

EJERCICIOS PRÁCTICOS EN **Epanet**

Ejercicios básicos de mecánica de fluidos e hidráulica aplicados
a través del software de distribución gratuita EPANET 2.0.

Juan Sebastián De Plaza Solórzano

EJERCICIOS PRÁCTICOS EN Epanet

Ejercicios básicos de mecánica de fluidos e hidráulica aplicados
a través del software de distribución gratuita EPANET 2.0.

Juan Sebastián De Plaza Solórzano

UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA

Presidente

José María Cifuentes Páez

Rectora

Patricia Piedrahíta Castillo

Director de Publicaciones y Comunicación Gráfica

Rodrigo Lobo-Guerrero Sarmiento

Director de Investigaciones

Mauricio Hernández Tascón

Coordinador General de Publicaciones

Diego Ramírez Bernal

Decana del Programa de Ingeniería Civil

Myriam Jeannette Bermudez R.

**EJERCICIOS PRÁCTICOS EN EPANET: Ejercicios básicos de
mecánica de fluidos e hidráulica aplicados a través del
software de distribución gratuita EPANET 2.0.**

Autor

Juan Sebastián De Plaza Solórzano

ISBN

978-958-8957-57-9

Copyright ©

Primera edición - 2017

Bogotá, Colombia

Diseño y diagramación

Vanessa Duque Quintero

Departamento de Publicaciones y Comunicación Gráfica de la
Universidad Piloto de Colombia

Vectores

Freepik

La obra literaria publicada expresa exclusivamente la opinión de sus respectivos autores, de manera que no representan el pensamiento de la Universidad Piloto de Colombia. Cada uno de los autores, suscribió con la Universidad una autorización o contrato de cesión de derechos y una carta de originalidad sobre su aporte, por tanto, los autores asumen la responsabilidad sobre el contenido de esta publicación.

Plaza Solórzano, Juan Sebastian de

Ejercicios prácticos en Epanet : ejercicios básicos de mecánica de fluidos e hidráulica aplicados a través del software de distribución gratuita

EPANET 2.0 / Juan Sebastian de Plaza Solórzano; prólogo de Rafael Pérez Carmona

Bogotá : Universidad Piloto de Colombia, 2017

190 páginas : ilustraciones.

Incluye bibliografía

ISBN : 9789588957579

1. ABASTECIMIENTO DE AGUA-PROCESAMIENTO DE DATOS
2. MECANICA DE FLUIDOS
3. EPANET (PROGRAMA PARA COMPUTADORES)

I.Pérez Carmona, Rafael, pról..

CDD 628.1

[Dedicatoria]

En memoria de mi abuelita Lili, por su apoyo incondicional al colocar sus manos al fuego en mi nombre cuando lo necesité.

Contenido

[Prólogo]	13
[Agradecimientos]	16
[Presentación]	18

01 EPANET Y SUS GENERALIDADES

1.1. Componentes físicos en EPANET	21
1.1.1 Embalse o reservorio	21
1.1.2 Conexiones o nudos	25
1.1.3 Tuberías	31
1.1.4 Depósitos (tanques)	41
1.1.5 Bombas	54
1.1.6 Válvulas	64

02

EJERCICIOS APLICADOS CON NIVEL DE COMPLEJIDAD BÁSICA

2.1 Ejercicio 1:	74
Línea matriz con suministro por gravedad	
2.1.1 Solución a ejercicio 2	75
2.2 Ejercicio 2:	110
Red abierta con suministro por gravedad	
2.2.1 Solución a ejercicio 2	113
2.3 Ejercicio 3:	145
Red abierta con suministro por bombeo	
2.3.1 Solución a ejercicio 3	145
2.4 Ejercicio 4:	164
Red con tuberías en paralelo	
2.4.1 Solución a ejercicio 4	165

[ANEXOS]

Anexo 1. Propiedades del agua a una atmósfera de presión	179
Anexo 2. Propiedades físicas de los fluidos a 1 atm de presión y 20 °C	180
Anexo 3. Rugosidad absoluta para materiales utilizados en la conducción de fluidos	181
Anexo 4. Coeficientes de Hazen-Williams para materiales utilizados en la conducción de fluidos	182
Anexo 5. Constantes de aditamento o accesorio para el cálculo de pérdidas menores	183

[GLOSARIO]

[BIBLIOGRAFÍA]

187

[Lista de figuras]

Figura 1. Embalse	22	Figura 24. Curva de rendimiento para una bomba	62
Figura 2. Propiedades del embalse	23	Figura 25. Ícono de válvula en plano de la red	65
Figura 3. Ícono conexión o nudo	25	Figura 26. Propiedades en válvulas	66
Figura 4. Propiedades de conexión	26	Figura 27. Tipo de válvulas	67
Figura 5. Categoría de demanda para conexión	28	Figura 28. Curva de pérdidas de energía para válvulas (GPV)	70
Figura 6. Ícono tubería	31	Figura 29. Planteamiento de ejercicio 1	75
Figura 7. Propiedades de tubería	32	Figura 30. Valores por defecto para iniciar modelo	76
Figura 8. Indicación de Longitudes Automáticas	35	Figura 31. Valores por defecto, opciones hidráulicas	78
Figura 9. Estado inicial en tuberías	38	Figura 32. Introducción de elementos para el ejercicio 1	82
Figura 10. Ícono tanque o depósito	42	Figura 33. Propiedades para embalse en ejercicio 1	86
Figura 11. Propiedades en tanque o depósito	43	Figura 34. Propiedades para conexión o nudo en ejercicio 1	88
Figura 12. Tipo de mezcla en tanques o depósitos	47	Figura 35. Propiedades para tubería en ejercicio 1	91
Figura 13. Mezcla completa en tanques o depósitos	48	Figura 36. Ejecutar simulación para ejercicio 1	92
Figura 14. Mezcla en dos compartimientos para tanques o depósitos	49	Figura 37. Visualizar presión y caudal para un modelo (1)	95
Figura 15. Mezcla FIFO para tanques o depósitos	50	Figura 38. Configuración visual de EPANET	96
Figura 16. Mezcla LIFO para tanques o depósitos	51	Figura 39. Visualizar presión y caudal para un modelo (2)	99
Figura 17. Tipos de fuentes de calidad para tanques o depósitos	52	Figura 40. Edición escala de colores	100
Figura 18. Ícono bomba en plano de la red	54	Figura 41. Caudal neto entrante a la red	103
Figura 19. Propiedades en bombas	55	Figura 42. Resultado para línea matriz de 202.72 mm	106
Figura 20. Curva característica de un solo punto	57	Figura 43. Planteamiento de ejercicio 2	111
Figura 21. Curva característica de tres puntos	58	Figura 44. Trazado de la red hidráulica para el ejercicio 2	114
Figura 22. Curva característica multipuntos	59	Figura 45. Simulación de ejercicio 2	118
Figura 23. Patrón de funcionamiento para una bomba	61	Figura 46. Invertir signo negativo en caudal	121
		Figura 47. Generación de una tabla de datos	124
		Figura 48. Datos a visualizar en tabla	126
		Figura 49. Presión para segunda combinación de diámetros en el ejercicio 2	132
		Figura 50. Opción seleccionar todo	135
		Figura 51. Opción editar grupo	136

Figura 52. Ventana para editar objetos seleccionados	138
Figura 53. Presión estática para la red en el ejercicio 2	141
Figura 54. Velocidad en las tuberías para el ejercicio 2	142
Figura 55. Modelo para ejercicio 3 sin ejecutar simulación	149
Figura 56. Insertar una curva característica para una bomba 1	151
Figura 57. Insertar una curva característica para una bomba 2	152
Figura 58. Insertar una curva característica para una bomba 3	155
Figura 59. simulación del modelo para el ejercicio 3	156
Figura 60. Presión para nudo I, ejercicio 3	162
Figura 61. Planteamiento ejercicio 4	164
Figura 62. Propiedades hidráulicas para ejercicio 4	167
Figura 63. Objetos físicos ejercicio 4	169
Figura 64. Simulación para el modelo del ejercicio	174

[Lista de tablas]

Tabla 1. Tipo de válvulas en EPANET	64
Tabla 2. Valor a introducir en la propiedad Consigna (Setting)	71
Tabla 3. Sistema internacional de unidades para EPANET	79
Tabla 4. Valores a introducir para el ejercicio 1	85
Tabla 5. Resultados para línea matriz de 250 mm	102
Tabla 6. Resultados para línea matriz de 174,1 mm	104
Tabla 7. Diámetro interno para tuberías de acero	105
Tabla 8. Resultados para línea matriz de 202,72 mm	105
Tabla 9. Velocidades máximas y mínimas para líneas de conducción	110
Tabla 10. Propiedades de nudos para ejercicio 2	112
Tabla 11. Propiedades de tuberías para ejercicio 2	112
Tabla 12. Propiedades de tanque para ejercicio 2	116
Tabla 13. Nivel de complejidad para RAS (2011)	122
Tabla 14. Presión dinámica mínima para RDAP según RAS (2011)	123
Tabla 15. Diámetro mínimo para redes menores de distribución	128
Tabla 16. Diámetro interno para tuberías de PVC RDE 21	128
Tabla 17. Primera combinación de diámetros para red en ejercicio 2	129
Tabla 18. Presión para primera combinación de diámetros, ejercicio 2	130
Tabla 19. Segunda combinación de diámetros para red en el ejercicio 2	131
Tabla 20. Velocidades máximas en redes de distribución de agua potable	144
Tabla 21. Demanda en los nudos para el ejercicio 3	147
Tabla 22. Cálculo de pérdida de energía por tramo para el ejercicio 3	160

Tabla 23. Pérdida de energía del nudo 2 al 1 para el ejercicio 3	161
Tabla 24. Datos de entrada para tuberías en ejercicio 4	164
Tabla 25. Datos de entrada para nudos en ejercicio 4	165
Tabla 26. Propiedades de fluido para ejercicio 4	165
Tabla 27. Propiedades en tubería embalse-A para el ejercicio 4	171
Tabla 28. Resultados preliminares para ejercicio 4	172
Tabla 29. Pérdida de energía para tuberías en paralelo	177

[PRÓLOGO]

Debo manifestar con inmenso regocijo el honor que se experimenta al recibir la invitación a escribir un prólogo. Hacerlo compromete mi gratitud y fortalece la amistad, y me permite reconocer formal y públicamente el trabajo desarrollado por una persona que, a pesar de su corta carrera profesional, ha aprendido sobre un tema y ha dedicado parte de su valioso tiempo a recopilar valiosos apuntes, ordenándolos en forma práctica para compartirlos con la comunidad académica.

Él es un excepcional ejemplo para los profesionales colombianos que poseen vastos conocimientos, obtenidos a través del estudio, la cátedra y la experiencia laboral, pero cuyo propósito de compartirlo para provecho de presentes y futuras generaciones siempre se pospone ante tareas más urgentes, tal vez menos importantes.

En esta ocasión nos sentimos honrados al escribir con inmenso regocijo algunos apartes del tratado en calidad de prólogo para aceptar complacidos la deferencia del autor.

El presente libro se pone a consideración de la comunidad en momentos en que existe en el país una crisis sin igual en el sector hídrico. ¡Qué lástima! Antes se afirmaba: Colombia tiene el privilegio de ser uno de los países con mayor riqueza hídrica. Para los años noventa, se contaba con una esorrentía de 67 000 m³/s y más de mil ríos en el territorio nacional. En esa época, nos situaban en el cuarto lugar en el mundo en disponibilidad de agua, después de Rusia, Canadá y Brasil.

A pesar de la importancia del agua, su uso indiscriminado y no planificado, unido al manejo inadecuado y al insuficiente control de su contaminación, ha disminuido ostensiblemente su disponibilidad. Gran parte de nuestras poblaciones carecen de

servicio de agua potable y grandes extensiones de tierra fértil no son explotadas adecuadamente por falta de riego. En contraste muchas cosechas se pierden en el campo ante la imposibilidad de transportarlas a los centros de acopio por falta de vías de comunicación.

Colombia padece tanto en la época de sequía como en la de inundaciones el mismo problema: pérdidas de vidas humanas, de animales, de cosechas, de viviendas, de los pocos carreteables.

El país necesita con urgencia una política de Estado que regule el recurso hídrico. Nuestra geografía, con su accidente topográfico, es propicia para construir cientos de embalses que regulen los caudales, para que se retengan en tiempos lluviosos y se descarguen durante las sequías. Esto no es problema de alcaldes, es miopía de los poderes ejecutivo y legislativo, además de exceso de politiquería.

Abrigamos la esperanza de que la actual situación del país haga reaccionar a los altos dirigentes y los lleve a proponer un plan de gran envergadura sobre el recurso hídrico.

Nuestras más sinceras felicitaciones al colega, discípulo y amigo, con los más fervientes deseos para que continúe en esta senda de producción intelectual que será de provecho a la juventud universitaria, consultores y constructores. Ese deseo de compartir conocimiento con los semejantes será recompensado con creces.

Rafael Pérez Carmona

Ingeniero civil

[AGRADECIMIENTOS]

Un especial agradecimiento a la Universidad Piloto de Colombia, en especial, a la señora decana del programa de Ingeniería Civil, Ingeniera Myriam Jeannette Bermúdez Rojas.

Agradezco a los ingenieros que intervinieron con sus observaciones en pro del mejoramiento técnico y pedagógico del libro: Felipe Santamaría Alzate, Alex Mauricio González Méndez y Camilo Alberto Torres Parra.

Por último, debo hacer un reconocimiento al grupo de investigación Ambiente y Sostenibilidad – GUIAS, de la Universidad Piloto de Colombia, por acoger la propuesta presentada en este libro.

[PRESENTACIÓN]

El uso de software en la ingeniería y el paso de las obras de infraestructura hidráulica a modelos que permitan su simulación para un análisis detallado y una posterior optimización, hacen necesario un documento que ayude a mostrar cómo utilizar el software más famoso en el campo de la hidráulica del flujo a presión: EPANET (Mohapatra, Sargaonkar y Labhassetwar, 2014).

Con esta entrega, se busca dar inicio a una serie de libros con ejercicios aplicados a la hidráulica de flujo a presión, a partir de la utilización de EPANET, con niveles de complejidad básica, intermedia y avanzada.

El documento contiene cuatro ejercicios básicos que permiten familiarizar al usuario con todas las bondades del EPANET, además de relacionar la hidráulica aplicada con la normativa colombiana vigente.

El ejercicio 1 propone la simulación de una línea de conducción expresa, teniendo en cuenta las demandas típicas de una población y la presión de servicio a satisfacer en determinado punto. Así mismo, indica al lector la manera de configurar el software para los distintos sistemas de medida y metodologías en el cálculo de las pérdidas de energía.

El ejercicio 2 se basa en la implementación de una red abierta para una población hipotética, partiendo de una distribución urbana sencilla y que permite al lector involucrarse con las redes de distribución de agua potable; por otro lado, el ejercicio permite al lector encontrar la combinación de diámetros para obtener un funcionamiento hidráulico acorde con la normativa colombiana y con un dimensionamiento de red que garantice el menor diámetro posible.

El ejercicio 3 implementa el uso de una bomba como suministro de energía para el sistema, eliminando el tanque de almacenamiento usado en el segundo ejercicio, pero con una equivalencia entre los dos.

Por último, el ejercicio 4 toma el ejemplo de tuberías en paralelo descrito en el libro clásico de mecánica de fluidos de Streeter (Streeter y Wylie, 1979), con el fin de comprender las limitaciones que tiene EPANET en cuanto a los datos de salida, como presión en los nudos y velocidad en tuberías.

EPANET es un programa de ordenador que realiza simulaciones en período extendido del comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en redes de distribución a presión (Rossman, 2000).

La metodología utilizada por el software calcula los caudales en las tuberías y alturas piezométricas en los nudos bajo la consideración de conservación de masa y energía. Las ecuaciones que se generan en el proceso son conocidas por su no linealidad, por lo cual se hace uso del método del gradiente para su solución (Todini y Pilati, 1987).

Los elementos que simula EPANET a través de su interfaz gráfica se clasifican en dos grupos: objetos físicos y no físicos, los cuales se muestran en detalle a continuación.

1.1. Componentes físicos en EPANET

Una red hidráulica presurizada posee diferentes elementos de acuerdo con la geometría utilizada y la complejidad del sistema. Las redes a presión, sin importar su tipo ni su geometría, requieren de elementos físicos que permitan su implementación, tales como tuberías, conexiones o nudos, válvulas, fuentes de abastecimiento, bombas y emisores.

1.1.1 Embalse o reservorio

El embalse es el elemento físico que suministra el fluido a la red que se desea simular. Se caracteriza por tener capacidad infinita para almacenar un fluido; así mismo, su cota piezométrica se mantiene constante a través del tiempo de simulación, permitiendo tener una energía constante en todo el período de análisis.



OI

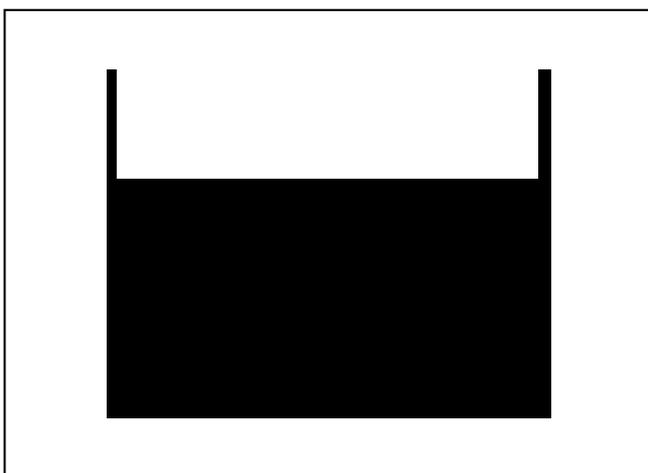
EPANET Y SUS
GENERALIDADES

Si el usuario desea, puede hacer que la altura piezométrica dentro del embalse varíe en función de patrones de tiempo. Adicionalmente, se debe tener en cuenta que el embalse simula una presión atmosférica de cero sobre su espejo de agua.

Su principal aplicación es la simulación de una fuente de suministro para un acueducto: ríos, lagos, océanos, pozos, embalses, etc. Así mismo, el embalse se puede configurar para la aplicación de sustancias químicas como el cloro, utilizado para la desinfección del agua.

El embalse o reservorio se representa en EPANET por el ícono mostrado en la figura 1.

Figura 1. Embalse



Fuente: EPANET 2. User's Guide ¹.

1.1.1.1 Propiedades del embalse

La ventana de diálogo que se muestra en la figura 2 se obtiene al dar doble clic sobre el embalse, cuando éste ya haya sido introducido en el área de trabajo.

Figura 2. Propiedades del embalse

Property	Value
*Reservoir ID	1
X-Coordinate	2122.36
Y-Coordinate	6374.62
Description	
Tag	
*Total Head	0
Head Pattern	
Initial Quality	
Source Quality	
Net Inflow	#N/A
Elevation	#N/A
Pressure	#N/A
Quality	#N/A

ID embalse: asigna una identificación al embalse con un número entero. EPANET asigna un ID automático que se verá incrementado en función del orden en el cual se va dibujando la red. El ID de un embalse y de cualquier elemento físico de EPANET se puede modificar con base en la necesidad del usuario. Lo único que se debe tener en cuenta es que el programa no repite el ID en una misma red.

Coordenadas X y Y: relacionan la ubicación del embalse en un área determinada. Estos valores son asignados automáticamente por EPANET y sólo se pueden modificar si se ubica el elemento en otro punto del área de trabajo.

Descripción: esta casilla facilita al usuario colocar alguna característica especial para la identificación del elemento, por ejemplo, señalar que es una fuente en caso de emergencia o una fuente principal.

Etiqueta: no presenta una funcionalidad útil.

Altura total: es la altura, cota o nivel piezométrico que tiene el embalse. Para el caso del sistema internacional de unidades, EPANET requiere la altura total en metros. Por ejemplo, si el embalse se encuentra a 100 m de altura con respecto al terreno que tiene una cota topográfica de 25 msnm, la altura total para el embalse debe ir amarrada a la cota topográfica del terreno, para este caso sería de 125 msnm.

Patrón de altura: como se explicó anteriormente, el nivel piezométrico del tanque es constante, pero puede variar de acuerdo con la necesidad del usuario. La manera de hacer variar el nivel piezométrico del embalse es por medio de una curva patrón que debe ser cargada a EPANET; la curva debe llevar una identificación. Por ejemplo, si la curva que define el patrón de altura se denomina "A", es necesario colocar el nombre de la curva en la casilla patrón de altura como "A".

Calidad inicial: esta casilla se utiliza sólo cuando se desea modelar la caída de concentración de un químico determinado en el agua. Las unidades que se deben tener en cuenta para la concentración son las partes por millón (ppm) o su equivalente en miligramos por litro (mg/L). En esta propiedad es donde se aplican las sustancias químicas para el tratamiento de agua potable, como el cloro utilizado para la desinfección, lo cual hace que EPANET asuma los embalses como puntos iniciales de concentración.

Como el embalse se considera un punto de frontera entre la fuente de suministro y las líneas o tuberías de conducción (Rossman, 2000), la concentración del químico modelado siempre permanecerá constante a través de todo el período de análisis.

Caudal neto entrante: esta casilla no configura ningún dato de entrada, al contrario, EPANET la utiliza como dato de salida, mostrando cuál es el caudal neto que está saliendo del embalse. Las unidades en las que está expresado el caudal en EPANET para el sistema internacional de unidades son los litros por segundo (L/s). EPANET muestra este dato con un signo negativo (-), lo cual indica que el caudal está saliendo del embalse.

Cota: visualiza la cota del nivel piezométrico en el embalse. Esta casilla es sólo de lectura ya que, si se desea modificar el nivel piezométrico, se debe hacer desde la casilla altura total, ya descrita.

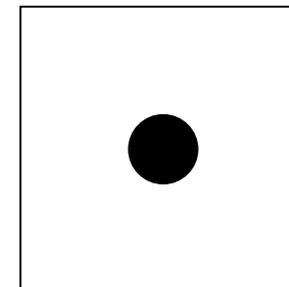
Calidad: visualiza la concentración de la sustancia química utilizada para el análisis de calidad del agua. Esta casilla es sólo de lectura.

1.1.2 Conexiones o nudos

Son elementos físicos utilizados para unir las tuberías. Los nudos o uniones sirven también como punto hidráulico de extracción o inyección de agua en la red. Para dibujar un tramo de tubería es indispensable el uso de las conexiones o embalses; si se requiere dibujar una tubería simple, se introduce un nudo fuente (embalse) que funciona como punto inicial y luego se coloca un nudo final (conexión) o un embalse.

La conexión o nudo en EPANET se muestra en la figura 3.

Figura 3. Ícono conexión o nudo



1.1.2.1 Propiedades en conexiones (nudos)

Los datos de entrada de las conexiones o nudos son mostrados por las propiedades de este ícono. Para acceder a ellas sólo basta con picar o dar clic dos veces sobre el objeto en el área de trabajo. La figura 4 muestra las propiedades de la conexión.

Figura 4. Propiedades de conexión

Property	Value
*Junction ID	2
X-Coordinate	4539,27
Y-Coordinate	6465,26
Description	
Tag	
*Elevation	0
Base Demand	0
Demand Pattern	
Demand Categories	1
Emitter Coeff.	
Initial Quality	
Source Quality	
Actual Demand	#N/A
Total Head	#N/A
Pressure	#N/A
Quality	#N/A

ID de conexión: identifica la conexión con un número entero. EPANET asigna un ID automático que se verá incrementado en función del orden en el cual se vaya dibujando la red. El ID de una conexión y de cualquier elemento físico de EPANET se puede modificar con base en la necesidad del usuario, lo único que se debe tener en cuenta es que EPANET no asigna ID repetidos en una misma red.

Coordenadas X y Y: son coordenadas que relacionan la ubicación de la conexión o nudo en un área determinada. Estos valores son asignados automáticamente por EPANET y sólo se pueden modificar si se ubica el elemento en otro punto del área de trabajo.

Descripción: esta casilla facilita al usuario colocar alguna característica especial para la identificación del elemento, por ejemplo, indicar que la conexión funciona como unión y no como nudo de demanda.

Etiqueta: no presenta una funcionalidad útil.

Cota: en esta casilla se debe introducir el valor de la cota topográfica del terreno por donde se va a realizar el trazado de la red. EPANET opera el valor de las cotas en metros, según el sistema internacional de unidades. Por ejemplo, si el trazado de la red se realiza en una ciudad como Bogotá, las cotas del terreno deben estar entre los 2400 y los 2600 msnm.

Demanda base: esta casilla hace referencia a los nudos que tienen asignado un consumo en la red. Las conexiones funcionan como accesorios de unión si la conexión no posee demanda (demanda base igual a cero); en caso de que exista demanda en el nudo, se debe introducir el valor del caudal demandado.

Así mismo, las conexiones tienen la posibilidad de ser nudos de inyección del fluido. Si se desea inyectar un caudal dado a la red, basta con asignar el signo menos (-) al caudal de demanda.

Patrón de demanda: se utiliza para variar el comportamiento de los caudales de demanda en las conexiones o nudos en función del tiempo. A esta particularidad se le conoce con el nombre de simulación en período extendido; el período extendido es el caso de un modelo real para una red de acueducto, dado que la población que es abastecida tiende a tener diferentes demandas en el día.

Un ejemplo que representa el comportamiento real de un acueducto es lo que sucede con la red en horas de la mañana: en esta franja horaria hay un pico de consumo, dada la alta demanda que generan las duchas que toma la mayoría de personas. Para tener en cuenta esa variación del caudal en el tiempo, se debe estimar una curva de modelación para el patrón de demanda.

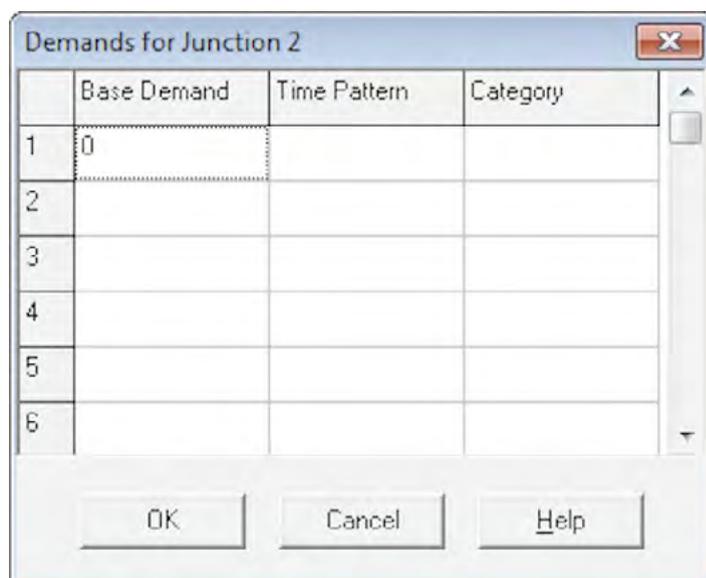
Al construir la curva patrón de demanda, se debe asignar el ID de la curva, para luego ser introducida en la casilla *Patrón de demanda*.

