)	(1130)	(1630)	(2210)	(2890)	(3660)	(4080)	(4520)	(4980)	(5470)	(6510)	(7,630)	(8,850)	(10,200)	(11,600)	(14,600)
42	79.0	27.2	48.3	75.5	109	148	193	245	302	435	592	774	979	1090	1210	1330	1460	1740	2,040	2,370	2,720	3,090	3,920
(290)	(24.1)	(103)	(183)	(286)	(412)	(560)	(732)	(926)	(1140)	(1650)	(2240)	(2930)	(3700)	(4130)	(4570)	(5040)	(5530)	(6590)	(7,730)	(8,960)	(10,300)	(11,700)	(14,800)
43	79.9	27.5	48.9	76.4	110	150	196	248	306	440	599	783	991	1100	1220	1350	1480	1760	2,070	2,400	2,750	3,130	3,960
(297)	(24.4)	(104)	(185)	(289)	(417)	(567)	(740)	(937)	(1160)	(1670)	(2270)	(2960)	(3750)	(4180)	(4630)	(5100)	(5600)	(6660)	(7,820)	(9,070)	(10,400)	(11,800)	(15,000)
44	80.9	27.8	49.5	77.3	111	152	198	251	309	445	606	792	1000	1120	1240	1360	1500	1780	2,090	2,420	2,780	3,170	4,010
(303)	(24.6)	(105)	(187)	(292)	(421)	(573)	(748)	(947)	(1170)	(1680)	(2290)	(2990)	(3790)	(4220)	(4670)	(5150)	(5660)	(6730)	(7,900)	(9,160)	(10,500)	(12,000)	(15,100)
45	81.8	28.1	50.0	78.2	113	153	200	253	313	450	613	801	1010	1130	1250	1380	1510	1800	2,110	2,450	2,810	3,200	4,050
(310)	(24.9)	(106)	(189)	(296)	(426)	(579)	(757)	(957)	(1180)	(1700)	(2320)	(3030)	(3830)	(4270)	(4730)	(5210)	(5720)	(6810)	(7,990)	(9,270)	(10,600)	(12,100)	(15,300)
46	82.7	28.5	50.6	79.1	114	155	202	256	316	455	620	810	1020	1140	1260	1390	1530	1820	2,140	2,480	2,850	3,240	4,100
(317)	(25.2)	(108)	(191)	(299)	(430)	(586)	(765)	(968)	(1200)	(1720)	(2340)	(3060)	(3870)	(4320)	(4780)	(5270)	(5790)	(6890)	(8,080)	(9,370)	(10,800)	(12,200)	(15,500)
47	83.6	28.8	51.1	79.9	115	157	205	259	320	460	627	818	1030	1150	1280	1410	1550	1840	2,160	2,510	2,880	3,270	4,140
(324)	(25.5)	(109)	(193)	(302)	(435)	(592)	(773)	(979)	(1210)	(1740)	(2370)	(3090)	(3920)	(4360)	(4830)	(5330)	(5850)	(6960)	(8,170)	(9,470)	(10,900)	(12,400)	(15,700)
48	84.5	29.1	51.7	80.8	116	158	207	262	323	465	633	827	1050	1170	1290	1420	1560	1860	2,180	2,530	2,910	3,310	4,190
(331)	(25.7)	(110)	(195)	(305)	(440)	(599)	(782)	(989)	(1220)	(1760)	(2390)	(3130)	(3960)	(4410)	(4890)	(5390)	(5910)	(7040)	(8,260)	(9,580)	(11,000)	(12,500)	(15,800)
49	85.3	29.4	52.2	81.6	117	160	209	264	326	470	640	836	1060	1180	1310	1440	1580	1880	2,210	2,560	2,940	3,340	4,230
(338)	(26.0)	(111)	(197)	(309)	(444)	(605)	(790)	(1000)	(1230)	(1780)	(2420)	(3160)	(4000)	(4460)	(4940)	(5440)	(5970)	(7110)	(8,340)	(9,680)	(11,100)	(12,600)	(16,000)
50	86.2	29.7	52.8	82.4	119	162	211	267	330	475	646	844	1070	1190	1320	1450	1600	1900	2,230	2,580	2,970	3,380	4,270
(345)	(26.3)	(112)	(200)	(312)	(449)	(611)	(798)	(1010)	(1250)	(1800)	(2440)	(3190)	(4040)	(4500)	(4990)	(5500)	(6040)	(7180)	(8,430)	(9,780)	(11,200)	(12,800)	(16,200)