Categoría de demanda: es utilizada para configurar varios tipos de consumo dentro de una misma conexión o nudo. Por ejemplo, cuando una red tiene una conexión o nudo que abastece el suministro de agua a un barrio que tiene asignado el uso del suelo

en parte a la industria y en parte a la vivienda, ésta tendrá una demanda diferente para cada zona, ya que la industria, dependiendo de su campo de producción, generará un consumo alto de agua en horas laborales.

Para que EPANET entienda este tipo de circunstancias es necesario especificar cuál es la demanda para cada zona, así como la curva del patrón de demanda. Si se desea configurar esta opción, se debe dar clic en los puntos suspensivos que aparecen a la derecha de la casilla en blanco, inmediatamente después se visualizará la ventana mostrada en la figura 5.

Figura 5. Categoría de demanda para conexión



La columna *Demanda base* permite colocar los diferentes valores de consumo de acuerdo con la necesidad del usuario. Se debe tener en cuenta que el caudal debe estar expresado en litros por segundo (L/s) para el caso del sistema internacional de unidades.

En la columna *Patrón de tiempo* se debe colocar el nombre de la curva del patrón de consumo construida para cada caso.

Por último, la columna *Categoría* se utiliza para referenciar cada tipo de consumo. Por ejemplo, industrial, comunitario, doméstico, complejo acuático, etc.

Coefficiente emisor: EPANET simula modelos de redes hidráulicas a presión. El caso más utilizado es una red de acueducto. Cuando existe una demanda en un nudo, EPANET asume simplemente que parte del caudal que circula por la red cambia, ya que se ha extraído parte del volumen que circulaba en un determinado tiempo, pero ignora la despresurización que sufre el flujo al salir de la tubería y encontrarse con la atmosfera del lugar. Para este tipo de modelos, el coeficiente emisor es la propiedad que hace posible simular la despresurización del flujo a través de un orificio.

Si se desea modelar un sistema de riego para un cultivo o una boquilla para un sistema contraincendios, se debe tener en cuenta la despresurización del agua y la hidráulica a través de un orificio. Un sistema de riego básico se compone de un orificio dentro de una tubería; el orificio posee ciertas características hidráulicas que se deben tener en cuenta; por lo tanto, para lograr que EPANET asuma el flujo a través de un orificio, es necesario asignar un valor numérico al *Coefficiente emisor*.

El caudal que sale del emisor es igual al producto entre el coeficiente de pérdidas (coeficiente emisor) y la presión de la conexión elevada a una potencia (Rossman, 2000). La potencia a la que debe elevarse la presión viene predeterminada por EPANET en 0,5, que es el valor teórico para rociadores y toberas (flujo turbulento).

Calidad inicial: se utiliza como parámetro de calidad inicial para la simulación del modelo. La concentración aplicada en este punto no se mantiene constante en todo el período de análisis (período extendido), contrario a lo que sucede en un embalse, donde la concentración se mantiene constante durante toda la simulación. Se debe tener en cuenta que las unidades de concentración se deben expresar en partes por millón (ppm) o miligramos por litro (mg/L).

Fuente de calidad: es utilizada para introducir la inyección de una sustancia química desinfectante para el tratamiento de agua (cloro). La concentración se debe expresar en partes por millón (ppm) o su equivalencia en miligramos por litro (mg/L) para el caso del agua.

Demanda actual: permite conocer cuál es la demanda de agua que posee la unión o nudo en el momento de la simulación. Este es un dato de salida o lectura que puede variar si existe una curva de patrón del consumo.

Las unidades en las que se expresa la demanda varían en función al sistema de unidades que se utilice, para el caso más común (sistema internacional), EPANET utiliza litros por segundo (L/s).

Altura total: es un dato de salida o lectura. La altura total hace referencia a la altura o nivel piezométrico. EPANET calcula la altura total como el resultado de la suma de la cota del terreno más la cabeza de presión. La altura total se expresa en unidades de longitud, para el caso del sistema internacional de unidades, la altura total o nivel piezométrico se expresa en metros (m). Esta casilla es útil a la hora de construir la línea piezométrica o la línea de energía para un sistema dado.

Presión: es un dato de salida o lectura. La presión hace referencia a la cabeza de presión. Este es un valor que se obtiene de la diferencia entre la altura total (nivel piezométrico) y la cota del terreno. Por medio de este dato se puede optimizar la presión de servicio en una red dada.

Calidad: es un dato de salida o lectura. Muestra la evolución del cloro (caída de concentración en función del tiempo). La concentración de cloro en EPANET se expresa en partes por millón (ppm) o lo que es igual en miligramos por litro (mg/L) para el caso del agua.

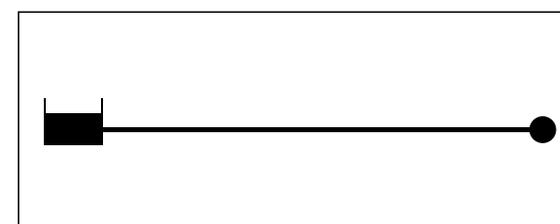
1.1.3 Tuberías

Son elementos que permiten el transporte de agua en una red dada. Para el caso de EPANET, las tuberías se encuentran siempre a presión y la dirección del flujo obedece al principio del gradiente hidráulico; por lo tanto, el agua se mueve de un punto de mayor a menor energía.

EPANET calcula las pérdidas de energía a través de tres metodologías (Darcy-Weisbach; Hazen-Williams; Chezy-Manning), para lograr simular el comportamiento hidráulico en distintos tipos de tuberías (concreto, acero, PVC, etc.). Además, se pueden tener en cuenta las pérdidas de energía por accesorios, para lo cual es necesario conocer las constantes de los accesorios utilizados (K_m) en el tramo de tubería simulada.

EPANET representa las tuberías como se muestra en la figura 6.

Figura 6. Ícono tubería



Para dibujar un tramo de tubería en el área de trabajo, se debe primero contar con un punto de partida y un punto de llegada. El punto de partida puede ser un embalse, un tanque o una conexión. Por su parte, el punto de llegada puede equivaler a los ya mencionados.

1.1.3.1 Propiedades en tuberías

Los datos de entrada para las tuberías son mostrados por las propiedades de este ícono. Para acceder a ellas sólo basta con dar clic dos veces sobre la tubería en el área de trabajo.

En la figura 7 se muestra la ventana de propiedades para una tubería.

Figura 7. Propiedades de tubería

Property	Value
*Pipe ID	1
*Start Node	1
*End Node	2
Description	
Tag	
*Length	1000
*Diameter	12
*Roughness	100
Loss Coeff.	0
Initial Status	Open
Bulk Coeff.	
Wall Coeff.	
Flow	#N/A
Velocity	#N/A
Unit Headloss	#N/A
Friction Factor	#N/A
Reaction Rate	#N/A
Quality	#N/A
Status	#N/A

ID de tubería: identifica la tubería con un número entero. EPANET asigna un ID automático que se incrementa en función del orden en el cual se va dibujando la red. El ID de una tubería y de cualquier elemento físico de EPANET se puede

modificar con base en la necesidad del usuario. Se debe tener en cuenta que en EPANET no es posible tener ID repetidos por elemento en una misma red.

Nudo inicial: muestra el punto de partida de la tubería en estudio. EPANET asume un nudo inicial de acuerdo con el sentido en el que se dibuje el tramo de tubería. Por ejemplo, si se tiene un reservorio identificado con el número 1 y una conexión identificada con el número 2, al dibujar la tubería, se inicia el tramo en la conexión y se finaliza en el reservorio. De forma automática, EPANET asume como nudo inicial el ID de la conexión, para este caso el número 2. Se debe tener en cuenta que el sentido del flujo dentro de la tubería no hace que EPANET asuma como nudo inicial el embalse, simplemente tiene en cuenta el sentido de acuerdo a la forma como el usuario dibuja el tramo de la tubería en el área de trabajo.

Nudo final: muestra el punto de llegada de la tubería. EPANET asume un nudo final de acuerdo con el sentido en el que se dibuje el tramo de tubería. Por ejemplo, si se tiene un reservorio identificado con el número 1 y una conexión identificada con el número 2, al dibujar la tubería, se inicia el tramo en la conexión y se finaliza en el reservorio. Automáticamente EPANET asume como nudo final el ID del embalse, para este caso el número 1. Se debe tener en cuenta que el sentido del flujo dentro de la tubería no hace que EPANET asuma como nudo final la conexión, simplemente tiene en cuenta el sentido de acuerdo a la forma como el usuario dibuja el tramo de la tubería en el área de trabajo.

Descripción: esta casilla le permite al usuario describir alguna característica especial para la identificación del elemento; por ejemplo, indicar que la tubería es matriz, primaria o terciaria.

Etiqueta: no presenta una funcionalidad útil.

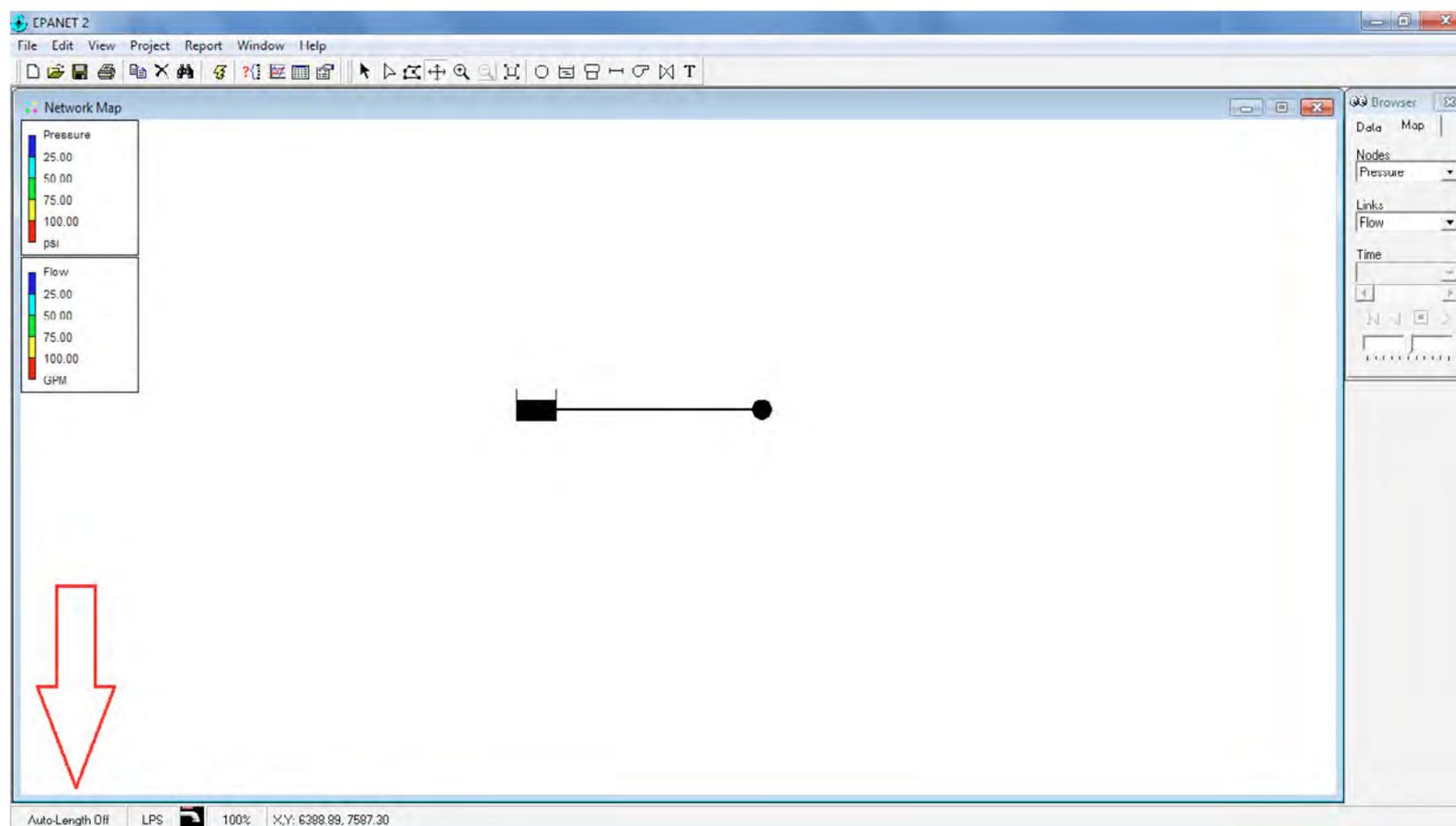
Longitud: es un dato indispensable en las propiedades. Indica la longitud de la tubería; EPANET solicita la longitud en metros (m) para el caso del sistema internacional de unidades. Esta propiedad se puede configurar de manera manual, cargando

por medio del teclado el valor correspondiente; sin embargo, existe la posibilidad de que EPANET calcule el valor de la longitud de manera automática.

Para hacer uso de la longitud automática se debe activar la opción en la parte inferior izquierda de la pantalla. De manera predeterminada, EPANET trae desactivada la opción (Longitudes automáticas off). Para activarla basta con dar clic derecho y activar la opción (Longitudes automáticas on). EPANET calcula la longitud de las tuberías por medio de las coordenadas que poseen los nudos iniciales y finales.

Cabe resaltar que esta opción es útil cuando se tienen imágenes satelitales o fotografías escaladas a partir de las cuales se pretende realizar el trazado de las tuberías para un acueducto en una población. En la figura 8 se indica con una flecha roja la opción *Longitudes automáticas*.

Figura 8. Indicación de Longitudes automáticas



Diámetro: valor requerido para la simulación de un modelo hidráulico. En esta casilla se debe consignar el diámetro útil de la tubería a utilizar en el modelo. Para obtener valores más exactos de los diámetros útiles de las tuberías, se recomienda acudir a la cartilla de especificaciones de los fabricantes de tuberías. EPANET asume el diámetro en milímetros (mm) para el caso del sistema internacional de unidades.

Rugosidad: el valor de la rugosidad depende principalmente de dos aspectos: el primero es el tipo de material que compone la tubería y el segundo es la metodología utilizada para el cálculo de las pérdidas de energía.

Un ejemplo claro se tiene al utilizar un tramo de tubería en PVC: si se selecciona la metodología de Hazen-Williams para el cálculo de las pérdidas de energía por fricción, la rugosidad a introducir en EPANET es el mismo coeficiente de Hazen-Williams (C_{H-W}); para el caso de la tubería de PVC sería de 150.

Otra metodología usada ampliamente en el campo de la hidráulica de tuberías es la ecuación de Darcy-Weisbach, la cual se caracteriza por estar basada físicamente. Ésta, al contrario de Hazen-Williams utiliza valores pequeños de rugosidad que obedecen a los mismos valores de la rugosidad absoluta del material (k_s) expresada en milímetros; para el caso del PVC, la rugosidad absoluta a introducir en EPANET es de 0,0015 mm.

EPANET también realiza simulaciones utilizando la metodología de Chezy- Manning. Esta metodología fue planteada para la hidráulica a flujo libre (ríos, canales, alcantarillados), pero se puede adoptar para el flujo a presión. Para el desarrollo de este documento no se hace énfasis en la utilización de esta metodología para la simulación de los ejercicios propuestos.

Coefficiente de pérdidas: en esta casilla es posible considerar los coeficientes o constantes de accesorios que posea la tubería. Las pérdidas de energía por accesorios en EPANET son calculadas a partir de la denominada constante de aditamento o constante de accesorio. Cada tipo de accesorio tiene una constante (k_m) que varía de 0,2 a 10 aproximadamente.

En esta propiedad se debe introducir la sumatoria de las constantes de los accesorios ($\sum k_m$) que posea el tramo de tubería.

Por ejemplo, si el tramo de tubería A-B posee una válvula de compuerta y una válvula de globo, el coeficiente de pérdidas que solicita EPANET obedece a la sumatoria de la constante tanto de la válvula de compuerta como de la válvula de globo; la válvula de globo posee un K_m aproximado de 8 y la válvula de compuerta un K_m de 0,2, por lo tanto, el valor a introducir en EPANET es de 8,2.

Estado inicial: permite iniciar la simulación del modelo con tramos de tubería abiertos o cerrados. De manera predeterminada, EPANET establece todos los tramos de tubería en estado abierto. En algunos modelos hidráulicos se requieren accesorios de retención para garantizar que el flujo sea en un único sentido.

El accesorio que facilita este tipo de opción se denomina válvula de cheque o válvula de retención. Si el usuario requiere restringir el sentido del flujo en algún tramo de tubería, debe activar esta opción por medio de la propiedad *Estado inicial*, seleccionando *V. Retención*.

En la figura 9 se muestra la ubicación para activar la válvula de retención (válvula de cheque).

Figura 9. Estado inicial en tuberías

Property	Value
*Pipe ID	1
*Start Node	1
*End Node	2
Description	
Tag	
*Length	100
*Diameter	150
*Roughness	0.0015
Loss Coeff.	0
Initial Status	Open
Bulk Coeff.	Open
Wall Coeff.	Closed
Flow	#N/A
Velocity	#N/A
Unit Headloss	#N/A
Friction Factor	#N/A
Reaction Rate	#N/A
Quality	#N/A
Status	#N/A

Cabe resaltar que EPANET no asume la pérdida de energía ocasionada por la válvula de retención (pérdidas menores). Por esa razón se debe tener en cuenta el valor de K_m a la hora de cargar la sumatoria de las constantes de los accesorios presentes en el tramo de la tubería.

Coefficiente de flujo: hace referencia al coeficiente de velocidad de reacción en el seno del fluido (agua). La reacción del agua con sustancias como el cloro se puede representar por medio de ecuaciones cinéticas polinómicas ($R = K_b \times C_n$) (Rossman, 2000).

El valor a introducir como coeficiente de flujo (K_b) se puede calcular si se conocen los valores de concentración de cloro presentes en el agua en distintos intervalos de tiempo. Se debe tener en cuenta que los coeficientes con signo negativo hacen referencia a una sustancia dentro del agua que tiende a perder su concentración en función del tiempo (cloro), mientras que los coeficientes positivos indican el aumento de la concentración de la sustancia en el tiempo (trihalometanos [THM]). Todo esto debido a que EPANET utiliza reacciones de orden cero y reacciones de primer orden.

Coefficiente de pared: se denomina coeficiente de reacción en la pared de la tubería. El cloro, al estar reaccionando en el seno del flujo, también entra en contacto con las paredes del tubo que lo contienen; éstas producen algunos tipos de reacción en función del material de la tubería. Para las tuberías metálicas, la corrosión que sufren con el tiempo de uso aporta a la reacción de la pared con el flujo que contiene el cloro.

Así mismo, las tuberías plásticas con el tiempo tienden a formar biopelículas que reaccionan con el cloro presente en el agua. No existe una manera exacta de estimar el coeficiente de pared; se debe calcular a partir de un procedimiento de prueba y error. Si el modelo hidráulico que se desea simular es nuevo, el coeficiente de pared de la tubería es cero. El coeficiente de pared puede ser correlacionado con las pérdidas de energía ocasionadas por la fricción. Para el caso de Darcy-Weisbach, se hace una relación con la rugosidad absoluta del material, mientras que para Hazen-Williams la relación es llevada a cabo con el coeficiente C.

Caudal: muestra el caudal que está circulando por el tramo de tubería analizado. El valor del caudal es un dato de salida, por lo tanto, no es posible modificar el valor de esta casilla.

El valor del caudal en EPANET establece el sistema de unidades con el cual el usuario desea trabajar. Si se requiere trabajar con unidades del sistema internacional de unidades, el

caudal debe estar en litros por segundo (L/s). Para el caso del sistema americano, las unidades de caudal deben estar expresadas en galones por minuto (G/m).

Velocidad: es obtenida a partir de la relación entre el caudal y el área del tubo. El valor de la velocidad es un dato de salida, por lo tanto, no se puede modificar directamente. Si se requiere variar el valor de la velocidad, se debe modificar el caudal de demanda en los nudos o el diámetro de la tubería. Para el caso de EPANET, la velocidad en el sistema internacional de unidades viene dada por unidades de distancia sobre tiempo, es decir, en metros por segundo (m/s).

Pérdida unitaria: la pérdida unitaria se puede definir como la pendiente de la línea de energía. También se conoce como el gradiente hidráulico y su cálculo se obtiene de la relación entre las pérdidas de energía y la longitud que ocasiona dichas pérdidas: ($sf = hf/l$), donde sf indica las iniciales en inglés de *slope friction* (pérdida unitaria); hf , *headloss friction* (pérdida de energía o cabeza por fricción); l es la longitud del tramo de tubería analizado. Para EPANET, la pérdida unitaria esta expresada en metros por kilómetro (m/km).

Factor de fricción: EPANET calcula el factor de fricción de Darcy-Weisbach de manera automática. Dicho factor tiene en cuenta la viscosidad del fluido, la rugosidad absoluta del material, el diámetro y la velocidad del fluido. Si el modelo simulado se realiza bajo la metodología de Hazen-Williams, el valor del factor de fricción que aparecerá en los resultados obedece al coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach.

El factor de fricción es adimensional y se puede obtener por diferentes ecuaciones. Las ecuaciones que utiliza EPANET para su cálculo varían de acuerdo con el régimen en que se encuentre el fluido según la clasificación del número de Reynolds (laminar, transición o turbulento). Para el flujo turbulento, el factor de fricción se calcula bajo la ecuación de Swamee-Jain.

Velocidad de reacción: estima la velocidad de reacción entre el seno del fluido y la sustancia desinfectante (cloro). También calcula la velocidad de reacción entre las paredes de la tubería y el fluido que contiene la sustancia desinfectante.

Las unidades para la velocidad de reacción están dadas en masa por volumen por tiempo. EPANET muestra los resultados en unidades de miligramos por litro por día (mg/L/día) para el caso del sistema internacional de unidades.

La velocidad de reacción en un modelo simulado por EPANET es un resultado del cálculo efectuado por el software teniendo en cuenta las constantes de reacción tanto en la pared del tubo como en el seno del fluido.

Calidad: visualiza los valores de concentración del cloro a través de las tuberías en un modelo dado. Este es un dato de salida, por lo tanto, no es posible su modificación desde esta propiedad. La calidad es útil dado que muestra el decaimiento de la concentración del cloro utilizado.

Estado: visualiza, después de simular el modelo hidráulico, si el tramo de tubería analizado se encuentra abierto o cerrado. Se debe tener en cuenta que esta propiedad es sólo de lectura; si el usuario desea modificar el estado de la tubería, lo debe hacer desde la propiedad *Estado inicial*.

1.1.4 Depósitos (tanques)

Los depósitos o tanques son elementos físicos que suministran agua a una red dada. Su principal característica es la limitación en la producción de agua, mientras que los embalses tienen agua ilimitada para suministrar. Los tanques requieren de una fuente que los abastezca, ya sea a gravedad (utilizando un embalse) o a presión (utilizando una bomba).

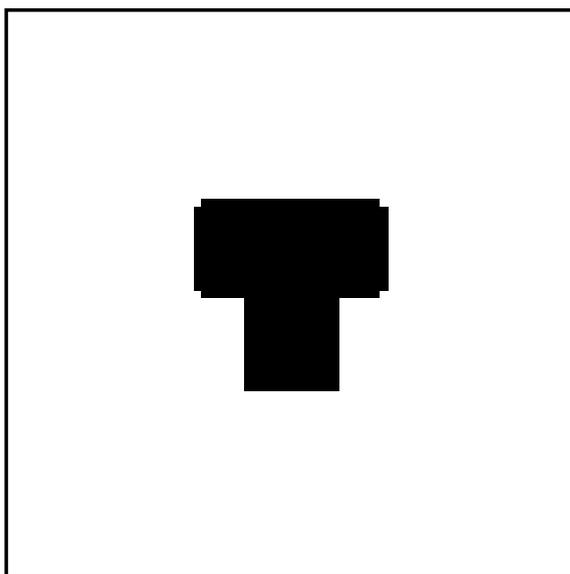
EPANET inicia la simulación de un modelo con una altura piezométrica dentro del tanque según la necesidad del usuario.

Así mismo, los niveles dentro del depósito o tanque varían de acuerdo con los niveles máximos y mínimos establecidos inicialmente por el usuario. Los depósitos o tanques también pueden representar distintos tipos de reacciones químicas producidas por el cloro y los volúmenes de almacenamiento, con lo cual se simula una fuente de suministro de cloro.

1.1.4.1 Propiedades en depósitos o tanques

El depósito o tanque se representa en EPANET por el ícono mostrado en la figura 10.

Figura 10. Ícono tanque o depósito



Para acceder a las propiedades de los depósitos o tanques basta con dar clic dos veces sobre el objeto en el área de trabajo. En la figura 11 se visualiza la ventana de propiedades para el tanque o depósito.

Figura 11. Propiedades en tanque o depósito

Property	Value
*Tank ID	3
X-Coordinate	2016.62
Y-Coordinate	4335.35
Description	
Tag	
*Elevation	0
*Initial Level	10
*Minimum Level	0
*Maximum Level	20
*Diameter	50
Minimum Volume	
Volume Curve	
Mixing Model	Mixed
Mixing Fraction	
Reaction Coeff.	
Initial Quality	
Source Quality	
Net Inflow	#N/A
Elevation	#N/A
Pressure	#N/A
Quality	#N/A

ID de conexión: identifica el depósito o tanque con un número entero. EPANET asigna un ID automático que se verá incrementado en función del orden en el cual se va dibujando la red. El ID de un depósito y de cualquier elemento físico de EPANET se puede modificar con base en la necesidad del usuario, lo único que se debe tener en cuenta es que en EPANET no se puede tener ID repetidos por elemento en un mismo modelo.

Coordenadas X y Y: son coordenadas que relacionan la ubicación del depósito o tanque en un área determinada. Estos valores son asignados automáticamente por EPANET y sólo se pueden modificar si se ubica el elemento en otro punto en el área de trabajo.

Descripción: esta casilla asigna con relación a la preferencia del usuario alguna característica especial para la identificación del elemento, por ejemplo, indicar que el tanque funciona como reserva.

Etiqueta: no presenta una funcionalidad útil.

Cota: en esta casilla se debe introducir el valor del nivel de fondo o solera del depósito o tanque. Para el caso del sistema internacional de unidades, EPANET opera el valor de las cotas en metros (m).

Nivel inicial: esta propiedad establece el nivel piezométrico dentro del tanque con el cual se desea comenzar la simulación del modelo. Se debe tener en cuenta que el valor del nivel inicial toma como cero el fondo o solera del depósito o tanque. Además, el nivel inicial debe ser un valor comprendido entre el nivel máximo y mínimo, expresado en metros (m) para el caso del sistema internacional de unidades.

Nivel mínimo: configura el nivel mínimo con el cual va a operar el tanque. Cuando el tanque debido a su operación llega a este nivel, detiene el suministro de agua hacia la red. Por lo tanto, se visualizan presiones negativas en las conexiones o nudos, lo cual indica la ausencia de agua dentro de las tuberías.

Se debe tener en cuenta que el valor del nivel mínimo toma como cero el fondo del tanque, y que la altura de éste con respecto al nivel del mar no interfiere.

Nivel máximo: esta propiedad establece el nivel máximo que puede alcanzar el agua dentro del tanque. El valor del nivel máximo toma como cero el fondo del tanque, por lo tanto, no importa la altura con respecto al nivel del mar que éste posea.

Si se utiliza el sistema internacional de unidades, los niveles dentro del tanque se deben expresar en metros (m). Para evitar informes de error en la simulación del modelo, los niveles inicial, mínimo y máximo deben correlacionarse con base a su

definición; en otras palabras, el nivel máximo debe ser la máxima capacidad del agua dentro del tanque, mientras que el nivel mínimo debe estar por debajo tanto del máximo como del inicial y, así mismo, el inicial no debe sobrepasar el máximo.

Diámetro: se debe introducir el diámetro del tanque de almacenamiento. EPANET modela de manera predeterminada tanques de forma cilíndrica. Si el tanque que se necesita es de sección cilíndrica, basta con introducir el valor del diámetro real del tanque en metros (m).

En el ámbito de la ingeniería, por razones constructivas, se implementan tanques de secciones cuadradas o rectangulares. Si se requiere modelar un tanque de sección cuadrada, se debe buscar el diámetro equivalente del área que ocupa dicha sección. Si se tiene un tanque cuadrado de lado igual a 5 m, se plantea la siguiente ecuación:

$$\text{Área cuadrada} = \text{lado} \times \text{lado} = 5 \text{ m} \times 5 \text{ m} = 25 \text{ m}^2$$

$$\text{Área circular} = \frac{\pi d^2}{4} = 25 \text{ m}^2$$

$$d = \sqrt{\left(\frac{25 \times 4}{\pi}\right)} = 5,64 \text{ m.}$$

Por lo tanto, el diámetro equivalente para introducir en EPANET es de 5,64 m.

En algunos casos y para algunas aplicaciones en ingeniería, se requiere de tanques con secciones que varían en función de su altura. En esos casos, es necesario recurrir a la construcción de curvas que relacionen la profundidad con el volumen almacenado. Para construir la curva se debe hacer uso de los componentes no físicos.

Volumen mínimo: así como existe la posibilidad de especificar el nivel mínimo de agua dentro del tanque, en EPANET también es posible especificar el volumen mínimo con el cual se puede realizar la simulación del modelo. El volumen mínimo es de utilidad para tanques con secciones que varían en función de la altura.

Curva de volumen: esta opción se utiliza para modelar tanques con secciones variables en función de la altura. Se debe introducir el nombre de la curva que relaciona el volumen almacenado con respecto a la altura del agua dentro del tanque.

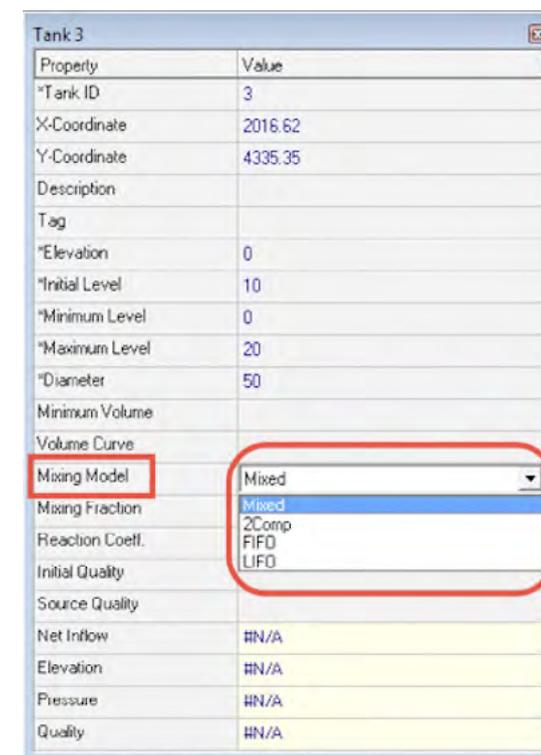
Es necesario tener en cuenta que, para poder referenciar una curva de volumen, se debe primero construir con los valores ya calculados, para luego asignarle una identificación (ID) a la curva y lograr citarla en la casilla *Curva de volumen*. Si no se especifica ningún tipo de curva de volumen, EPANET asume que el modelo del tanque es de sección circular constante, es decir, un tanque totalmente cilíndrico.

Modelo de mezcla: dado que en EPANET es posible modelar el tiempo de permanencia del agua en la red, así como los porcentajes de mezcla del agua para una conexión alimentada por diferentes fuentes al mismo tiempo, el modelo de mezcla dentro de los tanques es muy práctico a la hora de estimar cómo es la interacción entre el agua ya almacenada y el agua entrante (agua vieja con agua nueva).

EPANET presenta cuatro opciones de mezcla, 1) mezclado completo, 2) mezclado en dos compartimientos, 3) FIFO (*First In First Out*) y 4) LIFO (*Last In First Out*).

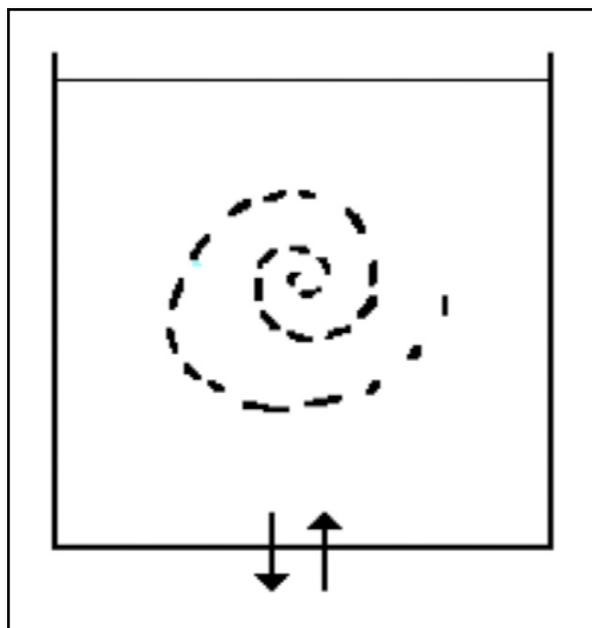
La manera como se puede escoger una de las opciones de mezcla en el tanque se muestra en la figura 12.

Figura 12. Tipo de mezcla en tanques o depósitos



El modelo *Mezcla completa* simula la mezcla total del agua entrante al tanque con el agua que ya estaba contenida. Este tipo de mezcla se aproxima a muchas aplicaciones de la ingeniería donde los tanques tienen un proceso de vaciado y llenado constante. La figura 13 explica la mezcla completa en un tanque.

Figura 13. Mezcla completa en tanques o depósitos



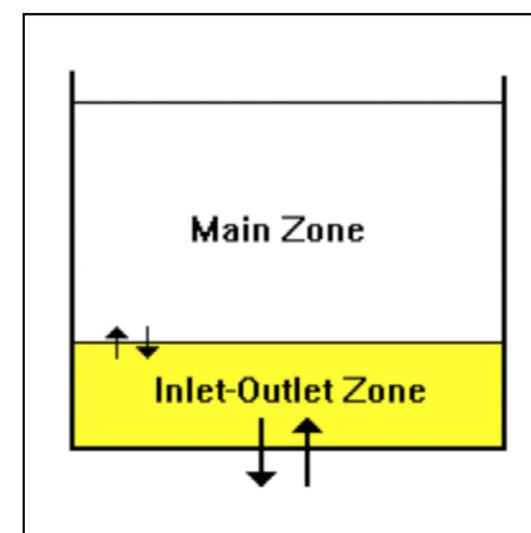
El modelo de *Mezclado de dos compartimientos* consiste en dividir el volumen de almacenamiento en dos fracciones: el primer compartimiento se llena totalmente con el agua que entra al tanque, teniendo una mezcla entre el agua ya existente en el primer compartimiento y el volumen de agua que entra. Al llenarse el primer compartimiento, de forma automática se comienza a llenar el segundo, mezclándose el agua que ya tenía éste con el agua excedente del primero.

Las tuberías de entrada y salida del agua se conectan al primer compartimiento, lo que simula un modelo de zona muerta en el segundo compartimiento. Se debe tener en cuenta que

para hacer uso de este tipo de mezcla es necesario especificar la fracción del volumen destinado para el primer compartimiento en función del volumen total; dicha fracción se debe introducir en la propiedad *Fracción mezcla*.

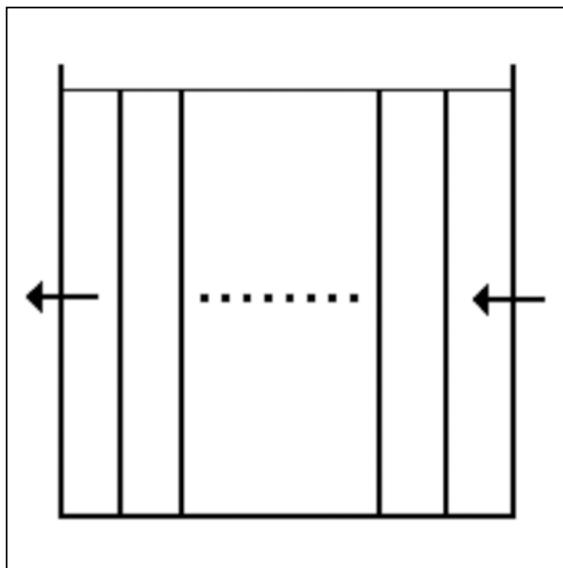
En la Figura 14 se visualiza el tipo de mezcla descrita.

Figura 14. Mezcla en dos compartimientos para tanques o depósitos



Otra alternativa para los modelos de mezcla se denomina FIFO, que significa en inglés *First In First Out*, lo que traduce 'el que primero entra primero sale'. Esta opción establece que no existe ningún tipo de mezcla o contacto dentro del tanque, ya que el agua que entra desplaza a la que sale. No requiere de ningún factor ni de ninguna configuración adicional a la selección desde la propiedad *Modelo de mezcla*. En la figura 15 se muestra el tipo de mezcla descrito.

Figura 15. Mezcla FIFO para tanques o depósitos

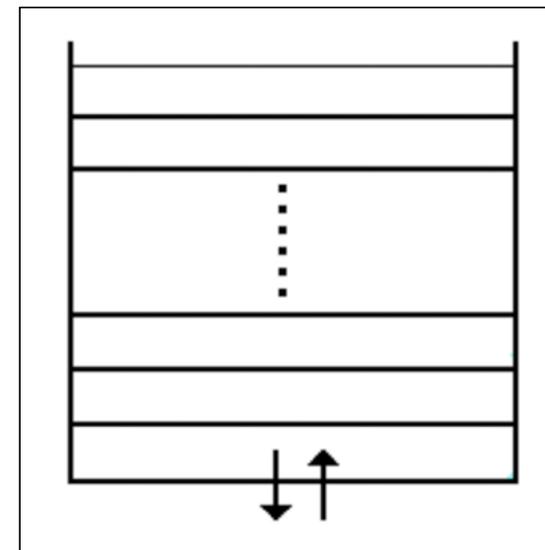


Por último, EPANET simula el tipo de mezcla denominada LIFO, siglas en inglés de *Last In First Out*, que traduce 'el último que entra es el primero que sale'. Este tipo de modelo se caracteriza por tampoco contemplar ningún tipo de mezcla dentro del tanque, lo cual hace que el comportamiento del agua dentro del tanque sea en forma de capas, una seguida de la otra, que entran y salen por la parte inferior del tanque a través de una única tubería.

La utilización de este tipo de mezcla no requiere de una configuración adicional. La figura 16 muestra de forma gráfica el modelo de mezcla LIFO.

Fracción mezcla: establece la fracción de volumen que se desea utilizar como primer compartimento, con relación al volumen total del tanque. Esta propiedad sólo aplica al seleccionarse como modelo *Mezcla de dos comportamientos*. Si el tipo de modelo de mezcla es diferente al mencionado, se debe dejar en blanco.

Figura 16. Mezcla LIFO para tanques o depósitos



Coefficiente de reacción: hace referencia al coeficiente de velocidad de reacción en el seno del fluido (agua). La reacción del agua con sustancias como el cloro se puede representar por medio de ecuaciones cinéticas polinómicas ($R = K_b \times C^n$).

El valor a introducir como coeficiente de flujo o coeficiente de reacción (K_b) se obtiene al conocer los valores de concentración de cloro presentes en el agua en distintos intervalos de tiempo. Los coeficientes con signo negativo hacen referencia a una sustancia dentro del agua que tiende a perder su concentración en función del tiempo (cloro), mientras que los coeficientes positivos indican el aumento de la concentración de la sustancia en el tiempo (Trihalometanos [THM]) (Rossman, 2000). Esto debido a que EPANET utiliza reacciones de orden cero y reacciones de primer orden.

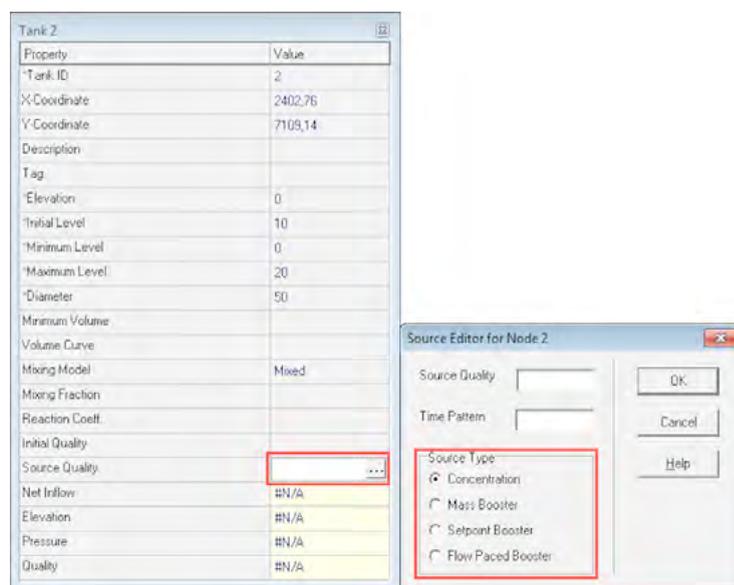
Calidad inicial: se utiliza como parámetro de calidad inicial con el que se comienza la simulación del modelo. La concentración

aplicada en este punto se mantiene constante en todo el período de simulación. Se debe tener en cuenta que las unidades de concentración se deben expresar en partes por millón (ppm) o miligramos por litro (mg/L).

Fuente de calidad: esta casilla permite introducir una inyección de químico desinfectante para el tratamiento de agua (cloro). La concentración se debe expresar en partes por millón (ppm) o su equivalencia en miligramos por litro (mg/L) para el caso del agua.

Por medio de esta propiedad es posible simular la inyección de un desinfectante o un trazador en la red. La manera de hacerlo depende de las necesidades del modelo. Las dos maneras más representativas son denominadas por EPANET como *Concentración fija a la salida* y *Aporte a caudales entrantes*. En la figura 17 se visualiza el tipo de fuente de calidad a seleccionar.

Figura 17. Tipos de fuentes de calidad para tanques o depósitos



La fuente de calidad de *Concentración fija a la salida* simula un punto de cloración constante en todo el período de simulación.

La fuente de calidad de *Aporte a caudales entrantes* faculta tener un punto de inyección del desinfectante de manera discontinua que puede variar en función del tiempo de simulación; se debe usar una curva patrón para hacer las variaciones de inyección del desinfectante con base en las necesidades del usuario.

Caudal neto entrante: visualiza el caudal que está suministrando el tanque a la red. Este es un dato de salida o lectura que puede variar si existe una curva de patrón del consumo. Se debe recordar que, si el consumo en la red hace que el nivel de agua sea inferior al mínimo configurado, EPANET desactiva de manera automática el suministro de agua. Las unidades en las que se expresa el caudal neto entrante varían en función del sistema de unidades que se utilice. Para el caso más común (sistema internacional de unidades), EPANET utiliza litros por segundo (L/s).

Cota: visualiza cuál es la cota asignada a la solera del tanque (fondo del tanque). Se debe tener en cuenta que es un dato de salida. Si el usuario desea modificar dicho valor, lo debe realizar desde la propiedad **Cota*.

Presión: visualiza la presión hidrostática del fluido dentro del tanque. La presión está dada en metros de columna de agua (mca), y para el caso de un tanque abierto a la atmósfera equivale a la misma profundidad del fluido contenido.

Calidad: visualiza la concentración asignada al tanque por medio de la propiedad *Calidad inicial*. Si la calidad inicial es cero, no se visualiza ninguna concentración dentro del tanque, así se haya utilizado la propiedad *Fuente de calidad*. En otras palabras, sólo visualiza la propiedad *Concentración inicial*.

La concentración de cloro en EPANET se expresa en partes por millón (ppm) o lo que es igual en miligramos por litro (mg/L) para el caso del agua.

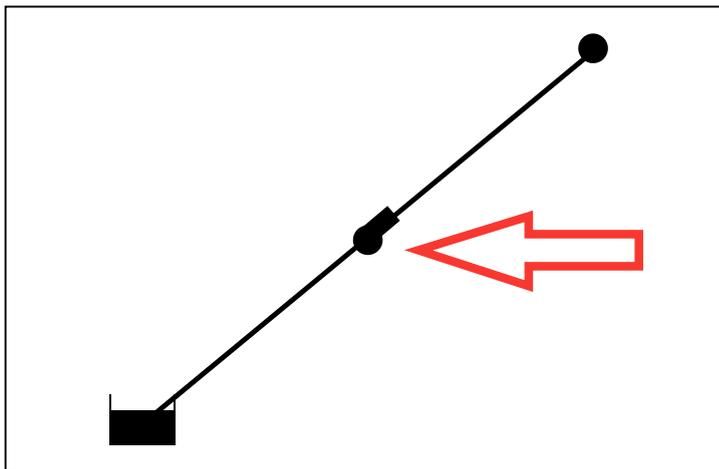
1.1.5 Bombas

Son elementos físicos para suministrar energía al fluido con el fin de desplazarlo de un punto 1 a un punto 2, con lo cual se vencen las pérdidas de energía presentes en el circuito y la diferencia de altura topográfica.

A la sumatoria de las alturas que debe vencer una bomba se le denomina altura manométrica o altura dinámica total. Para EPANET, las bombas son de flujo unidireccional, de velocidad constante o variable. Para que una bomba pueda funcionar requiere de una serie de curvas que en su mayoría relacionan el caudal con la altura manométrica o altura dinámica total.

En EPANET, para dibujar una bomba en el área de trabajo, primero se debe contar con un punto de partida y un punto de llegada. Normalmente el punto de partida puede ser un embalse, un tanque o una conexión, mientras que el punto de llegada puede corresponder con los ya mencionados. En la figura 18 se indica la bomba con un embalse como punto de partida y una conexión como punto de llegada.

Figura 18. Ícono bomba en plano de la red



EPANET asume el impulso del fluido con base en la dirección hacia donde está apuntando la bomba. Para el caso de la figura 18, la bomba se encuentra apuntando hacia la conexión o nudo, por lo tanto, ésta se encuentra tomando el agua del embalse (succión) y la impulsión está hacia la conexión.

1.1.5.1 Propiedades en bombas

La simulación de bombas en EPANET tiene una serie de propiedades a tener en cuenta según la necesidad de cada modelo. En la figura 19 se muestra la ventana de propiedades para una bomba. Para acceder a ésta, se debe dar doble clic sobre la bomba ya dibujada en el área de trabajo.

Figura 19. Propiedades en bombas

Property	Value
*Pump ID	1
*Start Node	2
*End Node	1
Description	
Tag	
Pump Curve	
Power	
Speed	
Pattern	
Initial Status	Open
Effic. Curve	
Energy Price	
Price Pattern	
Flow	#N/A
Headloss	#N/A
Quality	#N/A
Status	#N/A

ID de la Bomba: identifica la bomba con un número entero o una palabra de máximo trece letras de longitud. EPANET asigna un ID automático que se verá incrementado en función del

orden en el cual se dibuja la red. El ID de una bomba y de cualquier elemento físico de EPANET se puede modificar con base en la necesidad del usuario. Lo único que se debe tener en cuenta es que EPANET no deja tener ID repetidos en una misma red.

Nudo inicial: visualiza el punto de partida de la bomba en estudio. EPANET asume el nudo inicial de acuerdo con el sentido en el que se dibuja la bomba. Por ejemplo, si se tiene un embalse identificado con el número 1 y una conexión identificada con el número 2, al dibujar la bomba se debe iniciar el dibujo en el embalse para tomar el agua (succión) y finalizar en la conexión (impulsión). De forma automática, EPANET asume como nudo inicial el ID del embalse, para este caso el número 1.

Nudo final: muestra el punto de llegada de la bomba en estudio. EPANET asume un nudo final de acuerdo con el sentido en el que se dibuje la bomba.

Descripción: esta casilla le admite al usuario colocar alguna característica especial para la identificación del elemento. Por ejemplo, indicar que la bomba en estudio tiene una potencia de 5 HP.

Etiqueta: no presenta una funcionalidad útil.

Curva característica: sirve para introducir la identificación o nombre (ID) de la curva suministrada por el fabricante para simular la bomba que se desea, con relación al caudal y a la altura dinámica total.

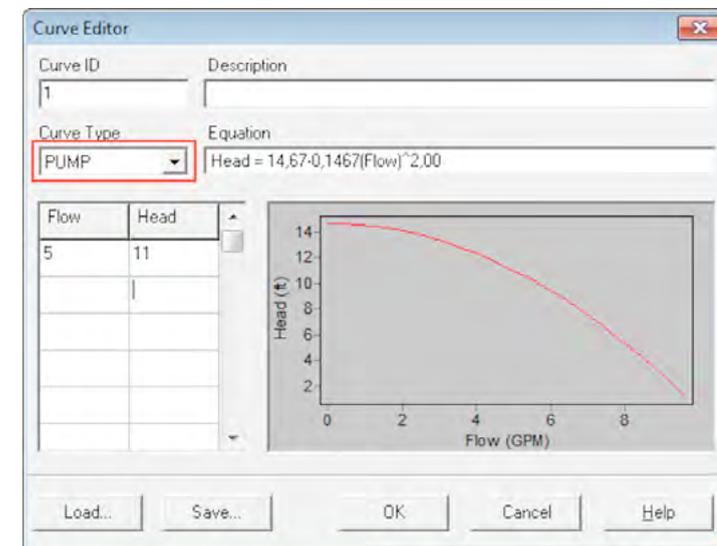
En EPANET es posible construir una curva específica para cada bomba, con el fin de introducir las características con las que cuenta la bomba a la hora de impulsar el fluido. La curva característica de la bomba relaciona en el eje de las abscisas (x) el caudal (L/s), y en el eje de las ordenadas (y) la altura dinámica total o altura manométrica (m).

La relación de estos parámetros simula el comportamiento de la bomba teniendo en cuenta su eficiencia. Para construir la curva característica de la bomba, EPANET solicita como mínimo un punto de la curva característica del fabricante; es decir, se requiere un dato de caudal y otro de altura dinámica total.

La curva característica depende de la información obtenida del fabricante de la bomba. En el caso de contar con un dato de caudal y uno de altura dinámica total de diseño (curva de un solo punto), EPANET interpola dos puntos adicionales; asume que la altura dinámica total es cero cuando el caudal es el doble del caudal de diseño; cuando el caudal es cero, la altura dinámica total es el 33% adicional a la altura dinámica total de diseño.

En la figura 20 se visualiza la curva característica de un solo punto.

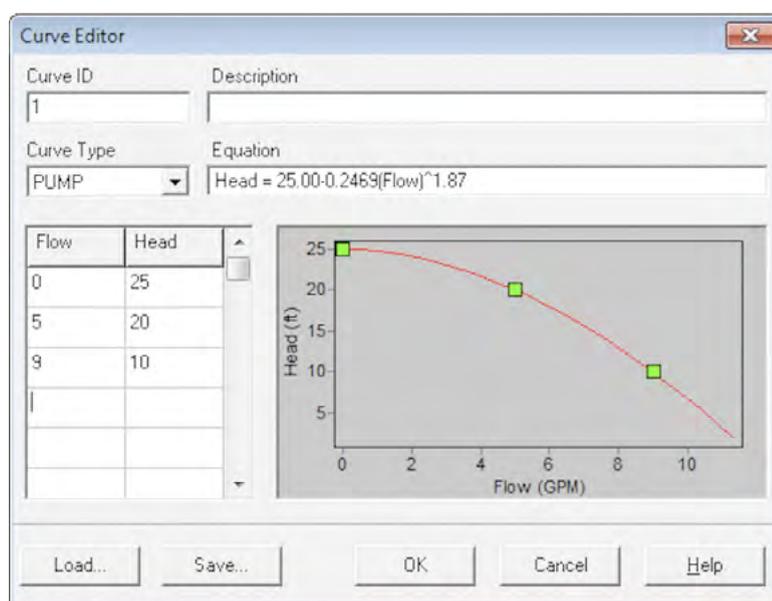
Figura 20. Curva característica de un solo punto



Si la información que se posee de las características de los equipos de bombeo es más completa, EPANET solicita por lo menos tres puntos de la curva característica (curva de tres puntos); un punto que relacione la operación de la bomba con caudal cero y altura dinámica total máxima; un punto de operación que relacione caudal y altura dinámica total de diseño, y finalmente un punto donde se especifique la operación con caudal máximo y altura dinámica total correspondiente.