52	87.9	30.3	53.8	84.1	121	165	215	272	336	484	659	861	1090	1210	1340	1480	1630	1940	2,270	2,640	3,030	3,440	4,360
(358)	(26.8)	(114)	(203)	(318)	(457)	(622)	(813)	(1030)	(1270)	(1830)	(2490)	(3250)	(4120)	(4590)	(5080)	(5600)	(6150)	(7320)	(8,590)	(9,960)	(11,400)	(13,000)	(16,500)
54	89.6	30.8	54.8	85.7	123	168	219	278	343	493	672	877	1110	1240	1370	1510	1660	1970	2,320	2,690	3,080	3,510	4,440
(372)	(27.3)	(117)	(207)	(324)	(466)	(634)	(829)	(1050)	(1290)	(1860)	(2540)	(3310)	(4200)	(4670)	(5180)	(5710)	(6270)	(7460)	(8,750)	(10,200)	(11,700)	(13,300)	(16,800)
56	91.2	31.4	55.8	87.2	126	171	223	283	349	502	684	893	1130	1260	1400	1540	1690	2010	2,360	2,740	3,140	3,570	4,520
(386)	(27.8)	(119)	(211)	(330)	(475)	(646)	(844)	(1070)	(1320)	(1900)	(2590)	(3380)	(4270)	(4760)	(5280)	(5820)	(6380)	(7600)	(8,920)	(10,300)	(11,900)	(13,500)	(17,100)
58	92.8	32.0	56.8	88.8	128	174	227	288	355	511	696	909	1150	1280	1420	1570	1720	2050	2,400	2,780	3,200	3,640	4,600
(400)	(28.3)	(121)	(215)	(336)	(483)	(658)	(859)	(1090)	(1340)	(1930)	(2630)	(3440)	(4350)	(4850)	(5370)	(5920)	(6500)	(7730)	(9,080)	(10,500)	(12,100)	(13,700)	(17,400)
60	94.4	32.5	57.8	90.3	130	177	231	293	361	520	708	925	1170	1300	1440	1590	1750	2080	2,440	2,830	3,250	3,700	4,680
(414)	(28.8)	(123)	(219)	(342)	(492)	(669)	(874)	(1110)	(1370)	(1970)	(2680)	(3500)	(4430)	(4930)	(5460)	(6020)	(6610)	(7870)	(9,230)	(10,700)	(12,300)	(14,000)	(17,700)
62	96.0	33.0	58.7	91.8	132	180	235	297	367	528	719	940	1190	1330	1470	1620	1780	2110	2,480	2,880	3,300	3,760	4,760
(427)	(29.2)	(125)	(222)	(347)	(499)	(680)	(888)	(1120)	(1390)	(2000)	(2720)	(3550)	(4490)	(5010)	(5550)	(6120)	(6710)	(7990)	(9,380)	(10,900)	(12,500)	(14,200)	(18,000)
64	97.5	33.6	59.7	93.3	134	183	239	302	373	537	731	955	1210	1350	1490	1640	1810	2150	2,520	2,920	3,360	3,820	4,830
(441)	(29.7)	(127)	(226)	(352)	(508)	(691)	(902)	(1140)	(1410)	(2030)	(2760)	(3610)	(4570)	(5090)	(5640)	(6220)	(6820)	(8120)	(9,530)	(11,100)	(12,700)	(14,400)	(18,300)
66	99.0	34.1	60.6	94.7	136	186	242	307	379	545	742	970	1230	1370	1520	1670	1830	2180	2,560	2,970	3,410	3,880	4,910
(455)	(30.2)	(129)	(229)	(358)	(516)	(702)	(917)	(1160)	(1430)	(2060)	(2810)	(3670)	(4640)	(5170)	(5730)	(6320)	(6930)	(8250)	(9,680)	(11,200)	(12,900)	(14,700)	(18,600)
68	101	34.6	61.5	96.1	138	188	246	311	384	554	754	984	1250	1390	1540	1700	1860	2210	2,600	3,010	3,460	3,940	4,980
(469)	(30.6)	(131)	(233)	(363)	(523)	(712)	(931)	(1180)	(1450)	(2090)	(2850)	(3720)	(4710)	(5250)	(5820)	(6410)	(7040)	(8370)	(9,830)	(11,400)	(13,100)	(14,900)	(18,800)