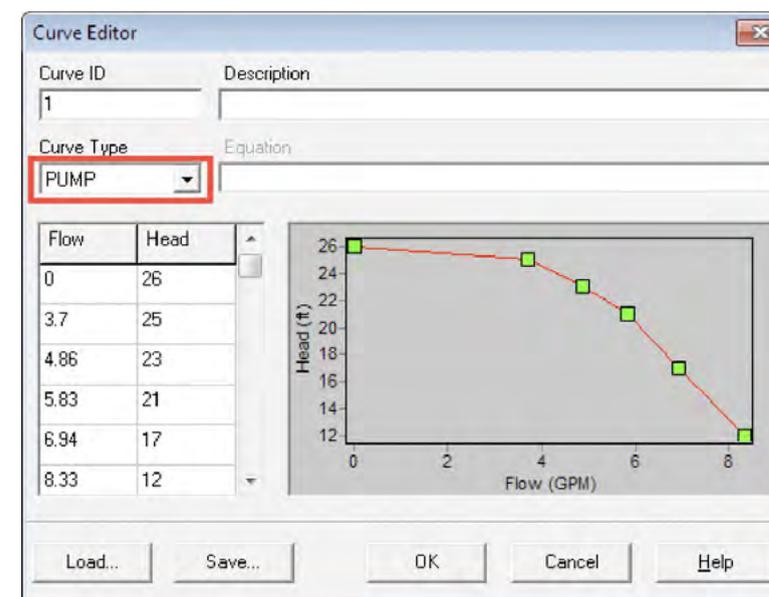
EPANET, con base en la información, crea una función potencial $h_G = A - Bq^C$, donde h_G representa la altura dinámica total, q es el caudal y A,B,C son constantes particulares de la bomba. En la figura 21 se muestra la curva característica de tres puntos.

Figura 21. Curva característica de tres puntos



Si se desea una mayor similitud entre el modelo simulado por EPANET y la bomba real, se puede cargar una curva con mayor cantidad de puntos, denominada curva multipunto. En la figura 22 se muestra dicha curva.

Figura 22. Curva característica multipuntos



Si en el peor de los casos no se cuenta con la información para construir cualquiera de las curvas descritas, la propiedad *Curva característica* se debe dejar en blanco y se hace uso de la siguiente propiedad, denominada *Potencia*.

Potencia: en esta casilla se introduce la potencia de la bomba en una simulación dada. Para hacer uso de esta propiedad, se debe tener en cuenta que *Curva característica* debe estar vacía o de lo contrario EPANET no asumirá el valor introducido en la potencia.

El valor de la potencia debe estar asignado en kilowatts (Kw), para el sistema internacional de unidades, y se debe considerar que el valor de la eficiencia de la bomba es del 100%. Esta propiedad es útil a la hora de simular modelos con escasa información, pero se recomienda hacer uso de la propiedad *Curva característica*, ya que la eficiencia de una maquina jamás es del 100%.

Velocidad relativa: establece un factor que haga variar la velocidad angular con la que gira el motor de la bomba. El factor a introducir se puede hallar a partir de la siguiente expresión:

$$FVR = V_r / V_n$$

Donde *FVR* es el factor de velocidad relativa, *V_r* es la velocidad requerida por el usuario y *V_n* es la velocidad nominal de la bomba.

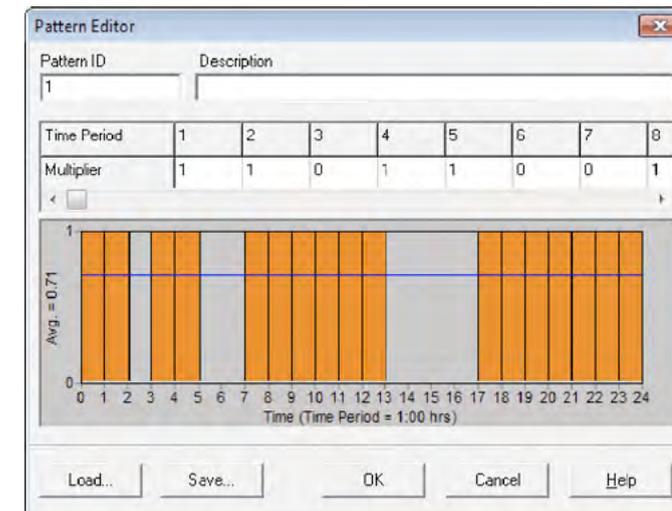
Por ejemplo, si se requiere una velocidad angular de 2800 revoluciones por minuto (RPM) para una bomba que tiene una velocidad nominal de 3500 revoluciones por minuto, el factor a introducir en EPANET es 0,80 (2800/3500= 0,80).

Patrón: en esta casilla se debe introducir la identificación de la curva de modulación para el comportamiento de la bomba. Al construir el patrón de comportamiento de la bomba, se logra hacer variar la velocidad de giro o velocidad angular del motor de la bomba por medio de factores, al igual que en la propiedad anterior, pero teniendo en cuenta un período de 24 horas. Es decir, se puede tener un factor de 0,80 entre las 12:00 y las 13:00, un factor de 0,95 entre las 13:00 y las 14:00, etc.

Este patrón es útil para simular el encendido y apagado de la bomba. Si se requiere tener encendida la bomba se utiliza el coeficiente uno (1) y si se desea apagar se utiliza el coeficiente cero (0).

En la figura 23 se visualiza el patrón de encendido para una bomba.

Figura 23. Patrón de funcionamiento para una bomba



En la figura 23 se muestran las barras naranjas que obedecen a factores de velocidad relativa igual a 1 (bomba encendida) y los períodos en color gris son los factores de velocidad relativa igual a 0 (bomba apagada).

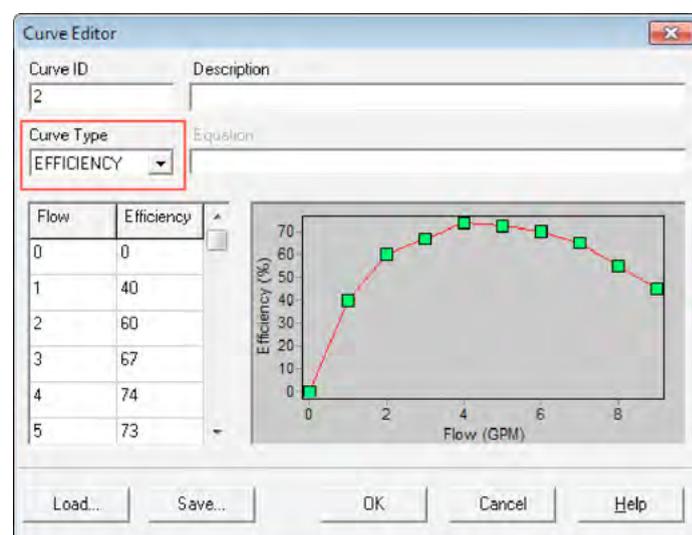
Estado inicial: a partir de esta opción el usuario puede iniciar la simulación con la bomba encendida o apagada. De manera predeterminada, EPANET establece todas las bombas encendidas, a menos que el usuario tenga asignada una gráfica patrón para la bomba.

La propiedad *Estado inicial* se hace nula al establecer un patrón de funcionamiento de la bomba para el análisis en período extendido (red dinámica).

Curva de rendimiento: esta propiedad asigna la identificación (ID) o nombre de la curva de rendimiento. Para EPANET, la curva de rendimiento establece la relación entre el rendimiento o eficiencia (ubicado en el eje de las ordenadas) y el caudal (ubicado en el eje de las abscisas).

El rendimiento está expresado en porcentaje y relaciona la potencia eléctrica suministrada a la bomba con la potencia hidráulica obtenida; mientras que el caudal está expresado en litros por segundo (L/s). En la figura 24 se observa la curva de eficiencia introducida para una bomba particular. En el recuadro rojo se señala el tipo de curva que se desea modelar.

Figura 24. Curva de rendimiento para una bomba



EPANET calcula el consumo de energía de la bomba a partir de la curva de rendimiento. En el caso de no conocer la información de rendimiento o eficiencia, la propiedad *Curva de rendimiento* se debe dejar vacía.

Precio energía: asigna un valor monetario al consumo de energía que demanda la bomba. Las unidades del precio de la energía están calculadas con base en la potencia eléctrica que consume el motor de la bomba durante una hora.

Las unidades de facturación de consumo eléctrico están dadas en kilowatts por hora (kWh). Si no se requiere estimar el valor del consumo eléctrico, se debe dejar en blanco la propiedad *Precio eléctrico*.

Patrón de precios: se debe introducir el nombre o identificación (ID) de un patrón de precios a la energía que consume la bomba.

Un patrón de precios hace posible variar el precio de la energía en el transcurso de 24 horas; esta variación sirve para simular el precio de la energía en regiones donde el precio del kilowatt varía en el transcurso del día.

Para el caso de una ciudad como Bogotá D. C., el precio permanece constante a lo largo del día hasta consumir 130 kWh/mes (consumo de subsistencia). Para ese caso, EPANET no acepta un patrón condicionado a un consumo mínimo, pero sí se podría conocer el tiempo transcurrido para el consumo de los 130 kWh durante la simulación.

Si no se requiere realizar una simulación con variación de precios en el consumo de energía, sólo se debe dejar en blanco la propiedad.

Caudal: muestra el caudal que es suministrado por la bomba para cada período de simulación. Esta propiedad es un dato de salida, por lo tanto, no es posible modificar su valor.

Si se utiliza el sistema internacional de unidades, el caudal debe estar expresado en litro por segundo (L/s).

Altura manométrica: muestra la altura dinámica total que está suministrando la bomba al fluido. Esta altura indica la cabeza de energía suministrada para vencer las cabezas de fricción en tuberías y accesorios, altura estática de succión y la altura estática de impulsión. Este dato es de salida, razón por la cual no es posible modificar la altura manométrica desde esta propiedad.

Calidad: muestra la caída de la concentración del cloro en contacto con la bomba. La concentración está expresada en partes por millón (ppm) o miligramos por litro (mg/L). Desde esta propiedad no es posible modificar la concentración, ya que es un dato de salida.

Estado: visualiza los períodos en los que la bomba se encuentra encendida o apagada. Es un dato de salida y, por lo tanto, no es posible modificar su estado.

1.1.6 Válvulas

Las válvulas son elementos que principalmente controlan el flujo o caudal dentro de un tramo de tubería específico. Los diferentes tipos de válvulas varían con base en los tipos de mecanismos que utilizan para estrangular el flujo.

Sus aplicaciones en sistemas de suministro de agua potable dependen del tipo de red hidráulica: si son para redes matrices, redes menores o para uso en instalaciones hidráulicas de edificaciones, todo depende del nivel de complejidad que posea el sistema hidráulico.

Por ejemplo, existen válvulas que no son recomendadas para el uso en tuberías de diámetros grandes, pues si el mecanismo de estrangulación se realiza de manera rápida ocasiona que el fluido en movimiento dentro de la tubería se encuentre contra una "pared" (válvula cerrada), lo que ocasiona el fenómeno denominado golpe de ariete.

Dentro de los objetos físicos, en EPANET es posible modelar diferentes tipos de válvulas de alta complejidad utilizadas especialmente en acueductos para grandes ciudades. Las válvulas que se pueden modelar con EPANET se identifican en la tabla 1.

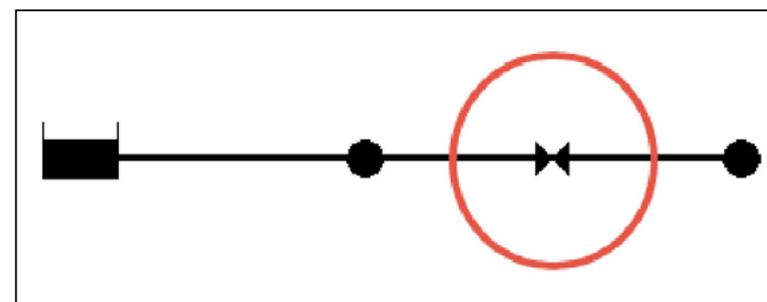
Tabla 1. Tipo de válvulas en EPANET

Tipo de válvula	
PRV	Válvula reductora de presión
PSV	Válvula sostenedora de presión
PBV	Válvula de rotura de carga
FCV	Válvula controladora de caudal
TCV	Válvula reguladora por estrangulación
GPV	Válvula de propósito general

Cada tipo de válvula realiza algún tipo de control, ya sea con relación a la presión o el caudal que circula por ella. Por esta razón, se debe tener en cuenta cuál es la propiedad que se debe configurar para cada válvula.

Para dibujar una válvula en el área de trabajo, es necesario tener en cuenta la misma condición que se tuvo en la descripción de las tuberías. De tal forma, en EPANET se puede dibujar una válvula si existe un punto de partida y un punto de llegada. En la figura 25 se señala en rojo la válvula dibujada sobre el área de trabajo.

Figura 25. Ícono de válvula en plano de la red

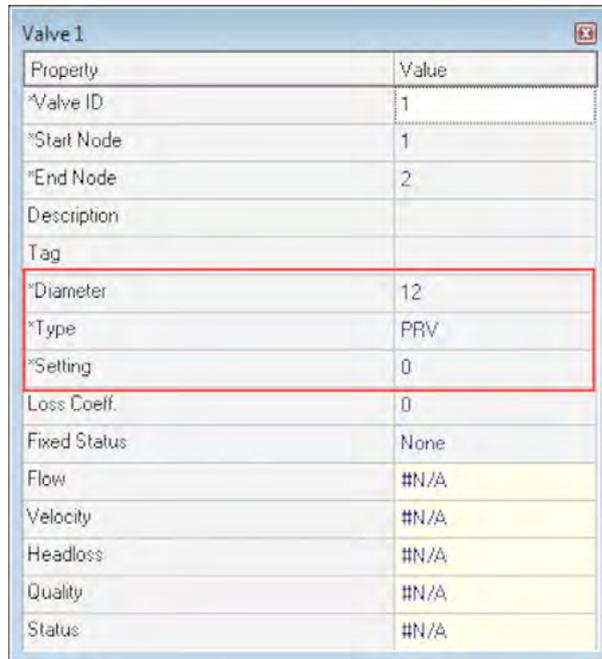


1.1.6.1 Propiedades en válvulas

Las propiedades de los tipos de válvulas que EPANET modela son las mismas para cada una de ellas. Sólo existe una propiedad denominada *Consigna*, en la cual se puede introducir el parámetro a controlar dependiendo de la característica de la válvula que se desee modelar.

Para acceder a las propiedades de la válvula dibujada sobre el área de trabajo, basta con dar doble clic sobre el elemento para visualizar la ventana que se muestra en la figura 26.

Figura 26. Propiedades en válvulas



Property	Value
*Valve ID	1
*Start Node	1
*End Node	2
Description	
Tag	
*Diameter	12
*Type	PRV
*Setting	0
Loss Coeff.	0
Fixed Status	None
Flow	#N/A
Velocity	#N/A
Headloss	#N/A
Quality	#N/A
Status	#N/A

A continuación, se explica cada una de las propiedades de las válvulas para lograr simular un modelo hidráulico presurizado.

ID de la válvula: identifica la válvula con un nombre o número entero. EPANET asigna un ID automático que se va incrementando en función del orden en el cual se va dibujando la red.

El ID de una válvula y de cualquier elemento físico de EPANET se puede modificar con base en la necesidad del usuario, lo único que se debe tener en cuenta es no repetir un ID en una misma red.

Nudo inicial: muestra el punto de partida de la válvula en estudio. EPANET asume un nudo inicial de acuerdo con el sentido en el que se dibuje el tramo donde se encuentre la válvula.

Nudo final: presenta el punto de llegada de la válvula en estudio. EPANET asume un nudo final de acuerdo con el sentido en el que se dibuje el tramo donde se encuentre la válvula.

Descripción: esta casilla introduce alguna característica especial para la identificación del elemento. Por ejemplo, indicar que la válvula es una reguladora de presión, sostenedora de presión, etc.

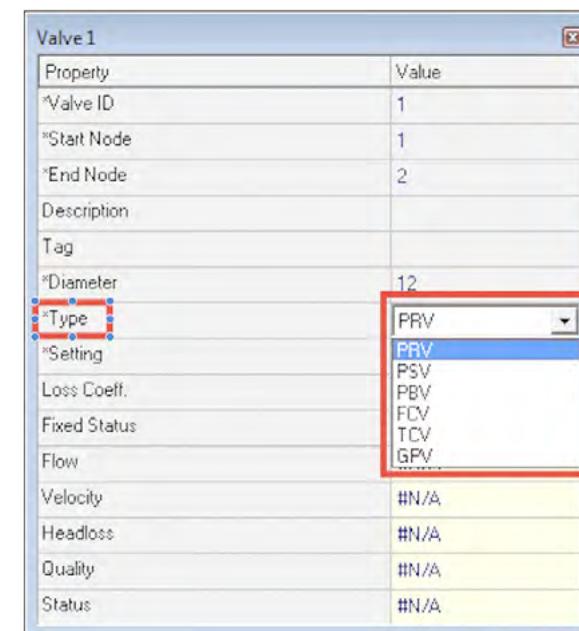
Etiqueta: no presenta una funcionalidad útil.

Diámetro: valor requerido para la simulación de un modelo hidráulico. En esta casilla se debe consignar el diámetro útil de la válvula a utilizar en el modelo. Para obtener valores más exactos de los diámetros útiles en válvulas, se recomienda acudir a la cartilla de especificaciones de los fabricantes de válvulas.

EPANET asume el diámetro en milímetros (mm), para el caso del sistema internacional de unidades.

Tipo: permite seleccionar el tipo de válvula a modelar. En esta propiedad se muestran los diferentes tipos de válvulas que se pueden simular en EPANET. En la figura 27 se visualizan las válvulas a seleccionar desde la propiedad *Tipo*.

Figura 27. Tipo de válvulas



Property	Value
*Valve ID	1
*Start Node	1
*End Node	2
Description	
Tag	
*Diameter	12
*Type	PRV
*Setting	0
Loss Coeff.	0
Fixed Status	None
Flow	#N/A
Velocity	#N/A
Headloss	#N/A
Quality	#N/A
Status	#N/A

Cada válvula presenta una característica especial y unas condiciones a cumplir para obtener una simulación sin errores. A continuación, se analizan una por una las válvulas mostradas en la figura 27.

Válvula reductora de presión (PRV): la PRV limita la presión en un punto de la red, sobre un tramo de tubería. EPANET establece tres formas de operación:

- Parcialmente abierta (es decir, activa) para mantener una presión aguas abajo, siempre y cuando la presión aguas arriba sea superior a ésta.
- Totalmente abierta, cuando la presión aguas arriba está por debajo de la especificada en la propiedad *Consigna (Setting)*; el parámetro a controlar con este tipo de válvula es la presión, razón por la cual en la propiedad *Consigna* se debe introducir la presión deseada en la conexión o nudo aguas abajo de la válvula.
- Cerrada, si la presión aguas abajo es superior a la presión aguas arriba, para impedir el flujo inverso.

Se deben tener en cuenta dos aspectos para la modelación de PRV: no se puede conectar una PRV directamente a un depósito o tanque (se puede utilizar una tubería para separarlos), y adicionalmente una PRV no puede compartir la misma conexión o conectarse en serie.

Válvula sostenedora de presión (PSV): la PSV mantiene una presión determinada en un punto específico de la red. EPANET diferencia tres modos de funcionamiento:

- Parcialmente abierta, para mantener la presión (especificada en la propiedad *Consigna*) aguas arriba de la válvula cuando la presión aguas abajo es menor.
- Totalmente abierta, si la presión aguas abajo es superior a la especificada en la propiedad *Consigna*.
- Cerrada, si la presión aguas abajo es superior a la presión aguas arriba para impedir el flujo inverso.

A la hora de simular un modelo hidráulico que contenga una PSV, ésta no se puede conectar directamente a un depósito o tanque (utilice una tubería para separarlos), ni tampoco se puede compartir el mismo nudo aguas arriba o conectarse en serie, ni estar conectada al nudo aguas abajo.

Válvula de rotura de carga (PBV): la PBV obliga a que la caída de presión en la válvula sea siempre un valor predeterminado por el usuario. El caudal que conduce la válvula puede ir en ambas direcciones. Las PBV no son mecanismos físicos verdaderos, pero pueden usarse para modelar situaciones donde exista una caída de presión local conocida.

Válvula limitadora o controladora de caudal (FCV): las FCV limitan el caudal a un valor específico. EPANET mostrará un mensaje de advertencia si el caudal no se puede mantener sin un aporte de presión en la válvula (es decir, el caudal no se podrá mantener con la válvula totalmente abierta). Se debe tener especial atención en las FCV a la hora de simular un modelo hidráulico, ya que no pueden conectarse directamente a un depósito o tanque (utilice una tubería para separarlos).

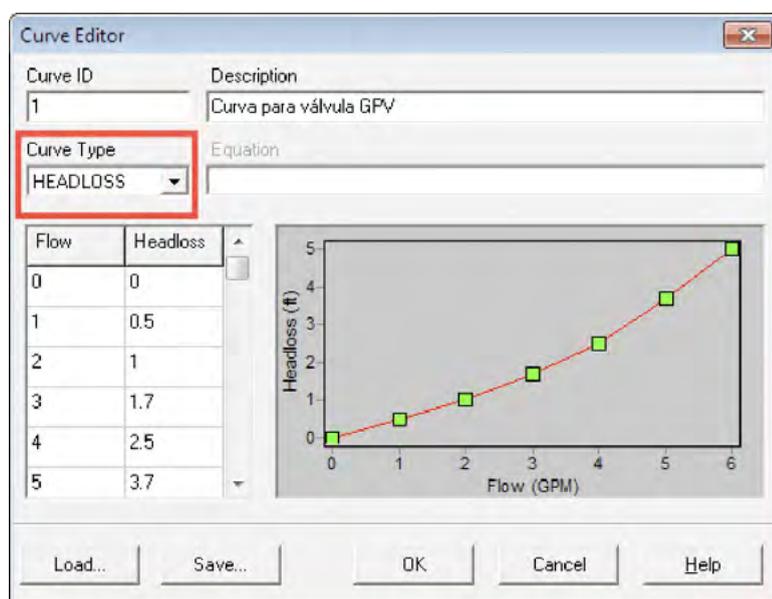
Válvula de regulación o reguladora por estrangulación (TCV): las TCV simulan una válvula parcialmente cerrada, ajustando adecuadamente el valor del coeficiente de pérdidas menores. Normalmente los fabricantes proporcionan una relación entre el grado de cierre de la válvula y el coeficiente de pérdidas resultante.

Válvula de propósito general (GPV): las GPV se utilizan para representar un elemento con un comportamiento diferente y una relación entre el caudal y las pérdidas de energía. Además, se puede hacer uso de esta válvula para simular otro tipo de elementos físicos en un sistema de acueducto. Por ejemplo, simular turbinas, pozos de aspiración o válvulas preventivas contracorriente y reductoras de caudal (Rossman, 2000).

Para lograr modelar una GPV se requiere de una curva característica (se utiliza la misma ruta de acceso descrita para una curva característica de una bomba) que relacione las pérdidas de energía en el eje de las ordenadas (expresado en metros) y el caudal en el eje de las abscisas (expresado en litros por segundo).

La curva se debe citar por medio de la identificación o ID en la propiedad *Consigna (Setting)*. En la figura 28 se muestra la curva para una válvula GPV. En el recuadro rojo se visualiza la opción que se debe elegir para la válvula GPV (para acceder a la construcción de una curva característica, vea el ejemplo 3).

Figura 28. Curva de pérdidas de energía para válvulas (GPV)



Consigna o tarado (Setting): es una propiedad obligatoria para modelar cualquier tipo de válvula en EPANET. La consigna o el tarado es un valor que depende del tipo de válvula a utilizar. En la tabla 2 se muestra cuál debe ser el valor de consigna o tarado en el sistema internacional de unidades para los tipos de válvula descritos.

Tabla 2. Valor a introducir en la propiedad *Consigna (Setting)*.

Tabla 2. Valor a introducir en la propiedad *Consigna (Setting)*.

Tipo de válvula	<i>Consigna (Setting)</i> a introducir en EPANET	Unidades de la <i>Consigna (Setting)</i>
Válvula reductora de presión (PRV)	Presión requerida aguas abajo de la válvula	Metros (m)
Válvula sostenedora de presión (PSV)	Presión requerida aguas arriba de la válvula	Metros (m)
Válvula de rotura de carga (PBV)	Presión de caída requerida entre el nudo aguas arriba y aguas abajo de la válvula	Metros (m)
Válvula limitadora o controladora de caudal (FCV)	Caudal a limitar o restringir en el tramo donde se encuentra instalada la válvula	Litros por segundo (L/s)
Válvula reguladora por estrangulación (TCV)	Coefficiente o constante de accesorio	Adimensional
Válvula de propósito general (GPV)	Nombre o ID de la curva característica que relaciona la pérdida de energía vs caudal	Nombre o ID de la curva característica de pérdidas

Fuente: el autor

Coefficiente de pérdidas: coeficiente adimensional de pérdidas menores que se aplica cuando la válvula está completamente abierta. Si se deja en blanco, EPANET asume un coeficiente de 0.

Esta propiedad no aplica para las válvulas reguladoras por estrangulación (TCV), ya que la consigna o tarado solicitado tiene en cuenta el coeficiente de pérdidas.

Estado fijo: estado de la válvula al inicio de la simulación. Si se elige "abierto" o "cerrado" entonces se ignora el control de la válvula y ésta empieza como un elemento abierto o cerrado respectivamente. Si se elige "ninguno", entonces la válvula comenzará la simulación según lo determinado.

Caudal: es un dato de salida y, por lo tanto, no es posible modificarlo desde esta propiedad. Muestra el caudal que circula por el tramo que contiene la válvula. Para el caso del sistema internacional de unidades el caudal se expresa en litros por segundo (L/s).

Velocidad: es un dato de salida y, por lo tanto, no es posible modificarlo desde esta propiedad. Muestra la velocidad media del fluido dentro de la válvula, su cálculo se basa en la conservación de masa (continuidad); la velocidad se obtiene de dividir el caudal por el área transversal de la válvula. Para el sistema internacional de unidades, la velocidad esta expresada en metros por segundo (m/s).

Pérdidas: es un dato de salida y, por lo tanto, no es posible modificarlo desde esta propiedad. Muestra la caída de energía en el tramo donde se encuentra instalada la válvula, debido al tipo de válvula utilizada en la simulación. La pérdida de energía esta expresada en metros (m) para el caso del sistema internacional de unidades.

Calidad: es un dato de salida y, por lo tanto, no es posible modificarlo desde esta propiedad. Muestra la caída de la concentración de cloro en contacto con la válvula. La concentración esta expresada en partes por millón (ppm) o miligramos por litro (mg/L).

Estado: es un dato de salida y, por lo tanto, no es posible modificarlo desde esta propiedad. Esta casilla identifica en qué períodos la válvula se encuentra abierta o cerrada.



EJERCICIOS APLICADOS CON NIVEL DE COMPLEJIDAD BÁSICA

Los ejercicios que se van a plantear en éste y en los próximos volúmenes son formulados de manera práctica para entender cómo aprovechar al máximo las herramientas tecnológicas brindadas por EPANET. Dichos ejercicios no comprometen aspectos de diseño ni responsabilizan al autor si se implementaran en la vida real; eso no excluyo, sin embargo, el rigor académico que se tuvo para entregar al lector un material útil para la vida profesional y universitaria.

2.1 Ejercicio 1: línea matriz con suministro por gravedad

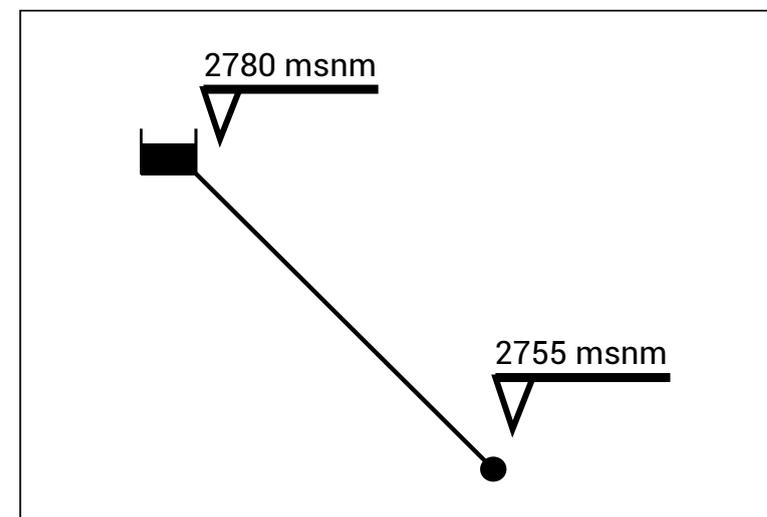
En este ejercicio se busca simular y obtener datos hidráulicos como presión, caudal y velocidad para una línea matriz de acueducto que une a un tanque de almacenamiento con la red de distribución sin servicio de suministro en ruta (figura 29).

Los parámetros obtenidos deben ser analizados por la normativa correspondiente al sector nacional o local en Colombia.

Determine el diámetro comercial que garantice una presión a la entrada de la red de distribución de 196 kPa (kilo Pascales) con base en las siguientes condiciones:

- Según el levantamiento topográfico, el tanque de almacenamiento cuenta con una altura piezométrica de 2780 msnm (metros sobre el nivel del mar), mientras que, para el punto donde inicia la red de distribución, el nivel topográfico es de 2755 msnm.
- La tubería es de acero soldado nuevo ($C_{H-W} = 130$) con una longitud de 250 m (metros). La línea de conducción cuenta con los siguientes accesorios: 2 válvulas de compuerta, 10 uniones y 2 semicodos.
- Según el estudio demográfico, de industrias y el requerimiento de hidrantes, se requiere transportar un caudal de 147,6 m³/h (metros cúbicos por hora).

Figura 29. Planteamiento de ejercicio 1¹



2.1.1 Solución a ejercicio 1

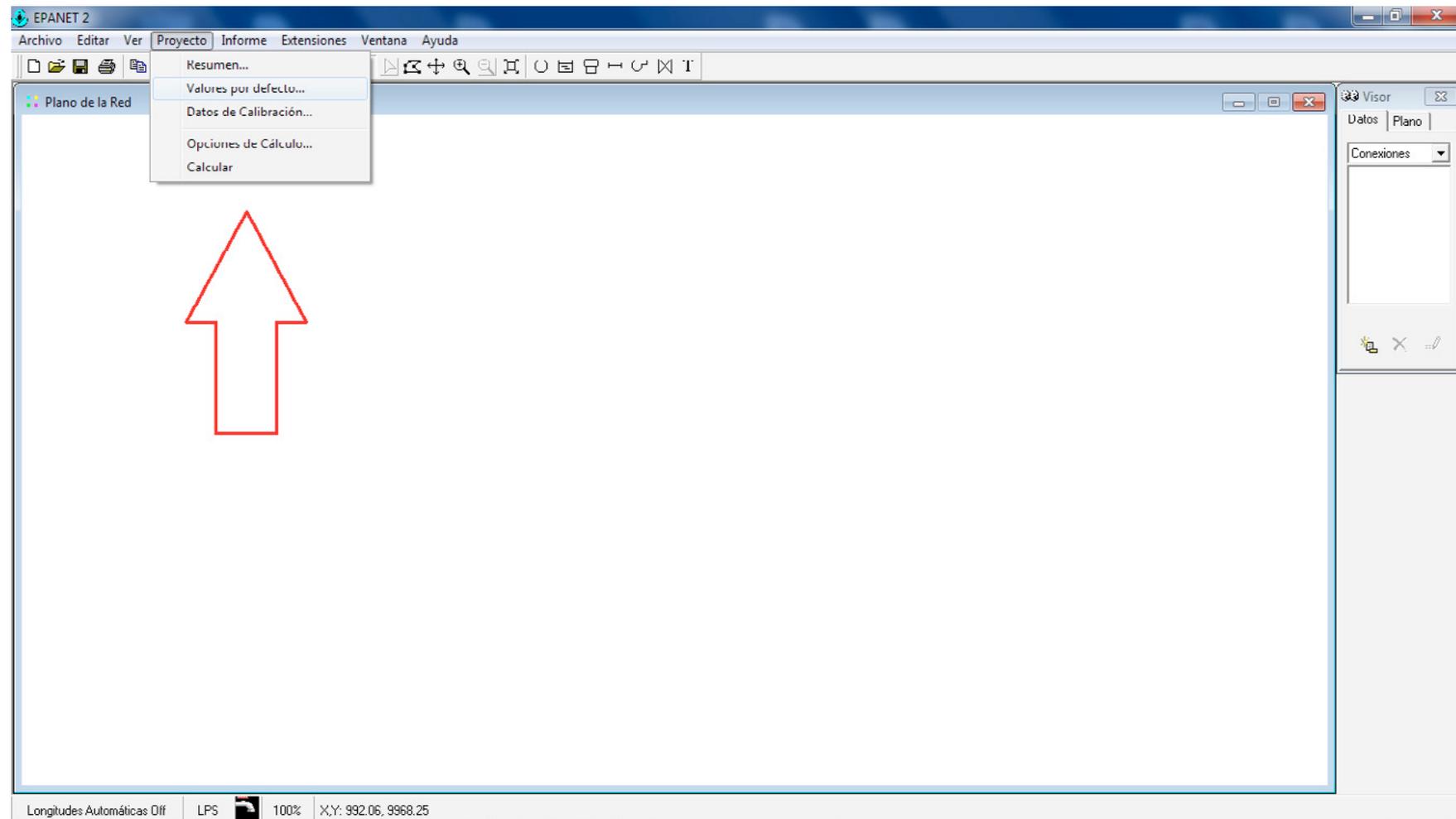
Para la simulación del ejercicio propuesto, se debe iniciar con la configuración de EPANET. El primer paso a realizar es la elección del sistema de unidades a utilizar, la metodología para el cálculo de las pérdidas de energía, el tipo de fluido y las demás opciones que faciliten el entendimiento del modelo.

Paso A: configuración de unidades de medida, propiedades del fluido y metodología para el cálculo de pérdidas.

Luego de abrir EPANET, en la barra menú se da clic en la opción *Proyecto >> Valores por defecto*. En la figura 30 se visualiza la forma de acceder a la configuración del modelo.

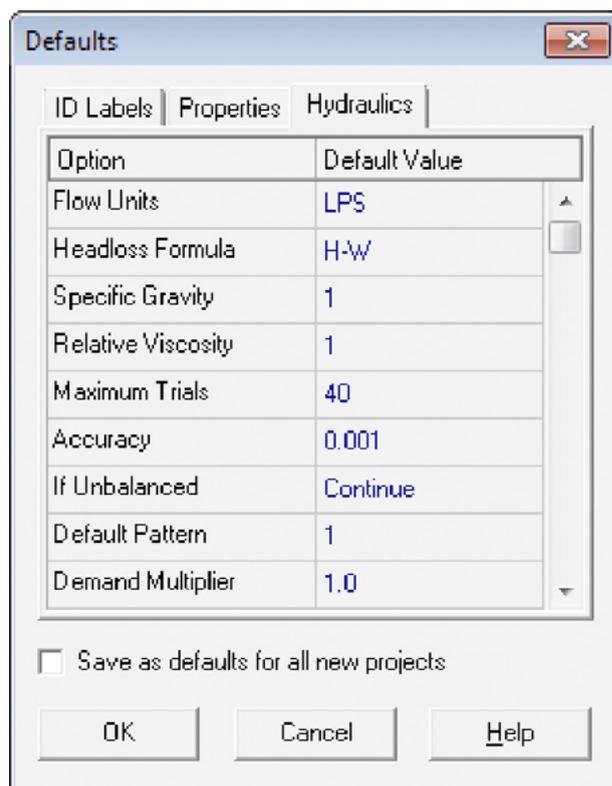
1. La fuente de todas las imágenes es el autor, excepto en los casos en los que se indica lo contrario.

Figura 30. Valores por defecto para iniciar modelo



La vista del menú *Opciones hidráulicas* se presenta en la figura 31.

Figura 31. Valores por defecto, opciones hidráulicas



En la pestaña *Opciones hidráulicas* se accede a la configuración de los parámetros que se deben tener en cuenta antes de iniciar la simulación de un modelo. Para el caso del ejercicio propuesto, se configuran las *Unidades de caudal* en LPS (litros por segundo); la *Ecuación de Pérdidas* con H-W (Hazen-Williams); *El Peso específico* y la *Viscosidad relativa* se configuran como 1, dado que el fluido a transportar es agua.

Las demás propiedades se deben dejar predeterminadas tal como aparece en EPANET, para finalmente dar clic en el botón *Aceptar*.

Al seleccionar las unidades del caudal en litros por segundo, de forma automática EPANET asume el sistema internacional de unidades y relaciona las unidades que se muestran en la tabla 3 para las tuberías y nudos (embalse, tanque y conexiones) del modelo.

Tabla 3. Sistema internacional de unidades para EPANET

Objeto	Parámetro	Unidad
Tuberías	Longitud	Metros (m)
	Diámetro	Milímetros (mm)
	Rugosidad	D-W milímetros (mm), para H-W y C-M consultar los coeficientes con relación a los materiales
	Caudal	Litros por segundo (L/s)
	Velocidad	Metros por segundo (m/s)
	Pérdida unitaria	Metros por kilómetros (m/km)
	Factor de fricción	Adimensional (Factor de Darcy-Weisbach: f)
	Velocidad de reacción	Miligramos por litro por día (mg /L/día)
	Calidad	Miligramos por litro (mg/L)
	Cota	Metros (m)
Nudos	Demanda base	Litros por segundo (L/s)
	Altura total	Metros (m)
	Presión	Metros (m)
	Calidad inicial	Miligramos por litro (mg/L)
	Calidad	Miligramos por litro (mg/L)

Se debe tener especial cuidado en EPANET con los parámetros correspondientes al *Peso específico (Gravedad específica)* y *Viscosidad relativa*, ya que estas propiedades se obtienen a través de las siguientes expresiones:

$$\text{Peso Específico (adimensional)} = \frac{\text{densidad del fluido} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)}{\text{densidad del agua a } 4^\circ\text{C} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)}$$

$$\text{Viscos. Relativa (adimensional)} = \frac{\text{Viscos. Cinemática del fluido} \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right)}{\text{Viscos. Cinemática del agua a } 20^\circ\text{C} \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right)}$$

Los parámetros introducidos en EPANET (véase figura 31) para la *Viscosidad relativa* y el *Peso específico* obedecen a un valor de 1, ya que se asume una temperatura promedio de 15 grados centígrados para el agua, lo cual no representa grandes cambios en dichas propiedades.

En algunos casos, especialmente en sistemas hidráulicos para aplicaciones industriales, se requieren fluidos diferentes al agua. Por esa razón se deben introducir los valores respectivos para las propiedades descritas anteriormente, teniendo especial cuidado de realizar la simulación del modelo bajo la metodología de Darcy-Weisbach para pérdidas de energía, puesto que es la única metodología que no tiene restricciones en cuanto a tipo de fluidos ni a los regímenes de Reynolds.

Paso B: objetos físicos (embalse, conexión y tubería).

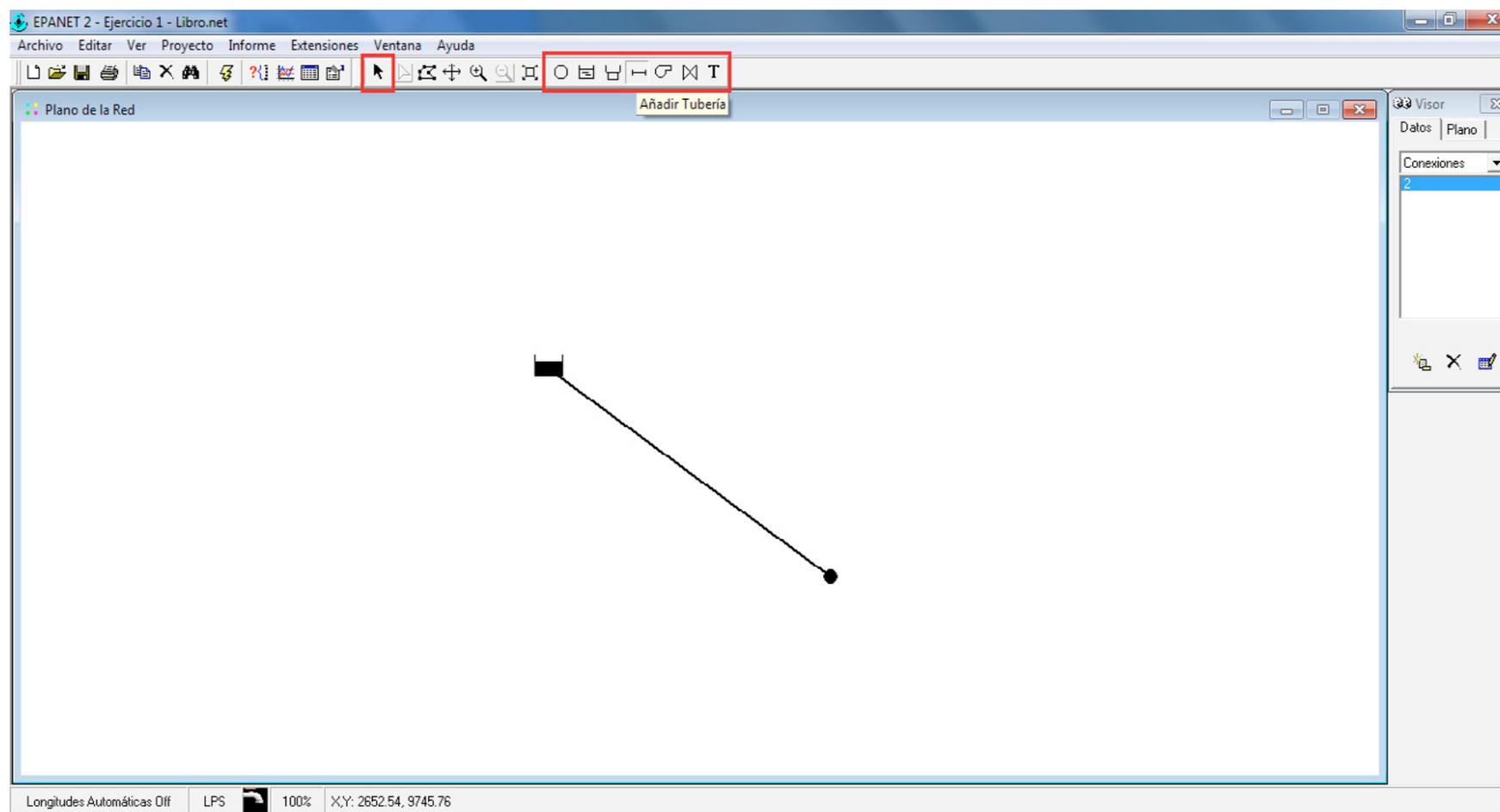
Ya configurado EPANET, el paso siguiente es introducir los objetos físicos del ejercicio planteado. Los elementos que se requieren son: un nudo que suministre agua al sistema (embalse), un nudo final que conecte el embalse a la red de distribución (conexión) y una tubería que una dichos puntos.

Primero se debe utilizar la barra de herramientas del plano, seleccionando cada elemento y colocándolo en el área de trabajo dispuesta para tal fin. Después, se introducen el embalse y el nudo. Para realizar esta acción, seleccione cada elemento desde la barra de herramientas del plano resaltada en el recuadro rojo superior derecho como aparece en la figura 32. Cada vez que se elija un elemento desde la barra de herramientas, se debe dar clic en el plano de la red y ubicar el elemento donde se desee.

Para volver al cursor del ratón, se debe seleccionar el ícono del puntero desde la barra de herramientas estándar, como se muestra en el recuadro rojo superior izquierdo resaltado en la figura 32.

Después de tener el embalse y el nudo en el plano de la red, se selecciona el ícono añadir tubería, para luego dar clic en el embalse y después en el nudo, conformando el tramo embalse-nudo (véase figura 35).

Figura 32. Introducción de elementos para el ejercicio 1



Hasta ahora se han cargado los elementos físicos del ejercicio, el siguiente paso es introducir las propiedades de cada uno de ellos, con relación a la información suministrada en el enunciado.

Paso C: introducir propiedades a elementos físicos.

Para introducir las propiedades de los elementos físicos, basta con dar doble clic sobre cada uno de ellos. Los valores de caudal de demanda y presión requerida en el nudo deben estar expresados en unidades compatibles con el sistema internacional; para este caso, es necesario llevar a cabo la conversión para obtener el caudal en litros por segundo y la presión en metros de columna de agua, la manera de hacerlo es así:

- Para el caso de la presión:

$$\text{Presión requerida} = 196,2 \text{ kPa} = 196200 \text{ Pa} = 196200 \text{ N/m}^2$$

$$\text{Presión} = \text{Peso específico del agua} \times \text{altura}$$

$$\text{Altura} = \frac{\text{Presión}}{\text{Peso específico del agua}} = \frac{196200 \text{ N/m}^2}{9810 \text{ N/m}^3} = 20 \text{ m}$$

- Para el caso del caudal:

$$\text{Caudal de demanda} = 147,6 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$147,6 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 41 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

Cabe resaltar que la presión requerida (20 m) no es un valor de entrada en las propiedades del nudo; al contrario, es un valor a calcular con base en la pérdida de energía por fricción que se encuentra en función al diámetro que se va a diseñar.

Por lo tanto, se asume un diámetro de 250 mm para iniciar la simulación, pero se debe estimar el diámetro adecuado.

La información a introducir para el ejercicio en EPANET se resume en la tabla 4.

Tabla 4. Valores a introducir para el ejercicio I

Objeto	Parámetro	Valor	
Tubería	Longitud	250 m	
	Diámetro interno	Se asume un diámetro inicial de 10 pulgadas equivalente a 250 mm	
	Rugosidad	130	
	Accesorios instalados en el tramo de la tubería (coeficiente de pérdidas)	Constante de accesorio (Km)	
		2 válvulas de compuerta	2 x 0,2 = 0,4
		10 uniones	10 x 0,3 = 3
		2 semicodos	2 x 0,4 = 0,8
Total de constantes en el tramo	Km _{total} = 4,2		
Embalse	Cota	No aplica	
	Demanda base	No aplica	
	Altura total	2780 (m)	
	Calidad inicial	No aplica para este ejercicio	
Nudo	Cota	2755 m	
	Demanda base	41 L/s	
	Calidad inicial	No aplica para este ejercicio	

Figura 33. Propiedades para embalse en ejercicio 1

The screenshot displays the EPANET 2 interface. The main window, titled 'Plano de la Red', shows a network diagram with two nodes, 1 and 2, connected by a pipe. Node 1 is a reservoir, indicated by a red arrow pointing to its symbol. The 'Embalse 1' properties dialog box is open, showing the following table:

Propiedad	Valor
ID Embalse	1
Coordenada-X	2666.87
Coordenada-Y	6229.97
Descripción	
Etiqueta	
Altura total	2780
Patrón de Altura	
Calidad Inicial	
Fuente de Calidad	

The 'Altura total' property is highlighted with a red box. The network diagram shows a pipe with a length of 1 connecting node 1 to node 2. The status bar at the bottom indicates 'Longitudes Automáticas Off', 'LPS', '100%', and 'X,Y: 10579.37, 3666.67'.

Figura 34. Propiedades para conexión o nudo en ejercicio 1

The screenshot displays the EPANET 2 interface. The 'Conexión 2' dialog box is open, showing the following properties:

Propiedad	Valor
*ID Conexión	2
Coordenada X	6993.32
Coordenada Y	3051.22
Descripción	
Elementos	
*Pinta	2755
Demanda Base	41
Patrón de Demanda	
Categoría de Demanda	1
Coef. Emisor	
Calidad Inicial	
Fuente de Calidad	

The main window shows a network diagram with two nodes (1 and 2) connected by a pipe. A red arrow points to node 2. The status bar at the bottom indicates 'Longitudes Automáticas: Off'.

Las propiedades de la tubería se introducen al igual que los elementos anteriores. Tenga especial cuidado al verificar que la opción *Longitudes automáticas* se encuentre desactivada (*Off*). En el recuadro rojo inferior izquierdo de la figura 35 se resalta la opción.

Figura 35. Propiedades para tubería en ejercicio 1

Finalmente, se debe dar clic en el ícono *Iniciar análisis* para ejecutar la simulación del modelo cargado.

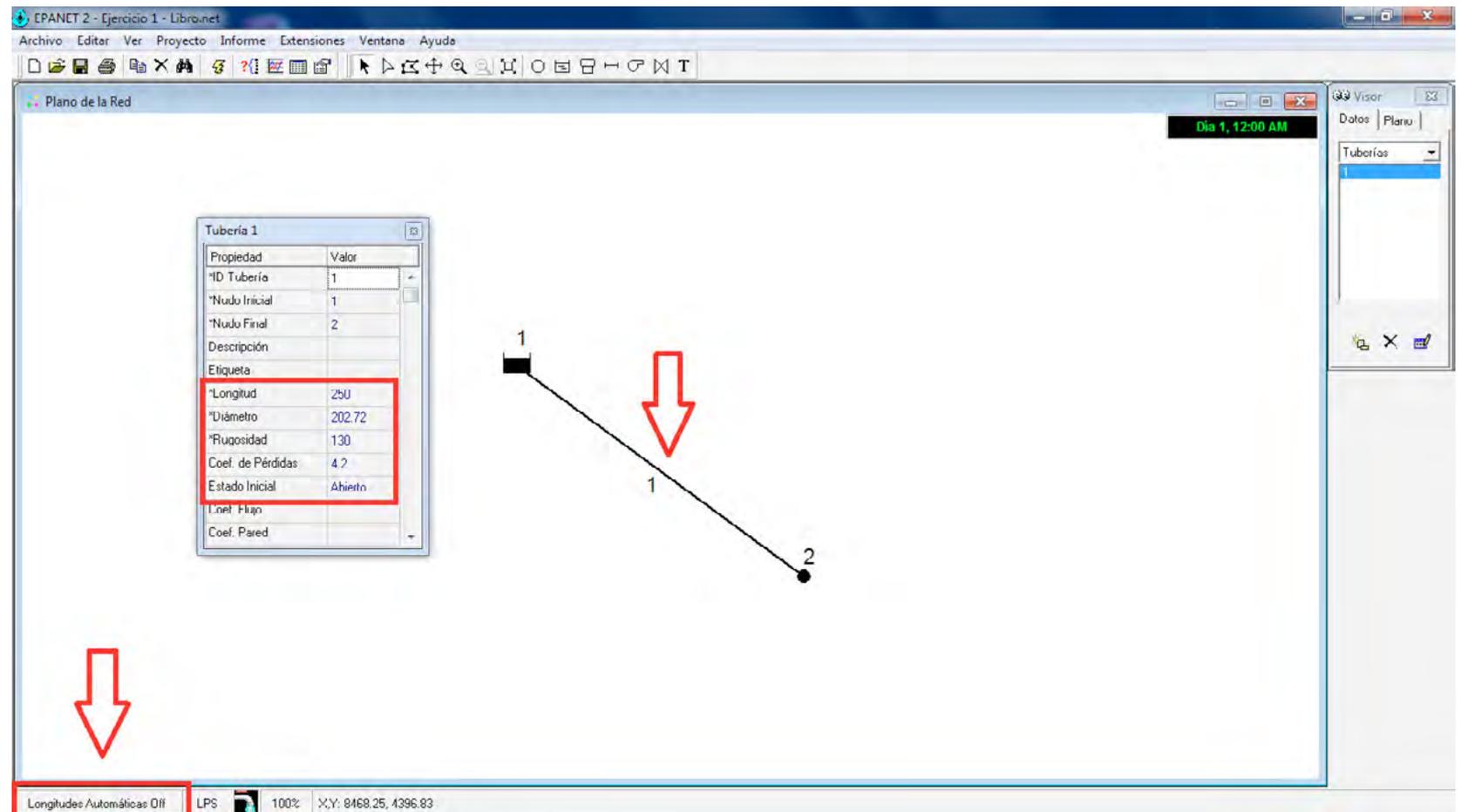
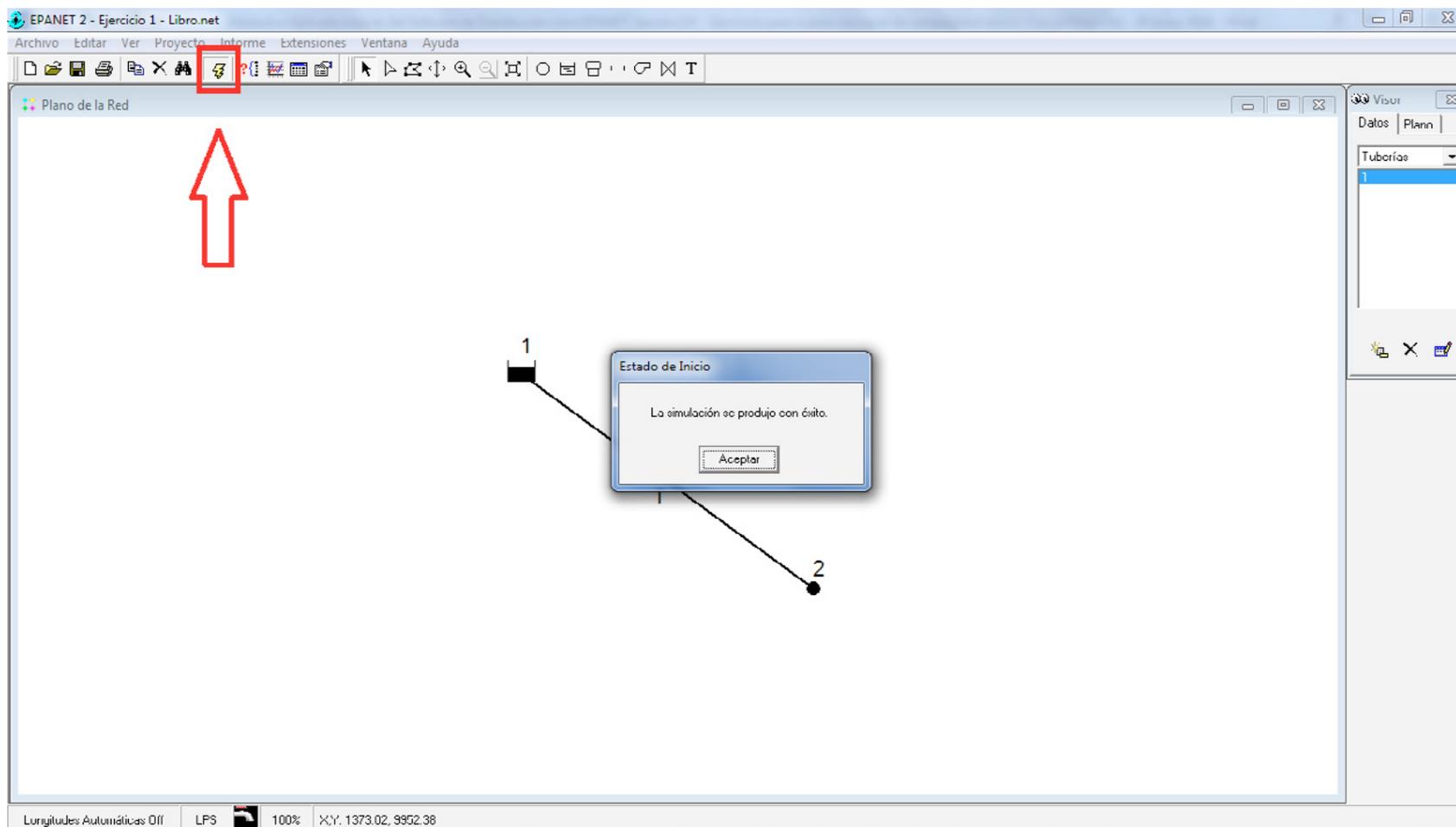


Figura 36. Ejecutar simulación para ejercicio I



Luego de dar clic en el botón *Aceptar*, el ícono de un grifo de agua ubicado en la barra de estado (costado inferior izquierdo de la pantalla) cambia de cerrado a abierto.