70	102	35.1	62.4	97.5	140	191	250	316	390	562	765	999	1260	1410	1560	1720	1890	2250	2,640	3,060	3,510	3,990	5,060
(483)	(31.1)	(133)	(236)	(369)	(531)	(723)	(944)	(1200)	(1480)	(2120)	(2890)	(3780)	(4780)	(5330)	(5900)	(6510)	(7140)	(8500)	(9,970)	(11,600)	(13,300)	(15,100)	(19,100)
72	103	35.6	63.3	98.9	142	194	253	320	396	570	775	1010	1280	1430	1580	1740	1910	2280	2,670	3,100	3,560	4,050	5,130
(496)	(31.5)	(135)	(239)	(374)	(538)	(733)	(957)	(1210)	(1500)	(2150)	(2930)	(3830)	(4840)	(5400)	(5980)	(6590)	(7240)	(8610)	(10,100)	(11,700)	(13,500)	(15,300)	(19,400)
74	105	36.1	64.2	100	144	197	257	325	401	578	786	1030	1300	1450	1600	1770	1940	2310	2,710	3,140	3,610	4,110	5,200
(510)	(31.9)	(136)	(243)	(379)	(546)	(743)	(970)	(1230)	(1520)	(2180)	(2970)	(3880)	(4910)	(5470)	(6060)	(6690)	(7340)	(8730)	(10,200)	(11,900)	(13,600)	(15,500)	(19,600)
76	106	36.6	65.0	102	146	199	260	329	406	585	797	1040	1320	1470	1630	1790	1970	2340	2,750	3,190	3,660	4,160	5,270
(524)	(32.4)	(138)	(246)	(384)	(553)	(753)	(984)	(1240)	(1540)	(2210)	(3010)	(3930)	(4980)	(5550)	(6150)	(6800)	(7440)	(8850)	(10,400)	(12,000)	(13,800)	(15,700)	(19,900)
78	108	37.1	65.9	103	148	202	264	334	412	593	807	1050	1330	1490	1650	1820	1990	2370	2,780	3,230	3,710	4,220	5,340
(538)	(32.8)	(140)	(249)	(389)	(561)	(763)	(997)	(1260)	(1560)	(2240)	(3050)	(3990)	(5050)	(5620)	(6230)	(6870)	(7540)	(8970)	(10,500)	(12,200)	(14,000)	(15,900)	(20,200)



	Pressure psi (kPa)	Velocity ft/sec (m/sec)	0.375	0.5	0.625	0.75	0.875	1	1.125	1.25	1.5	1.75	2	2.25	2.375	2.5	2.625	2.75	3	3.25	3.5	3.75	4	4.5
			(9.53)	(12.7)	(15.9)	(19.1)	(22.2)	(25.4)	(28.6)	(31.8)	(38.1)	(44.5)	(50.8)	(57.2)	(60.3)	(63.5)	(66.7)	(69.9)	(76.2)	(82.6)	(88.9)	(95.25)	(102)	(114)
80	109	37.5	66.7	104	150	204	267	338	417	601	817	1070	1350	1510	1670	1840	2,020	2,400	2,820	3,270	3,750	4,270	5,400	
(552)	(33.2)	(142)	(252)	(394)	(568)	(773)	(1010)	(1280)	(1580)	(2270)	(3090)	(4040)	(5110)	(5690)	(6310)	(6960)	(7,630)	(9,090)	(10,700)	(12,400)	(14,200)	(16,200)	(20,400)	
82	110	38.0	67.6	106	152	207	270	342	422	608	828	1080	1370	1520	1690	1860	2,040	2,430	2,850	3,310	3,800	4,320	5,470	
(565)	(33.6)	(144)	(255)	(399)	(574)	(782)	(1020)	(1290)	(1600)	(2300)	(3130)	(4090)	(5170)	(5760)	(6380)	(7040)	(7,720)	(9,190)	(10,800)	(12,500)	(14,400)	(16,300)	(20,700)	
84	112	38.5	68.4	107	154	209	273	346	427	615	838	1090	1380	1540	1710	1880	2,070	2,460	2,890	3,350	3,850	4,380	5,540	
(579)	(34.0)	(145)	(258)	(404)	(582)	(792)	(1030)	(1310)	(1620)	(2330)	(3170)	(4140)	(5230)	(5830)	(6460)	(7120)	(7,820)	(9,310)	(10,900)	(12,700)	(14,500)	(16,500)	(20,900)	