Figura 37. Visualizar presión y caudal para un modelo (1)

Al iniciar la simulación, EPANET no muestra ningún cambio entre el modelo antes y después de la ejecución, por lo cual, se deben visualizar los resultados a partir de las opciones que se encuentran en la pestaña *Plano* del visor ubicado en el costado derecho de la pantalla. La figura 37 muestra el procedimiento descrito.

Al seleccionar la pestaña *Plano*, EPANET permite visualizar los resultados en líneas y nudos por medio de una codificación de colores y leyendas en relación con los valores calculados.

Las leyendas se muestran en el costado izquierdo con una escala de los resultados. Para el caso anterior, la primera leyenda muestra la presión con un color dado cada 25 m, en la segunda se observa el caudal en distintos colores cada 25 LPS.

Con la codificación de las leyendas, los elementos físicos de EPANET se tornan de distintos colores en relación con el valor calculado para la simulación. En la figura 37 se ve el tramo de la tubería en color azul claro y la conexión (nudo) en azul, por ende, se puede deducir que en la tubería están circulando entre 25 y 50 LPS, mientras que la presión en la conexión es del orden de 0 a 25 m.

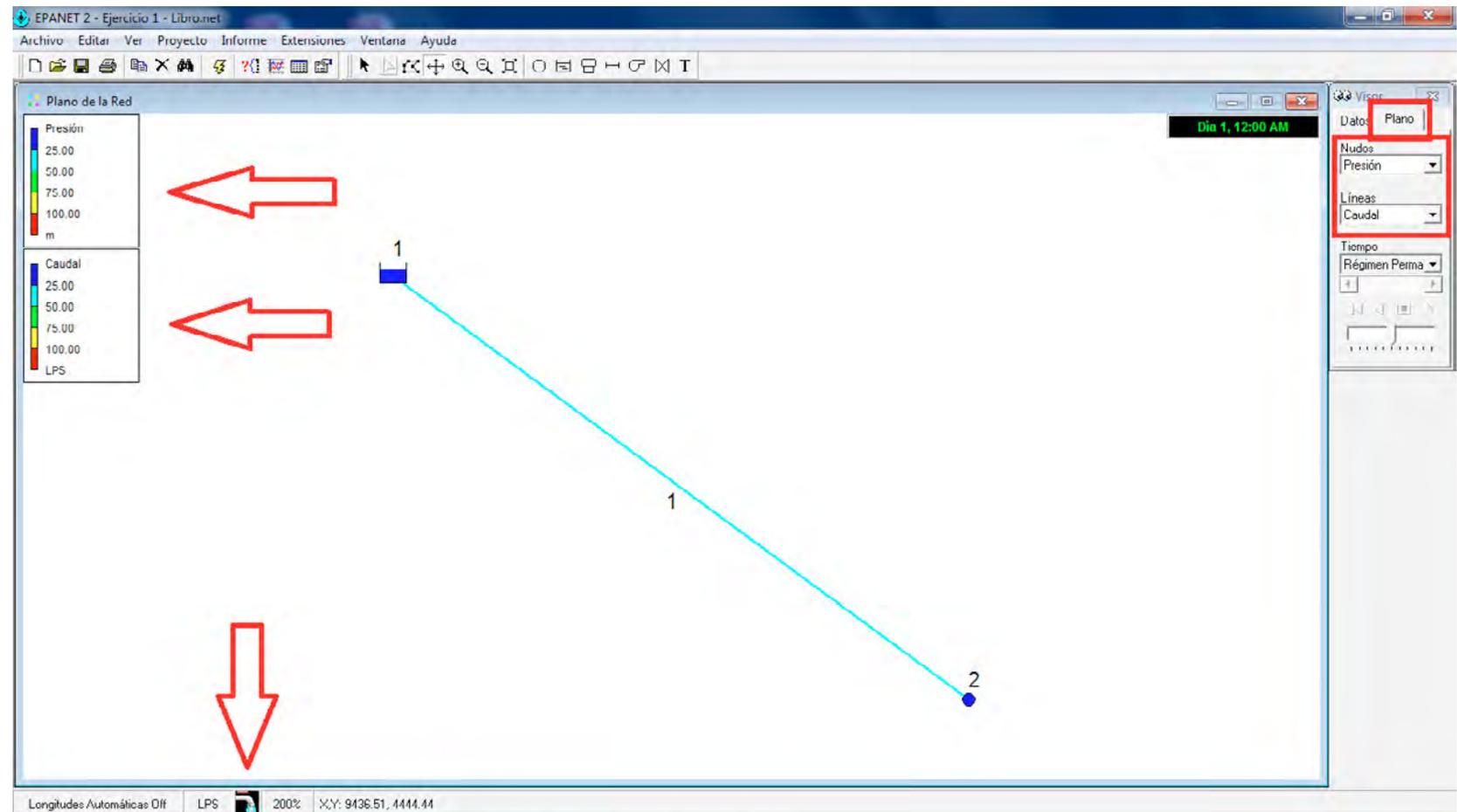
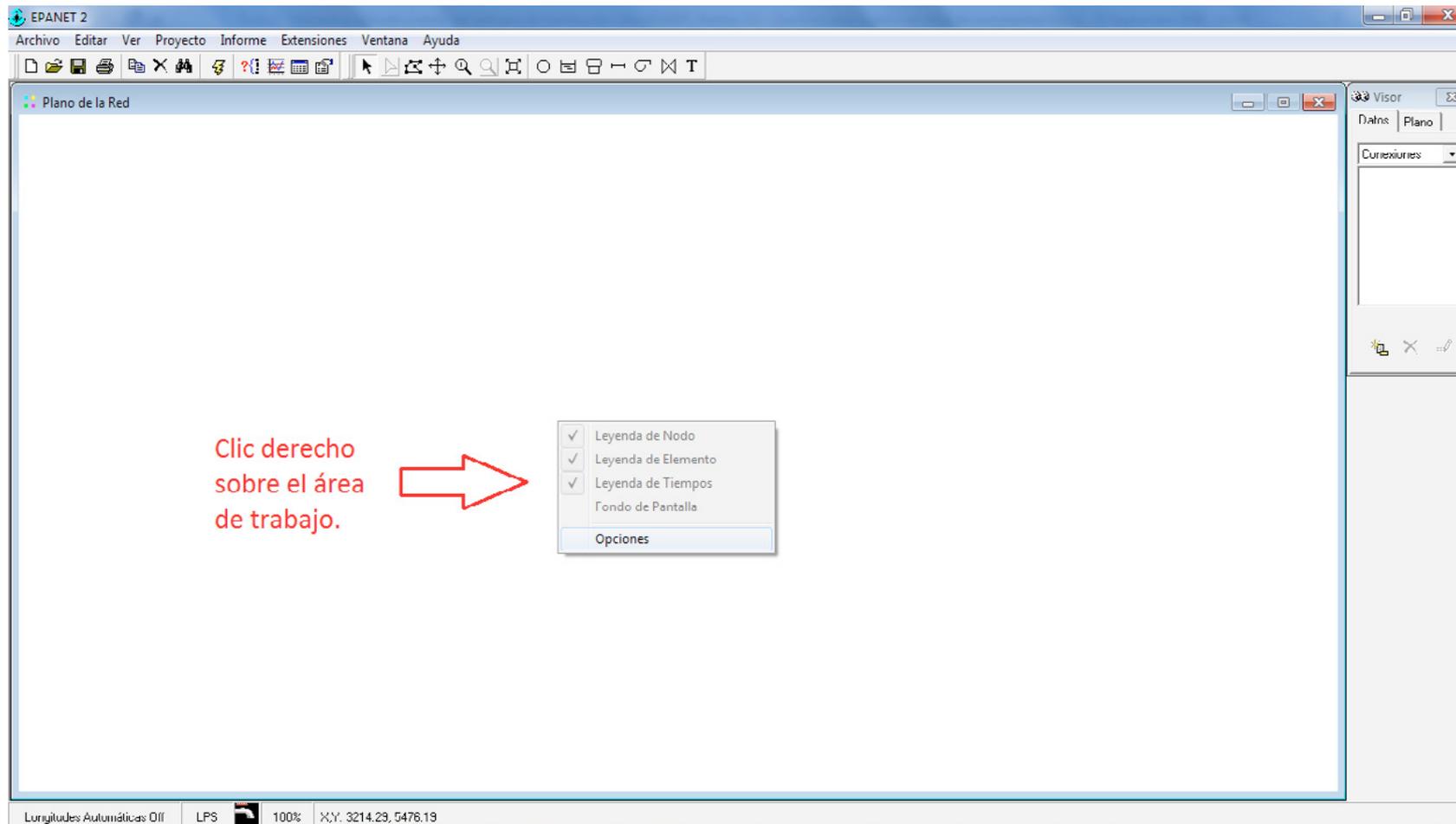


Figura 38. Configuración visual de EPANET

Para establecer el valor exacto del caudal y de la presión, sólo se requiere realizar la siguiente configuración: en el área de trabajo (plano de la red) se da clic derecho y se selecciona en la ventana de diálogo el menú *Opciones*, como se muestra en la figura 38.

Luego de dar clic en el menú *Opciones*, EPANET despliega una ventana que permite llevar a cabo distintas configuraciones visuales. En la primera pestaña, *Nudos*, se aumenta el valor del tamaño del nudo a 6; en la segunda, *Líneas*, se incrementa el valor del tamaño de la línea a 2; en *Etiquetas*, se seleccionan todas las casillas de verificación, se aumenta el tamaño de la fuente a 15; en *Flechas de caudal*, se elige el estilo de la flecha rellena con un tamaño de 6; finalmente, se da clic en la pestaña *Fondo* para poner el color blanco como fondo y dar clic en el botón aceptar. La figura 39 presenta lo descrito.

Las opciones descritas en la figura 39 pueden ser tomadas según la necesidad del usuario y las exigencias del modelo. Se recomienda llevar a cabo esta configuración para cada modelo y acomodar las opciones en relación con los requerimientos de resultados.

La interfaz gráfica es más completa y agradable, pues presenta la información de caudal y presión con un valor numérico exacto; sin embargo, la escala establecida en las leyendas no está acorde al rango de valores que utiliza el modelo.

Figura 39. Visualizar presión y caudal para un modelo (2)

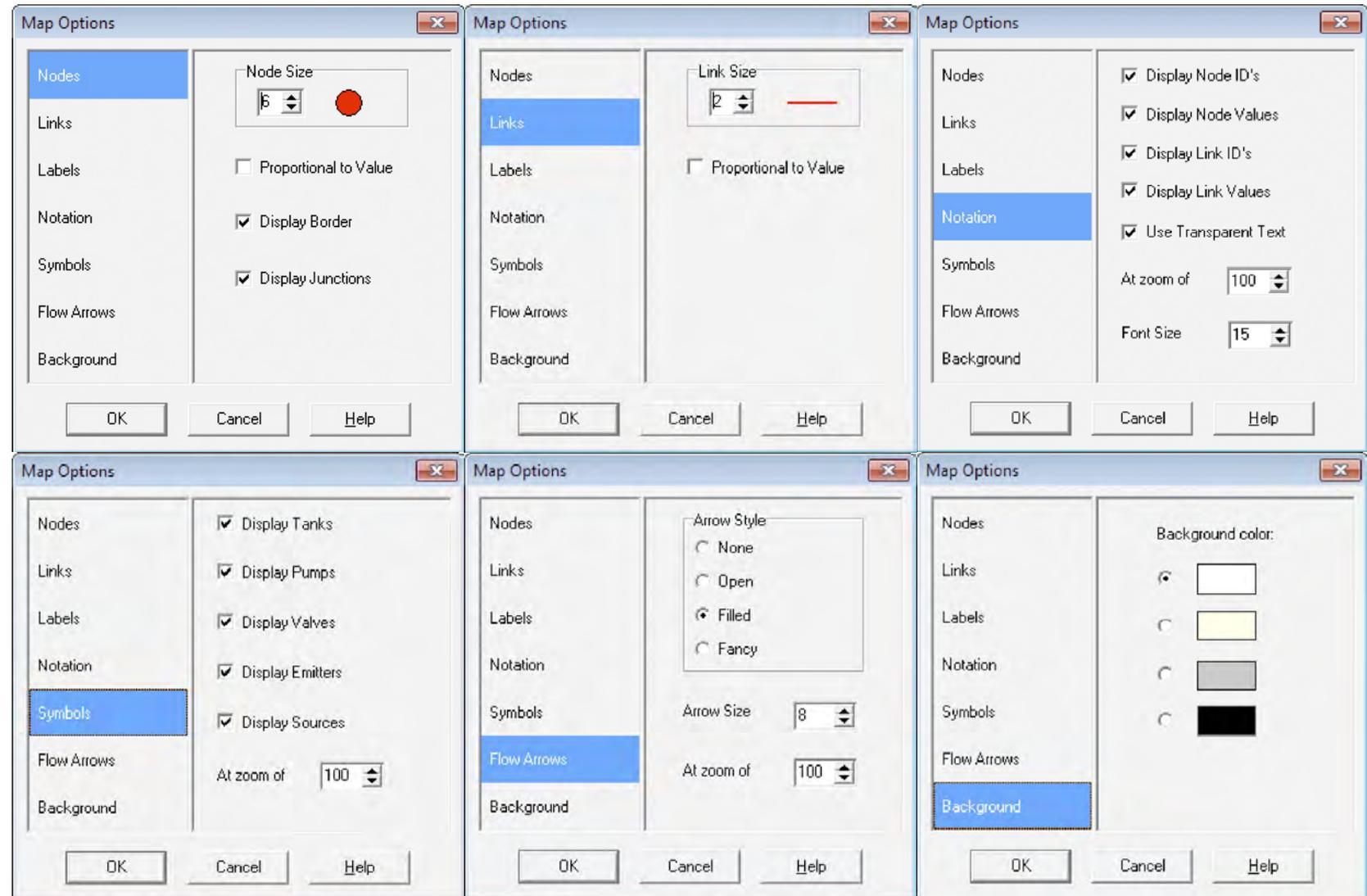
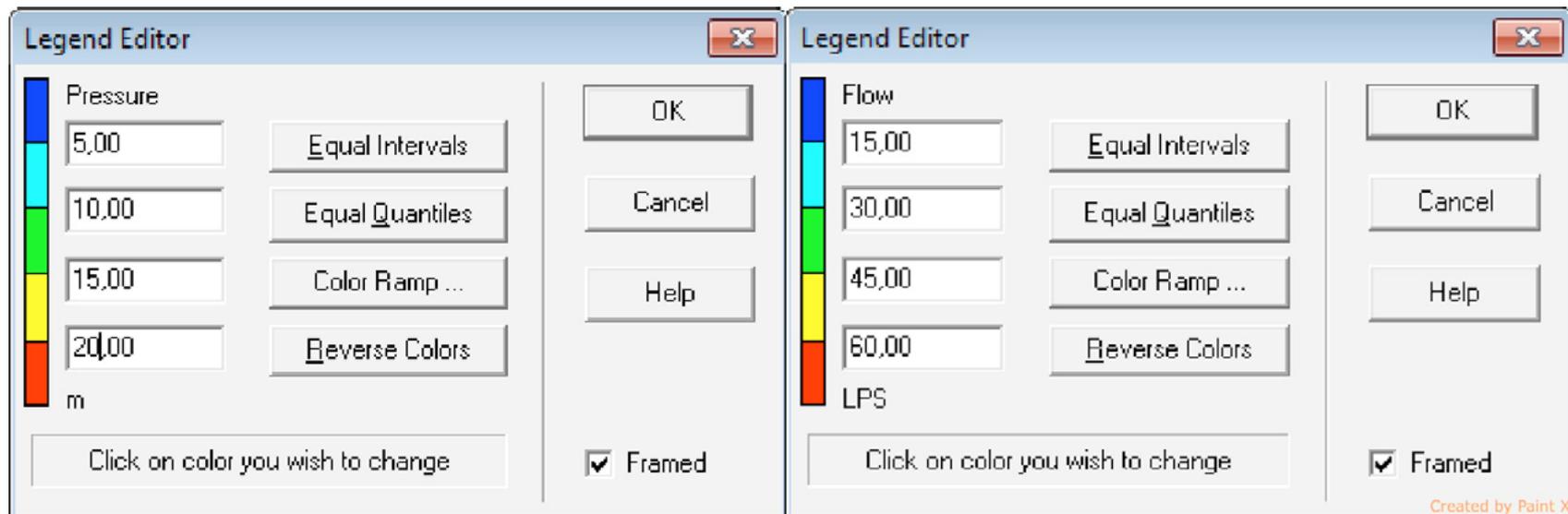


Figura 40. Edición escala de colores



Para editar la escala de colores en las leyendas, se requiere dar clic derecho sobre la leyenda a editar. La figura 40 muestra la ventana de diálogo para este proceso. Los valores de los límites de cada color deben ser los mismos que aparecen en la figura 40.

Al finalizar la introducción de los límites de cada leyenda, se debe dar clic en el botón *Aceptar* para visualizar cómo los elementos físicos cambian de color, según los nuevos límites de la codificación.

Hasta el momento se ha obtenido un modelo con los valores introducidos en las propiedades de cada uno de los elementos físicos. El objetivo principal del ejercicio es determinar el diámetro económico que garantice una presión de servicio al inicio de la red de distribución de 196,2 kPa (20 m).

Para iniciar el análisis se asumió un diámetro de 250 mm para observar el comportamiento hidráulico del tramo, pero aún no se ha dado solución al problema planteado.

En la tabla 5 se resumen los parámetros hidráulicos obtenidos del modelo con un diámetro de 250 mm.

Tabla 5. Resultados para línea matriz de 250 mm

Elemento	Caudal (LPS)	Velocidad (m/s)	Pérdida unitaria (m / km)	Factor de fricción de Darcy (Adim.)	Presión (m)	Nivel piezométrico (m)
Tubería 1	41	0.84	3.59	0.025	No aplica	No aplica
Nudo 2	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	24.10	2779.1
Embalse 1	-41	No aplica	No aplica	No aplica	0	2780

Cabe resaltar que los valores de nivel piezométrico para los nudos o conexiones y para los embalses aparecen en la propiedad *Altura total*.

El valor del caudal en los embalses se visualiza en las propiedades (figura 41) con el nombre *Caudal neto entrante*, y muestra el valor del caudal que está suministrando a la red a la hora de la simulación. Posee el signo menos (-) para indicar que el agua está saliendo del embalse.

Figura 41. Caudal neto entrante a la red

Property	Value
*Reservoir ID	1
X-Coordinate	2666.87
Y-Coordinate	6229.97
Description	
Tag	
*Total Head	2780
Head Pattern	
Initial Quality	
Source Quality	
Net Inflow	-41.00
Elevation	2780.00
Pressure	0.00
Quality	0.00

Paso D: diámetro económico.

Para finalizar el ejercicio, se cambia el diámetro en EPANET hasta encontrar un valor que permita establecer una presión en el nudo 2 de 20 metros o más. En la tabla 6 se muestran los resultados obtenidos para una tubería con un diámetro de 174,1 mm.

Nota: cada vez que el usuario modifique algún valor en las propiedades de los elementos físicos, es necesario volver a dar clic en el ícono *Iniciar análisis* para que EPANET asuma los nuevos valores en las propiedades y pueda volver a ejecutar la simulación del modelo.

Tabla 6. Resultados para línea matriz de 174,1 mm

Elemento	Caudal (LPS)	Velocidad (m/s)	Pérdida unitaria (m/km)	Factor de fricción de Darcy (Adim.)	Presión (m)	Nivel Piezométrico (m)
Tubería 1	41	1.72	20.00	0.023	No aplica	No aplica
Nodo 2	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	20.00	2775
Embalse 1	-41	No aplica	No aplica	No aplica	0	2780

El diámetro mínimo que permite obtener una presión de 20 m es el encontrado en la tabla 6 (174,1 mm). El análisis inició con un valor de 250 mm y fue reducido en un 70%, mejorando el sistema, ya que se genera un buen funcionamiento hidráulico en la red a un menor costo.

Nota: el diámetro a introducir en EPANET es el diámetro útil de la tubería (diámetro en contacto con el agua).

Paso E: diámetro comercial.

El diámetro obtenido en el paso C obedece al diámetro mínimo que garantiza la presión requerida, pero es importante tener en cuenta que comercialmente los diámetros de las tuberías vienen dados por diámetro nominal (comercial) y diámetro interior (diámetro útil). Por esa razón, a la hora de diseñar un sistema, se debe hacer con base en los diámetros comerciales, pero teniendo en cuenta para la simulación hidráulica el diámetro interior.

Para el caso del ejercicio planteado, el valor encontrado del diámetro es de 174,1 mm, que es un valor aproximado a 6,85 pulgadas, el cual comercialmente no existe. En relación con los diámetros comerciales disponibles para tuberías en acero, la tabla 7 indica la serie de diámetros discretos fabricados y comercializados por la empresa X.

Tabla 7. Diámetro interno para tuberías de acero

Diámetro nominal (Pulg)	Diámetro exterior (Pulg)	Espesor de pared (Pulg)	Calibre (SCH)
4	4.5	0.237	40
6	6.625	0.28	40
8	8.625	0.322	40

Como se observa en la tabla 7, el diámetro que más se aproxima al requerido es el de 6 pulgadas, y ya que el ejercicio precisa un diámetro interno de 174,1 mm, se obtiene que:

$$\text{Diámetro interno (6")} = \text{Diámetro exterior} - 2 \text{ veces el espesor de pared}$$

$$\text{Diámetro interno (6")} = 6,625 - (2 \times 0,28)$$

$$\text{Diámetro interno (6")} = 6.065 \text{ pulgadas} = 154,1 \text{ mm}$$

El diámetro interno requerido debe ser como mínimo de 174,1 mm, por lo tanto, no satisface el requerimiento y se debe reevaluar el sistema con un diámetro superior como se indica a continuación:

$$\text{Diámetro interno (8")} = 8.625 - (2 \times 0.322)$$

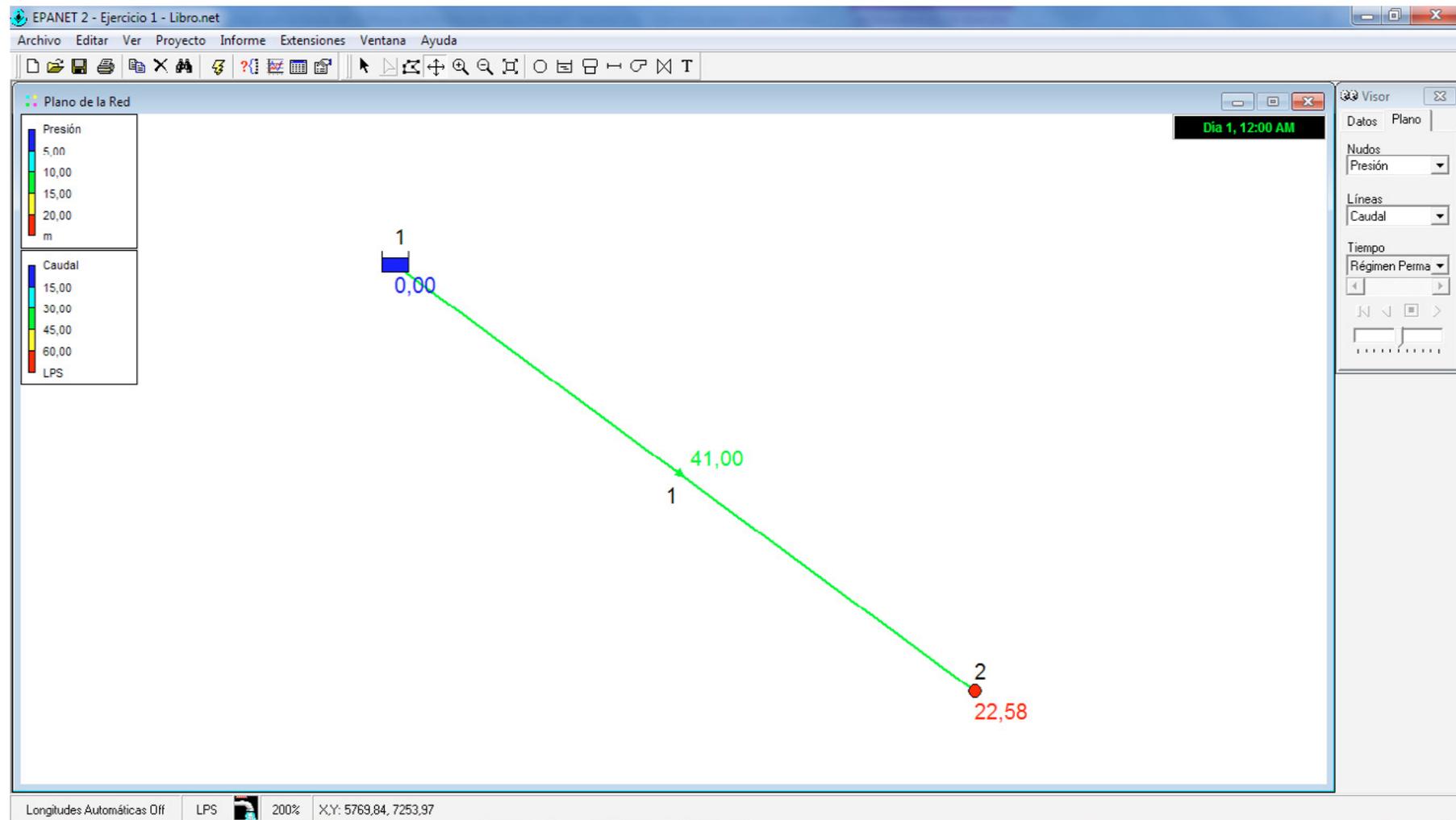
$$\text{Diámetro interno (8")} = 7,981 \text{ pulgadas} = 202,72 \text{ mm}$$

Con el diámetro encontrado se realiza una nueva simulación en EPANET (véase figura 42), para obtener los datos que se muestran en la tabla 8.

Tabla 8. Resultados para línea matriz de 202,72 mm

Elemento	Caudal (LPS)	Velocidad (m/s)	Pérdida unitaria (m/km)	Factor de fricción de Darcy (Adim.)	Presión (m)	Nivel piezométrico (m)
Tubería 1	41	1.27	9.70	0.024	No aplica	No aplica
Nodo 2	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	22.58	2777.58
Embalse 1	-41	No aplica	No aplica	No aplica	0	2780

Figura 42. Resultado para línea matriz de 202.72 mm



Paso F: análisis de resultados.

Uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta en un modelo hidráulico a presión es la caída o pérdida de energía producida en el sistema. Una manera rápida de establecer cuál es la pérdida de energía por fricción en un tramo dado es utilizando el valor de la pérdida unitaria.

La pérdida unitaria se define como la relación que existe entre la pérdida de energía y la longitud del tramo analizado (pendiente de la línea de energía). Por lo tanto, la pérdida de energía se obtiene del producto entre la longitud de la tubería y la pérdida unitaria, en unidades compatibles.

La pérdida unitaria para el modelo final simulado es de 9,70 m/km, con lo cual se puede determinar la pérdida de energía por fricción así:

$$hf = 9,70 \frac{m}{km} \times 0,250 km = 2,43 m$$

Otra alternativa para el cálculo de la pérdida de energía es utilizar el factor de fricción de Darcy obtenido en la modelación. Aunque la metodología utilizada para el cálculo hidráulico del ejercicio fue la de Hazen-Williams, EPANET obtiene como resultado el factor de fricción de Darcy-Weisbach.

Si se utiliza el factor de fricción en el modelo de pérdidas de D-W se obtiene:

$$hf = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2 \times 9,81 m/s^2}$$

Donde:

hf : pérdida de energía (m).

f : factor de fricción de Darcy (adimensional)

L : longitud del tramo de tubería (m).

D : diámetro interno del tramo de tubería (m).

v : velocidad media del fluido $\left(\frac{m}{s}\right)$.

$$hf = 0,024 \times \frac{250 m}{0,20272 m} \times \frac{1,27^2 m/s}{2 \times 9,81 m/s^2} = 2,43 m$$

Por lo tanto, la presión en el nudo 2 se obtiene de restar el nivel piezométrico en el embalse (*Altura total*) con la pérdida de energía, más el nivel topográfico del nudo.

$$Presión\ nudo_2 = Nivel\ piezom.\ embalse - (hf + Nivel\ topográfico\ nudo_2)$$

$$Presión\ nudo_2 = 2780 m - (2,43 m + 2755 m)$$

$$Presión\ nudo_2 = 22,57 m$$

A partir del análisis anterior se pueden verificar los valores obtenidos por medio del software.

Para líneas de conducción es importante referenciar los valores obtenidos, con respecto a los criterios de cada normativa. Para el caso de la velocidad, el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS, 2011) establece que la velocidad mínima en líneas de conducción debe ser de 0,50 m/s.

En la tabla 9 se muestran los valores máximo y mínimo de la velocidad según el RAS (2011) y la Empresa de Acueducto de Bogotá (EAB).

Tabla 9.

Velocidades máximas y mínimas para líneas de conducción

Velocidad	RAS - 2011	EAB
Mínima	0,50 m/s	0,50 m/s
Máxima	6,00 m/s	4,00 m/s
Mínima bajo consideración de biopelícula	1,00 m/s	No aplica
Mínima para remoción de biopelícula	1,80 m/s	No aplica

Fuente: RAS (2011) y EAB

Del ejercicio propuesto se puede concluir que se cumple con los parámetros mínimos establecidos por la normativa nacional (RAS, 2011) y local (EAB).

Finalmente, se recomienda realizar una combinación de diámetros para la línea de conducción, así garantizar un buen funcionamiento hidráulico a un menor costo. De lo contrario, se puede considerar la instalación de una válvula al final del tramo, la cual aumente las pérdidas de energía y entregue el valor exacto de presión requerida.

2.2 Ejercicio 2: red abierta con suministro por gravedad

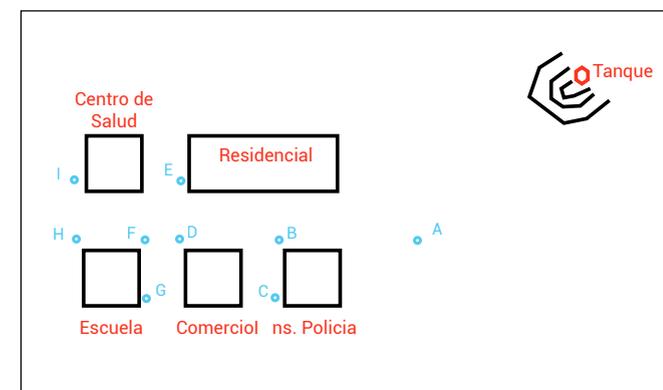
Realizar la simulación en EPANET para una red de suministro de agua potable con una población proyectada a 25 años de 500 habitantes. La red consta de una línea de conducción y una red de distribución abierta, además de diez tramos de tubería con once nudos (10 conexiones y 1 tanque).

Determine los diámetros mínimos de la red en PVC que garanticen una presión de servicio con base en el nivel de complejidad del sistema, según lo establecido por el RAS (2011). Ignore la capacidad socioeconómica de la población.

Nota: la distribución de la población y la ubicación de los nudos de demanda se muestran en la figura 43. Tenga en cuenta que para el ejercicio planteado se contempla el trazado de una red de manera didáctica; caso diferente en el ejercicio profesional, donde es necesario tener en cuenta que el trazado de una red se realiza con un estudio detallado que evite cruzar terrenos privados y obras de arte (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

La tubería de acueducto debe instalarse sobre aceras, evitar cruces, hasta donde sea posible, con alcantarillados sanitarios o pluviales, así como tener especial cuidado en los sitios donde se unen vías férreas, carreteras principales y demás estructuras que comprometan la integridad del sistema de acueducto.

Figura 43. Planteamiento de ejercicio 2



La información requerida para los nudos y tuberías se encuentra en las tablas 10 y 11.

Tabla 10. Propiedades de nudos para ejercicio 2

Nudos		
Elemento	Cota (msnm)	Demanda (L/s)
Tanque	2000	No aplica
Nudo A	1981	0,00
Nudo B	1981	0,00
Nudo C	1987	0,80
Nudo D	1981	0,00
Nudo E	1987	1,00
Nudo F	1980	0,00
Nudo G	1980	1,50
Nudo H	1980	0,00
Nudo I	1980	1,20

Tabla 11. Propiedades de tuberías para ejercicio 2

Tuberías				
Tramo	Longitud (m)	Diámetro interno PVC RDE 21		Rugosidad (mm)
		Pulg.	mm	
Tanque - A	550	8	198	0.0015
A-B	300	8	198	
B-C	150	8	198	
B-D	200	8	198	
D-E	150	8	198	
D-F	100	8	198	
F-G	150	8	198	
F-H	150	8	198	
H-I	150	8	198	

2.2.1 Solución a ejercicio 2

Para la simulación del ejercicio propuesto, se debe iniciar con la configuración de EPANET. El primer paso es la elección del sistema de unidades a utilizar, la metodología para el cálculo de las pérdidas de energía, el tipo de fluido y las demás opciones que faciliten el entendimiento del modelo.

Paso A: configuración de unidades de medida, propiedades del fluido y metodología para el cálculo de pérdidas (para acceder a la configuración consulte el ejercicio 1).

Se va a utilizar el sistema internacional de medidas, por lo tanto, el caudal se debe encontrar en litros por segundos (L/s); la metodología para el cálculo de pérdidas de energía es la de Darcy-Weisbach (D-W); la viscosidad y el peso específico del agua se establecen como 1, las demás opciones no se modifican.

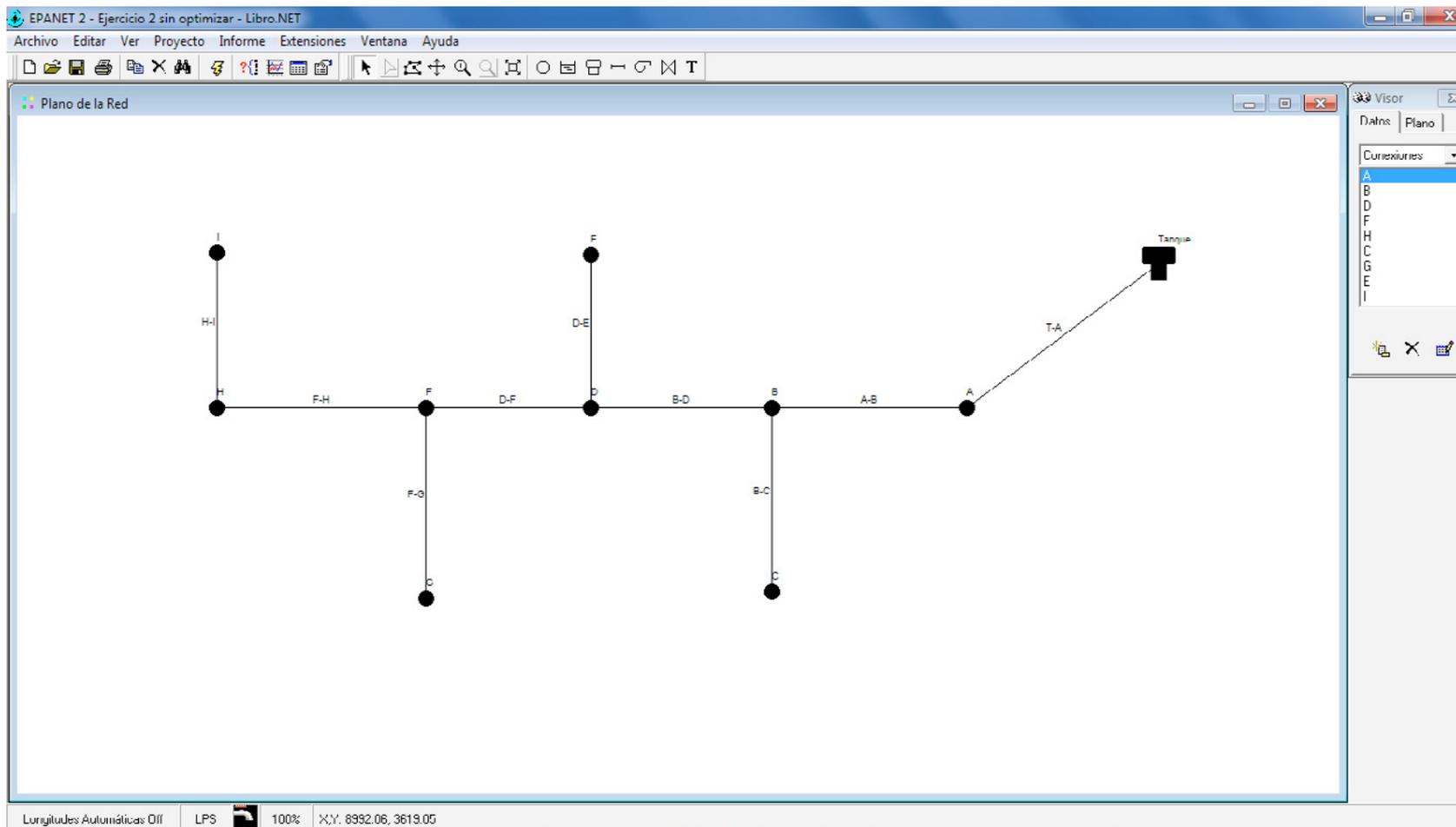
Paso B: introducir elementos físicos de la red.

Los elementos se introducen en EPANET en relación con el plano de distribución de la población. El trazado de la red se realiza con base en los nudos establecidos para cada manzana; la red de distribución de agua potable (RDAP) que alimenta cada edificación se reduce a un solo nudo. Por ejemplo, la manzana residencial es abastecida por el nudo E, mientras que el nudo D sólo funciona como un accesorio (Tee), pero en EPANET se establece como un nudo sin demanda (conexión).

Al momento de introducir el tanque en el modelo es importante tener cuidado de no introducir un embalse, pues uno de los objetivos del ejercicio es simular el comportamiento de un tanque en EPANET.

En la figura 44 se muestra la ubicación de los nudos en el área de trabajo para el ejercicio 2.

Figura 44. Trazado de la red hidráulica para el ejercicio 2



Es importante recordar que la opción *Longitudes automáticas* ubicada en la barra de estado (costado inferior izquierdo) se encuentre desactivada (*Off*), y que la metodología de Darcy-Weisbach haya quedado establecida en EPANET, puesto que la mayoría de problemas a la hora de simular un modelo se deben a una configuración mal realizada.

Para visualizar la identificación de los elementos, se debe acceder a las opciones del plano de red y allí seleccionar todas las casillas de verificación en la pestaña *Etiquetas* (véanse figuras 38 y 39).

Para introducir los nombres o identificaciones (ID) de cada elemento físico en relación con los datos suministrados por el enunciado, sólo se debe dar clic dos veces sobre cada objeto y, en la primera propiedad (ID), dar el nombre correspondiente.

Paso C: introducir los valores de las propiedades para cada elemento y ejecución del modelo.

En relación con el enunciado del ejercicio, se introducen los valores de las propiedades para los nudos (tanque y conexiones) y las tuberías. Como en este ejercicio la fuente de suministro de agua es un tanque, hay que tener en cuenta que sus propiedades son diferentes a las de un embalse. Las propiedades del tanque se indican en la tabla 12.

Nota: la ubicación de los elementos físicos en EPANET debe ser aproximada a la distribución de la población real. EPANET simula el modelo con base en los valores de las propiedades, no en función de la ubicación de los elementos, siempre y cuando se encuentre desactivada la opción *Longitudes automáticas*.

Tabla 12. Propiedades de tanque para ejercicio 2

Tanque	
Propiedad	Valor
Cota	2000 m
Nivel inicial	2 m
Nivel mínimo	0 m
Nivel máximo	2 m
Diámetro	4 m

La propiedad *Cota* para un tanque hace referencia al nivel topográfico del fondo o solera; el *Nivel inicial* es la altura de la lámina de agua en el tanque al momento de iniciar la simulación; el *Nivel mínimo* es el valor que se debe establecer para que EPANET asuma que no existe agua almacenada; el *Nivel máximo* establece el momento en que el tanque se encuentra completamente lleno; el *Diámetro* hace referencia al valor del diámetro interno del tanque.

EPANET asume tanques de sección cilíndrica de forma pre-determinada y no permite modelar tanques con sección rectangular o cuadrada sin construir una curva característica de volumen almacenado versus lámina de agua.

Para el ejercicio propuesto, los niveles en el tanque son valores asumidos, puesto que aún no se contemplan aspectos de diseño para el dimensionamiento de un tanque. Con los valores dados en la tabla 12, EPANET simula un modelo con una energía disponible que se obtiene a partir de la suma de la cota del fondo del tanque y el nivel inicial de agua.

Recuerde que el ejercicio propuesto asume un estado estacionario del sistema o de período único (estático).

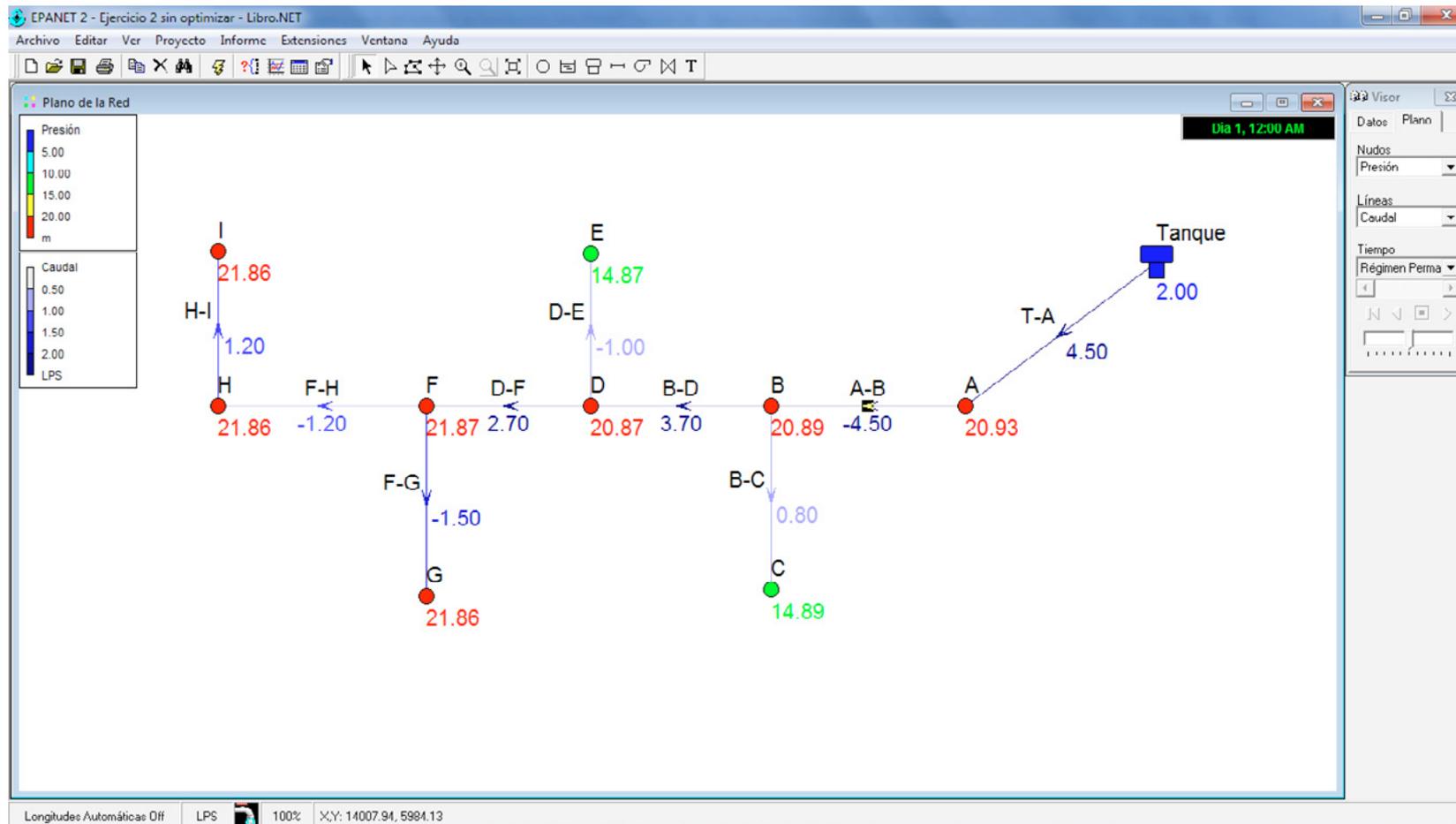
Luego de introducir las propiedades en cada uno de los elementos en relación con el enunciado del ejercicio, se da clic en el ícono *Iniciar análisis* para obtener los datos de la simulación.

Nota: si desea recordar la forma de acceder a las propiedades de los elementos físicos, véanse las figuras 4, 7 y 11.

Paso D: simulación del modelo.

Luego de ejecutar la simulación del modelo, se debe visualizar en las tuberías el caudal y en los nudos la presión a través del visor, al igual que en el ejercicio anterior (véase figura 37).

Figura 45. Simulación de ejercicio 2



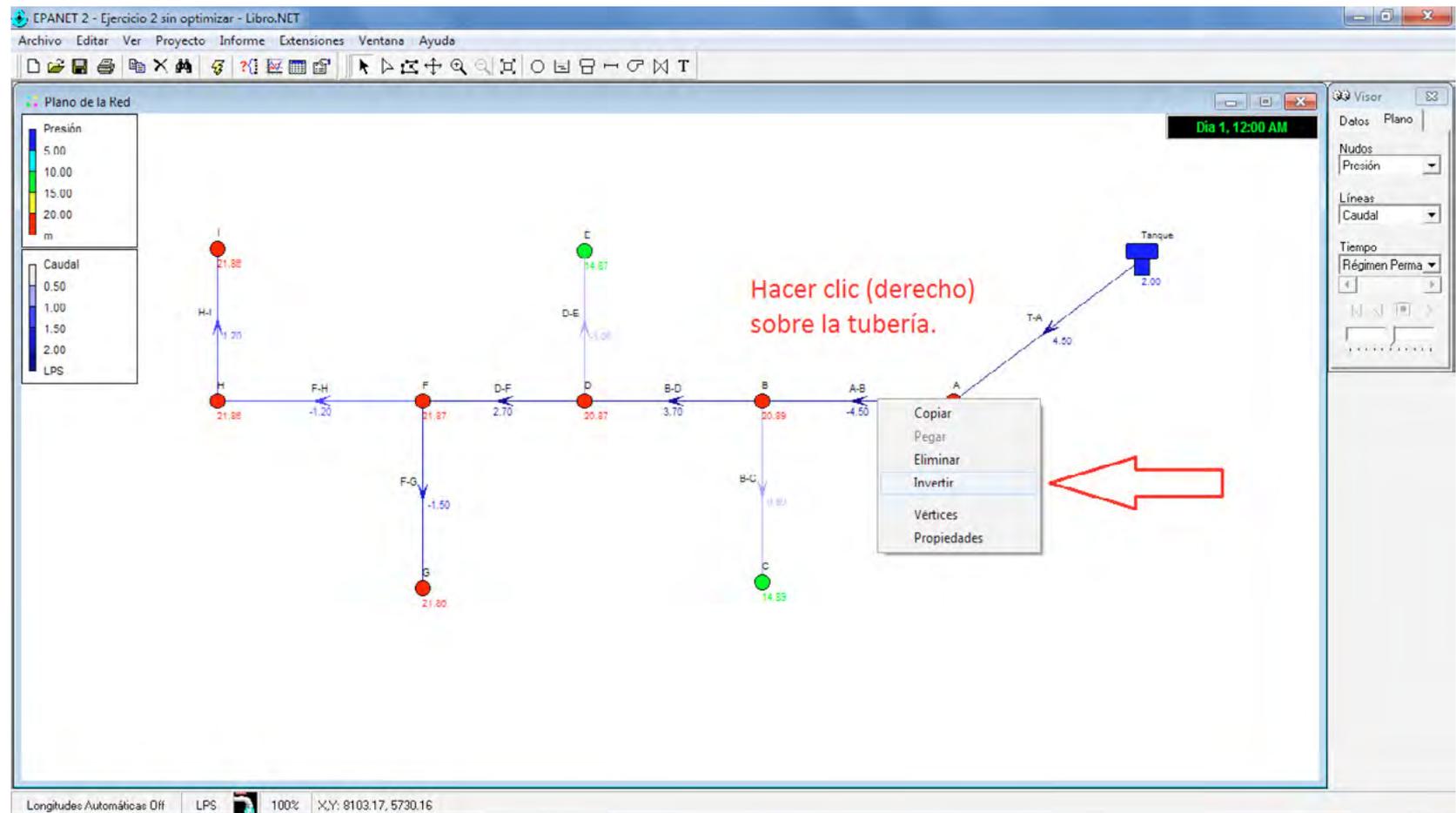
Los datos obtenidos para el modelo con un diámetro nominal de 8" generan resultados con los cuales se puede deducir que la simulación no generó mensajes de error. Sin embargo, el sistema permite disminuir los diámetros actuales, ya que el objetivo es encontrar un juego de diámetros útiles en la red que hagan el modelo más económico (diámetros pequeños), con una presión de servicio mínima en relación con los criterios de la normativa nacional (RAS, 2011).

El juego de diámetros menores se determina en el siguiente apartado.

Nota: en la figura 45 se observan valores negativos para el parámetro de caudal que circula por la red. No hay inconveniente en esto, lo que está indicando el modelo es que, a la hora de trazar la tubería, se hizo al contrario del sentido del flujo (caudal).