86	113	38.9	69.2	108	156	212	277	350	432	623	847	1110	1400	1560	1730	1910	2,090	2,490	2,920	3,390	3,890	4,430	5,600	
(593)	(34.4)	(147)	(262)	(409)	(589)	(801)	(1050)	(1320)	(1630)	(2350)	(3200)	(4190)	(5300)	(5900)	(6540)	(7210)	(7,910)	(9,420)	(11,100)	(12,800)	(14,700)	(16,700)	(21,200)	
88	114	39.4	70.0	109	157	214	280	354	437	630	857	1120	1420	1580	1750	1930	2,120	2,520	2,960	3,430	3,940	4,480	5,670	
(607)	(34.8)	(149)	(265)	(414)	(595)	(810)	(1060)	(1340)	(1650)	(2380)	(3240)	(4230)	(5360)	(5970)	(6620)	(7290)	(8,010)	(9,530)	(11,200)	(13,000)	(14,900)	(16,900)	(21,400)	
90	116	39.8	70.8	111	159	217	283	358	442	637	867	1130	1430	1600	1770	1950	2,140	2,550	2,990	3,470	3,980	4,530	5,730	
(620)	(35.2)	(150)	(267)	(418)	(602)	(819)	(1070)	(1350)	(1670)	(2410)	(3280)	(4280)	(5420)	(6030)	(6690)	(7370)	(8,090)	(9,630)	(11,300)	(13,100)	(15,000)	(17,100)	(21,700)	
92	117	40.2	71.6	112	161	219	286	362	447	644	877	1140	1440	1610	1790	1970	2,160	2,580	3,020	3,510	4,020	4,580	5,800	
(634)	(35.6)	(152)	(270)	(423)	(609)	(828)	(1080)	(1370)	(1690)	(2430)	(3310)	(4330)	(5480)	(6100)	(6760)	(7450)	(8,180)	(9,740)	(11,400)	(13,300)	(15,200)	(17,300)	(21,900)	
94	118	40.7	72.3	113	163	222	289	366	452	651	886	1160	1460	1630	1810	1990	2,190	2,600	3,060	3,540	4,070	4,630	5,860	
(648)	(36.0)	(154)	(273)	(427)	(615)	(837)	(1090)	(1380)	(1710)	(2460)	(3350)	(4380)	(5540)	(6170)	(6840)	(7540)	(8,270)	(9,840)	(11,600)	(13,400)	(15,400)	(17,500)	(22,100)	
96	119	41.1	73.1	114	164	224	292	370	457	658	895	1170	1480	1650	1830	2010	2,210	2,630	3,090	3,580	4,110	4,680	5,920	
(662)	(36.4)	(155)	(276)	(432)	(622)	(846)	(1110)	(1400)	(1730)	(2490)	(3390)	(4420)	(5600)	(6240)	(6910)	(7620)	(8,360)	(9,950)	(11,700)	(13,500)	(15,500)	(17,700)	(22,400)	
98	121	41.5	73.9	115	166	226	295	374	462	665	905	1180	1500	1670	1850	2040	2,230	2,660	3,120	3,620	4,150	4,730	5,980	
(676)	(36.8)	(157)	(279)	(436)	(628)	(855)	(1120)	(1410)	(1750)	(2510)	(3420)	(4470)	(5660)	(6300)	(6980)	(7700)	(8,450)	(10,100)	(11,800)	(13,700)	(15,700)	(17,900)	(22,600)	
100	122	42.0	74.6	117	168	228	298	378	466	671	914	1190	1510	1680	1870	2060	2,260	2,690	3,150	3,660	4,200	4,770	6,040	
(689)	(37.1)	(159)	(282)	(441)	(634)	(864)	(1130)	(1430)	(1760)	(2540)	(3450)	(4510)	(5710)	(6360)	(7050)	(7770)	(8,530)	(10,200)	(11,900)	(13,800)	(15,900)	(18,000)	(22,800)	
105	125	43.0	76.4	119	172	234	306	387	478	688	936	1220	1550	1720	1910	2110	2,310	2,750	3,230	3,750	4,300	4,890	6,190	
(724)	(38.1)	(163)	(289)	(452)	(650)	(885)	(1160)	(1460)	(1810)	(2600)	(3540)	(4620)	(5850)	(6520)	(7230)	(7970)	(8,740)	(10,400)	(12,200)	(14,200)	(16,300)	(18,500)	(23,400)	
110	128	44.0	78.2	122	176	240	313	396	489	704	958	1250	1580	1770	1960	2160	2,370	2,820	3,310	3,830	4,400	5,010	6,340	
(758)	(38.9)	(166)	(296)	(462)	(666)	(906)	(1180)	(1500)	(1850)	(2660)	(3620)	(4730)	(5990)	(6670)	(7400)	(8150)	(8,950)	(10,600)	(12,500)	(14,500)	(16,600)	(18,900)	(24,000)	
115	131	45.0	80.0	125	180	245	320	405	500	720	980	1280	1620	1800	2000	2200	2,420	2,880	3,380	3,920	4,500	5,120	6,480	
(793)	(39.8)	(170)	(302)	(473)	(681)	(926)	(1210)	(1530)	(1890)	(2720)	(3710)	(4840)	(6130)	(6820)	(7560)	(8340)	(9,150)	(10,900)	(12,800)	(14,800)	(17,000)	(19,400)	(24,500)	
120	134	46.0	81.7	128	184	250	327	414	511	735	1000	1310	1650	1840	2040	2250	2,470	2,940	3,450	4,000	4,600	5,230	6,620	
(827)	(40.7)	(174)	(309)	(483)	(695)	(946)	(1240)	(1560)	(1930)	(2780)	(3790)	(4940)	(6260)	(6970)	(7720)	(8520)	(9,350)	(11,100)	(13,100)	(15,100)	(17,400)	(19,800)	(25,000)	
125	136	46.9	83.4	130	188	255	334	422	521	751	1020	1330	1690	1880	2090	2300	2,520	3,000	3,520	4,090	4,690	5,340	6,760	
(862)	(41.5)	(177)	(315)	(493)	(710)	(966)	(1260)	(1600)	(1970)	(2840)	(3860)	(5050)	(6390)	(7120)	(7880)	(8690)	(9,540)	(11,400)	(13,300)	(15,500)	(17,700)	(20,200)	(25,500)	
130	139	47.8	85.1	133	191	260	340	431	532	766	1040	1360	1720	1920	2130	2340	2,570	3,060	3,590	4,170	4,780	5,440	6,890	
(896)	(42.3)	(181)	(322)	(502)	(724)	(985)	(1290)	(1630)	(2010)	(2890)	(3940)	(5150)	(6510)	(7260)	(8040)	(8860)	(9,730)	(11,600)	(13,600)	(15,800)	(18,100)	(20,600)	(26,000)	
135	142	48.8	86.7	135	195	265	347	439	542	780	1060	1390	1760	1960	2170	2390	2,620	3,120	3,660	4,250	4,880	5,550	7,020	
(931)	(43.1)	(184)	(328)	(512)	(737)	(1000)	(1310)	(1660)	(2050)	(2950)	(4010)	(5240)	(6640)	(7390)	(8190)	(9030)	(9,910)	(11,800)	(13,800)	(16,100)	(18,400)	(21,000)	(26,500)	
140	144	49.7	88.3	138	199	270	353	447	552	794	1080	1410	1790	1990	2210	2430	2,670	3,180	3,730	4,330	4,970	5,650	7,150	
(965)	(43.9)	(188)	(334)	(521)	(751)	(1020)	(1330)	(1690)	(2090)	(3000)	(4090)	(5340)	(6760)	(7530)	(8340)	(9200)	(10,100)	(12,000)	(14,100)	(16,400)	(18,800)	(21,400)	(27,000)	
145	147	50.5	89.8	140	202	275	359	455	561	808	1100	1440	1820	2030	2250	2480	2,720	3,230	3,800	4,400	5,050	5,750	7,280	
(1000)	(44.7)	(191)	(340)	(531)	(764)	(1040)	(1360)	(1720)	(2120)	(3060)	(4160)	(5430)	(6880)	(7660)	(8490)	(9360)	(10,300)	(12,200)	(14,300)	(16,600)	(19,100)	(21,700)	(27,500)	
150	149	51.4	91.4	143	206	280	365	463	571	822	1120	1460	1850	2060	2280	2520	2,760	3,290	3,860	4,480	5,140	5,850	7,400	
(1030)	(45.4)	(194)	(345)	(539)	(776)	(1060)	(1380)	(1750)	(2150)	(3100)	(4220)	(5520)	(6980)	(7780)	(8620)	(9500)	(10,400)	(12,400)	(14,600)	(16,900)	(19,400)	(22,100)	(27,900)	