Figura 46. Invertir signo negativo en caudal

Por ejemplo, el tramo F-G se trazó desde el nudo G hasta F, pero el sentido del flujo es contrario, de F a G. Si se desea cambiar el sentido del trazado de la tubería no es necesario borrar y volver a dibujar el tramo, simplemente se puede dar clic derecho en la tubería y seleccionar la opción *Invertir*. El paso final para cambiar el valor negativo en los caudales es volver a ejecutar el modelo con el ícono de *Iniciar análisis*. En la figura 46 se muestra la opción.



Paso E: parámetros a cumplir.

Uno de los objetivos del ejercicio propuesto es encontrar la combinación de diámetros que permitan cumplir con una presión de servicio que esté en función del nivel de complejidad del sistema. El nivel de complejidad del sistema es una manera de evaluar el tipo de sistema de acueducto requerido para una población dada, en función de sus habitantes y la capacidad socioeconómica de la población. Esa clasificación es normalizada por el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS, 2011) y se muestra en la tabla 13.

Tabla 13. Nivel de complejidad para RAS (2011)

Nivel de complejidad	Población en la zona urbana (habitantes)
Bajo	< 2500
Medio	2501 a 12500
Medio alto	12501 a 60000
Alto	> 60000

Fuente: RAS (2011)

Según la tabla 13, el nivel de complejidad del sistema propuesto para el ejercicio es bajo, pues posee una población de 500 habitantes proyectada a 25 años (ignorar el nivel socioeconómico para este ejemplo). En relación con el nivel de complejidad definido, la tabla 14 contiene las presiones mínimas de servicio para Redes de Distribución de Agua Potable (RDAP).

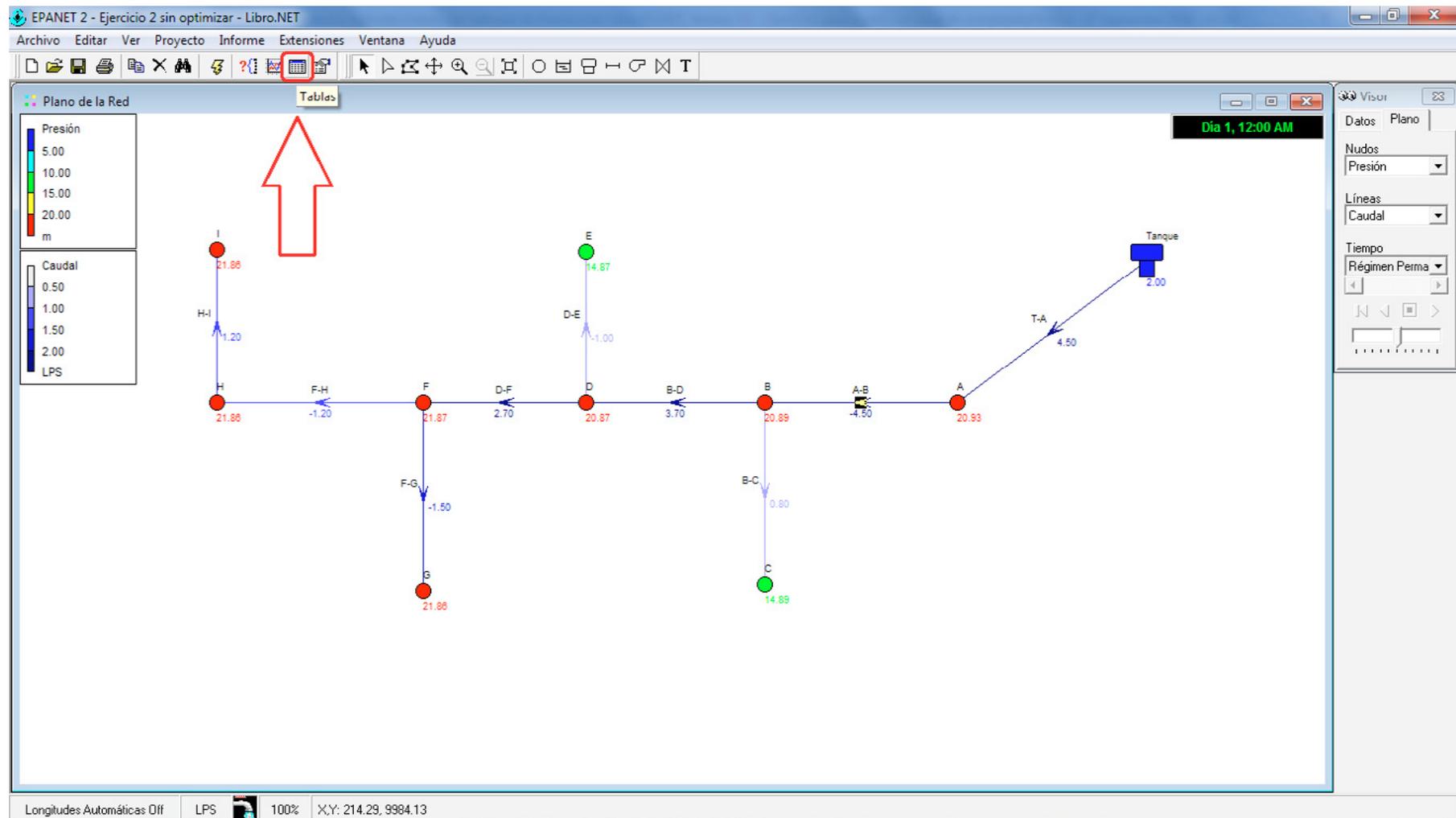
Tabla 14. Presión dinámica mínima para RDAP según RAS (2011)

Nivel de complejidad	Presión dinámica mínima	
Bajo y medio	98,10 kPa	10,00 m
Medio alto y alto	147,20 kPa	15,00 m

Fuente: RAS (2011)

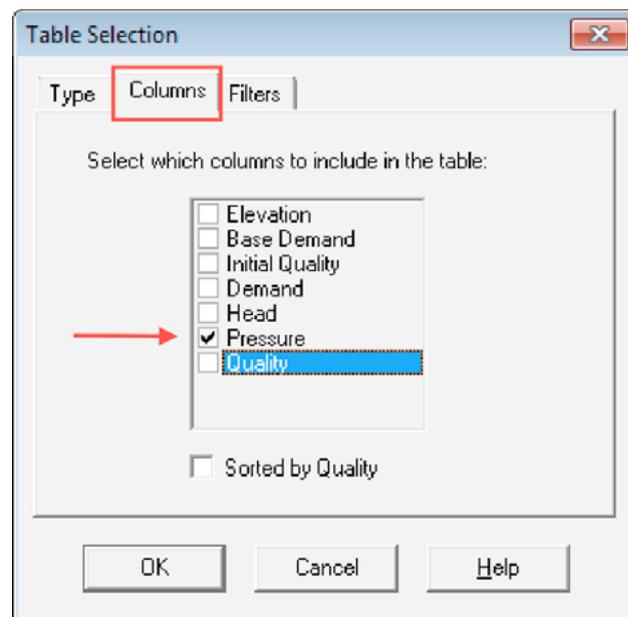
Ya se tiene el valor de la presión mínima que se debe garantizar en los nudos de la red. Con el diámetro inicial de 198 mm, las presiones de servicio se pueden visualizar en una tabla mediante el ícono *Tablas* ubicado en la barra de herramientas estándar, como se muestra en la figura 47.

Figura 47. Generación de una tabla de datos



Al dar clic en el ícono *Tablas*, se abre una ventana de diálogo en la cual se debe seleccionar la pestaña *Tipo* y luego *Nudos de la red*. El paso siguiente es ir a la pestaña *Columnas*, ubicada en la misma ventana de diálogo, y marcar los parámetros que se desean visualizar en la tabla; finalmente, se da clic en el botón *Aceptar*. La figura 48 describe mejor el procedimiento.

Figura 48. Datos a visualizar en tabla



Para este caso, se selecciona sólo el parámetro *Presión* y automáticamente se genera la tabla de presión en las conexiones (nudos), clasificada con base en el nudo que posea la mayor presión. Se debe tener claridad en que los datos consignados en la tabla no se pueden modificar, sólo sirven para lectura o para copiar y pegar en una hoja de cálculo.

No es posible reordenar los datos desde EPANET, pero la alternativa es seleccionar la columna con los valores de la presión en los nudos, ir a la barra estándar (costado superior izquierdo) y dar clic en el ícono *Copiar*. Luego se abre una ventana de diálogo que permite guardar los datos seleccionados en un archivo o copiarlos al portapapeles (opción *Portapapeles*). Finalmente, se pegan los datos en una hoja de cálculo, Excel para el caso del sistema operativo Microsoft. Esta opción es de gran utilidad para organizar todos los datos calculados por EPANET en la simulación de modelo.

Paso F: combinación de diámetros menores que garanticen la presión mínima de servicio.

Para determinar la combinación de diámetros menores que garanticen un adecuado funcionamiento de la red, con base en el parámetro de presión exigido por la norma, es importante considerar los diámetros mínimos permitidos para redes de distribución secundarias según RAS (2011). En la tabla 15 se clasifican los diámetros en relación con el nivel de complejidad y el uso de la red.

Tabla 15 Diámetro mínimo para redes menores de distribución

Nivel de complejidad	Diámetro mínimo		Uso
	mm	Pulg.	
Bajo y medio	50.0	2.0	Residencial y comercial
Medio alto	100.0	4.0	Comercial e industrial
	63.5	2.5	Residencial
Alto	150.0	6.0	Comercial e industrial
	75.0	3.0	Residencial

Fuente: RAS (2011)

Para sistemas de acueducto con complejidad baja no se contemplan redes matrices de distribución, por esta razón en la tabla 15 se muestran los diámetros mínimos para ser usados en redes de distribución secundarias. Para encontrar la combinación de diámetros económicos que cumplan con las exigencias de la normativa nacional, en la tabla 16 se presentan los diámetros internos de tubería en PVC, con una relación diámetro espesor de 21 (RDE 21).

Tabla 16. Diámetro interno para tuberías de PVC RDE 21

Diámetro nominal (Pulg.)	Diámetro interno (mm)	RDE
1,50"	42.30	21
2,00"	54.58	21
2,50"	66.87	21
3,00"	80.42	21
4,00"	103.42	21
6,00"	152.22	21
8,00"	198.21	21
10,00"	247.09	21
12,00"	295.97	21

El paso siguiente es comenzar a reducir los diámetros en la red, teniendo especial cuidado de no formar cuellos de botella (pasar de un diámetro pequeño a un diámetro grande en el sentido del agua). Si se crean cuellos de botella, la pérdida de energía aumenta significativamente, lo que ocasiona una caída de presión en los nudos que impide cumplir con la presión mínima de servicio.

El primer intento para reducir los diámetros de la red se realizó con la combinación mostrada en la tabla 17.

Tabla 17. Primera combinación de diámetros para red en ejercicio 2

ID tubería o línea	Diámetro interno (mm)
T-A	103.42
A-B	80.42
B-C	54.58
B-D	66.87
D-E	54.58
D-F	66.87
F-G	54.58
F-H	54.58
H-I	54.58

A partir de los diámetros mostrados en la tabla 17, los valores obtenidos para la presión quedan consignados en la tabla 18.

Tabla 18. Presión para primera combinación de diámetros, ejercicio 2

ID conexión o nudo	Presión (mca)
A	19.41
B	16.52
D	13.23
F	13.29
H	12.41
C	10.09
G	11.98
E	6.59
I	11.53
Depósito o tanque	2.00

El valor de la presión para la conexión E se encuentra por debajo del mínimo exigido por el RAS (2011), razón por la cual se debe replantear la combinación de diámetros para cumplir con los 10 mca de presión exigidos.

La presión en el tanque de almacenamiento se reporta como 2,00 m. Como el tanque se encuentra abierto a la atmósfera, la presión sobre el espejo de agua se toma como cero (0), pero EPANET calcula la presión hidrostática en el fondo del tanque. Como el nivel inicial dentro del tanque se configuró con un valor de 2.00 m, ese mismo nivel representa la presión ejercida por el fluido a la solera (fondo) del tanque.

La nueva combinación de diámetros que se deben simular en EPANET se muestran en la tabla 19.

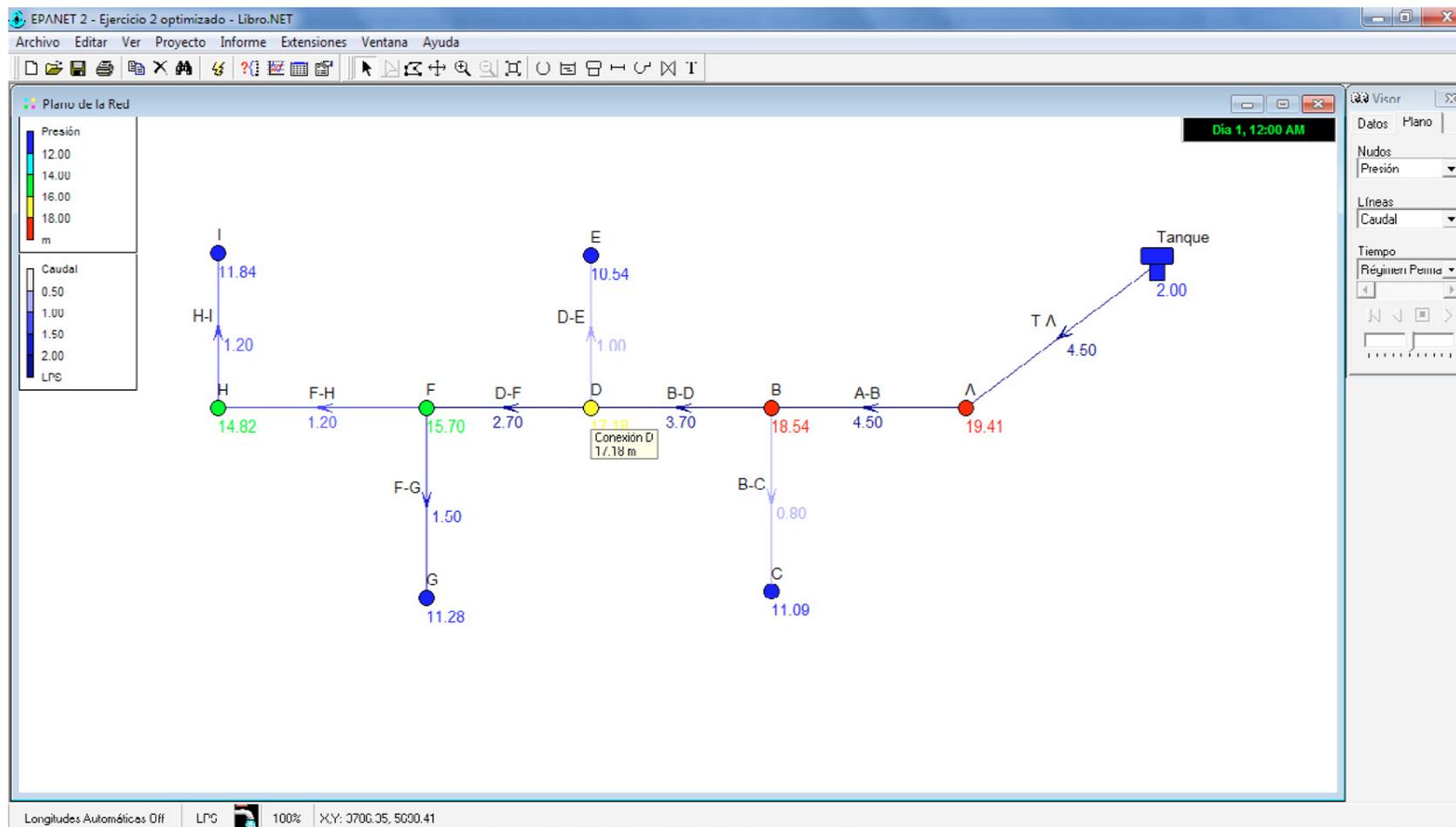
Tabla 19. Segunda combinación de diámetros para red en el ejercicio 2

ID tubería o línea	Diámetro interno (mm)
T-A	103.42
A-B	103.42
B-C	42.3
B-D	80.42
D-E	54.58
D-F	54.58
F-G	42.3
F-H	54.58
H-I	42.3

El diámetro de la tubería principal que comprende los tramos Tanque-A-B-D -F-H disminuye de forma gradual y en ningún momento se generan cuellos de botella, lo que garantiza un buen funcionamiento hidráulico. Todos los nudos en la red que poseen demanda tienen una presión de servicio por encima de los 10 metros de columna de agua. Las presiones obtenidas para el ejercicio 2 se muestran en la figura 49.

La presión máxima obtenida en el modelo simulado obedece a la presión dinámica de la red (casi 20 m en la conexión A). La presión máxima permitida por el RAS (2011) es de 50 metros para cualquier complejidad del sistema (con algunas salvedades, véase título B); pero esa presión obedece a un parámetro de presión estática (red de distribución sin consumo en los nudos).

Figura 49. Presión para segunda combinación de diámetros en el ejercicio 2



Para estimar la presión estática del modelo simulado, se debe cambiar la demanda en todos los nudos por un valor de cero (0) y volver a ejecutar el modelo para obtener las nuevas presiones estáticas.

Figura 50. Opción Seleccionar todo

Una manera rápida de cambiar la propiedad Demanda base en todas las conexiones (nudos) es la opción *Editar en el Menú principal*. Al dar clic sobre ésta, se abre una ventana de diálogo en la cual se debe pulsar la opción *Seleccionar todo*. La figura 50 muestra el procedimiento.

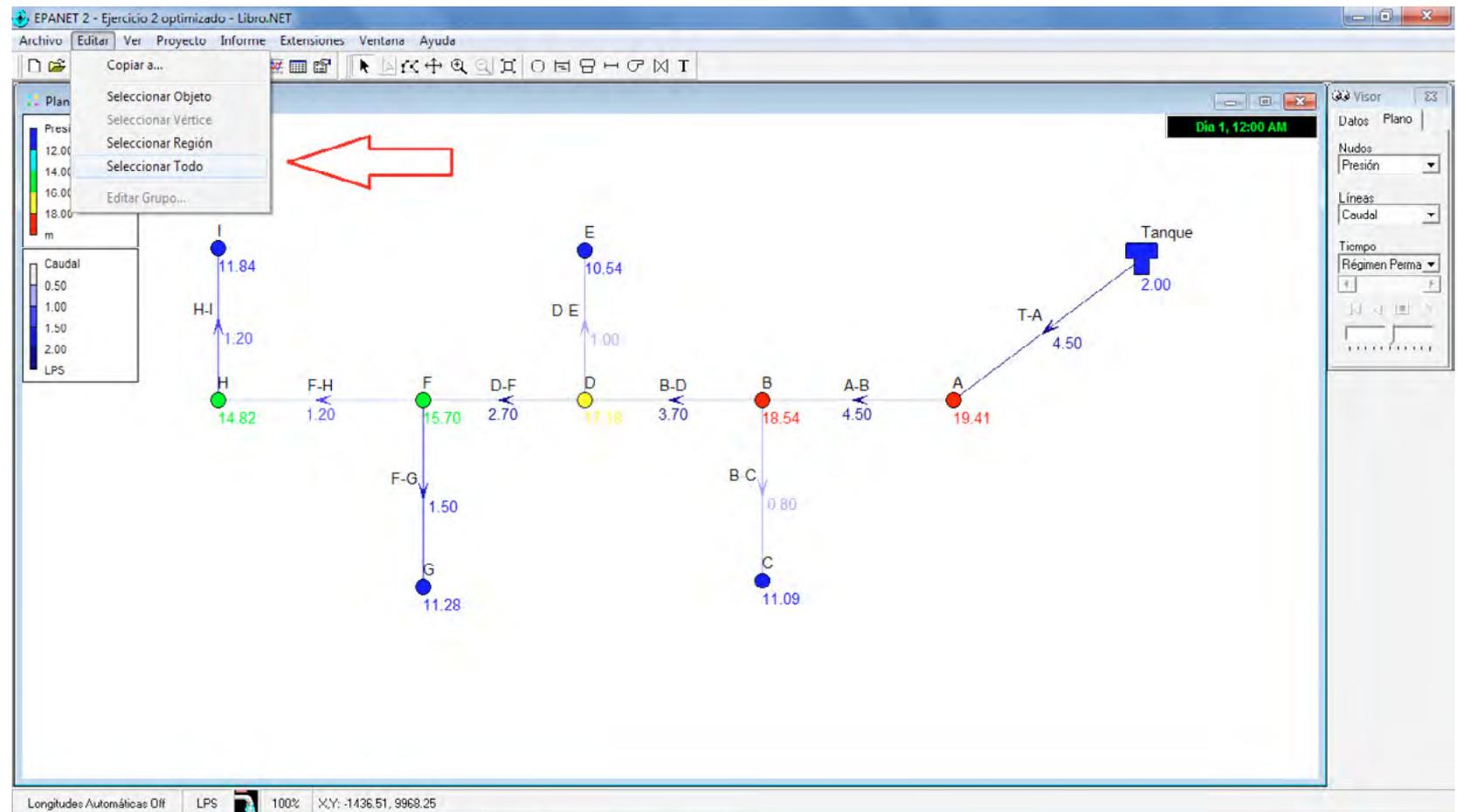
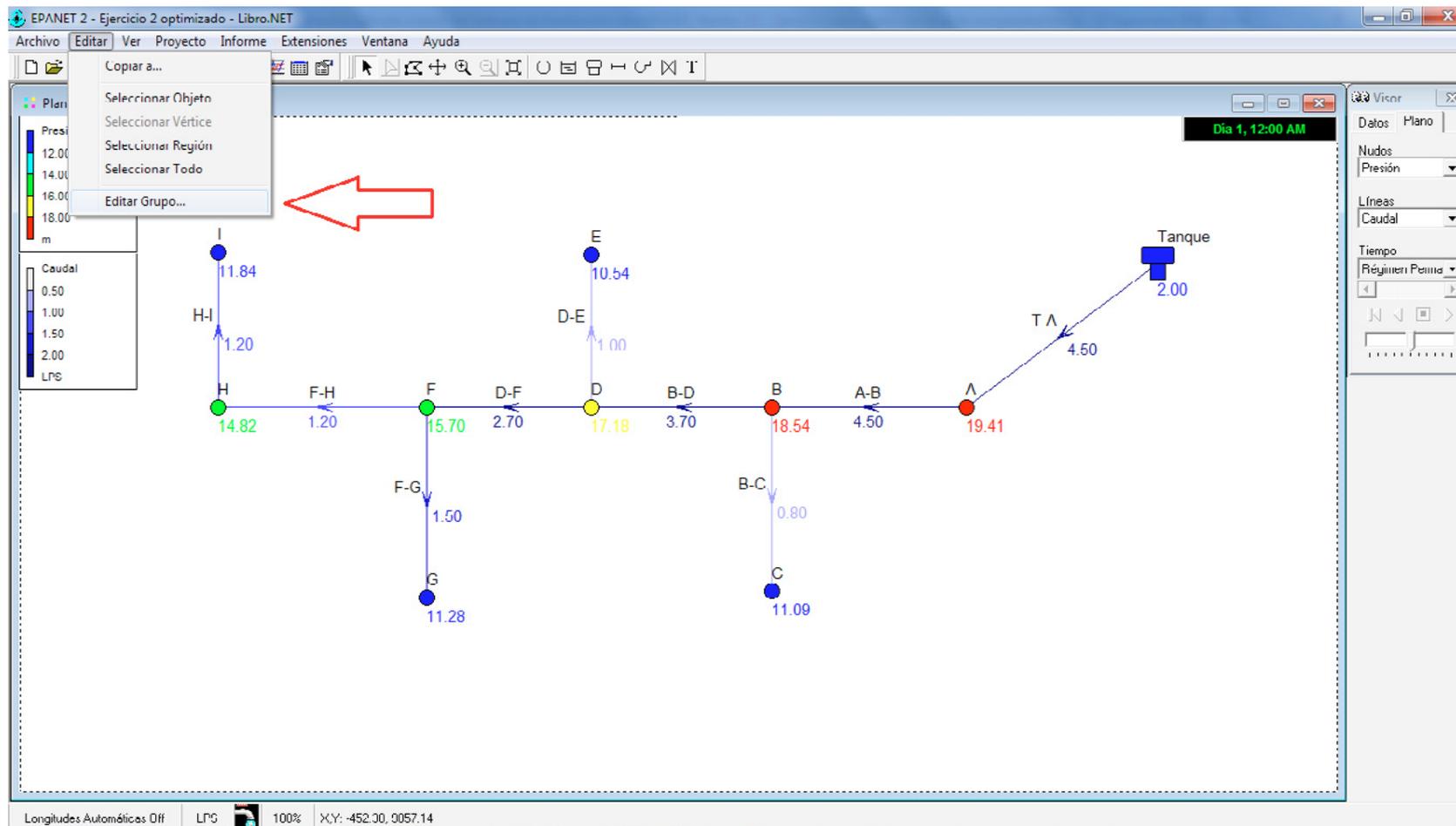


Figura 5 I. Opción editar grupo



Después de dar clic en la opción Seleccionar todo, se debe ir nuevamente a *Editar*, pero ahora para marcar *Editar grupo*. EPANET desplegará una nueva ventana de diálogo.

Figura 52. Ventana para editar objetos seleccionados



Luego se debe seleccionar *Conexiones* en la opción *Para todas las*. Ahora, en la parte inferior de la ventana de diálogo, se escoge *Reemplazar-Demanda* base con cero (0). La figura 52 describe mejor la explicación.

Figura 53. Presión estática para la red en el ejercicio 2

Finalmente, se debe dar clic en el botón Aceptar y luego volver a ejecutar la simulación del modelo para obtener los nuevos valores de presión (presión estática debido a que, al no existir demanda en los nudos, no hay agua en movimiento dentro de las tuberías). La figura 53 visualiza las presiones estáticas obtenidas.

La presión máxima estática obtenida es de 22 metros, de forma que cumple con el parámetro exigido por el RAS (2011) (50 mca). La presión de 22 metros no representa ningún problema para el tipo de tubería utilizada, ya que la presión de trabajo para una tubería en PVC grado 1 RDE 21 es de 140,60 mca (Pavco-Mexichem, 2014).

Es importante tener en cuenta que el modelo utilizó un tanque de almacenamiento con un nivel de agua constante durante la simulación. Como la simulación realizada es en período único, no es posible visualizar como varía el nivel del agua dentro del tanque con base en la demanda de los nudos durante un período extendido (por ejemplo 24 horas).

Otro aspecto a tener en cuenta en el análisis es la velocidad del fluido dentro de las tuberías. La velocidad es un parámetro importante para determinar la pérdida de energía que genera el fluido contra las paredes de la tubería debido a la fricción.

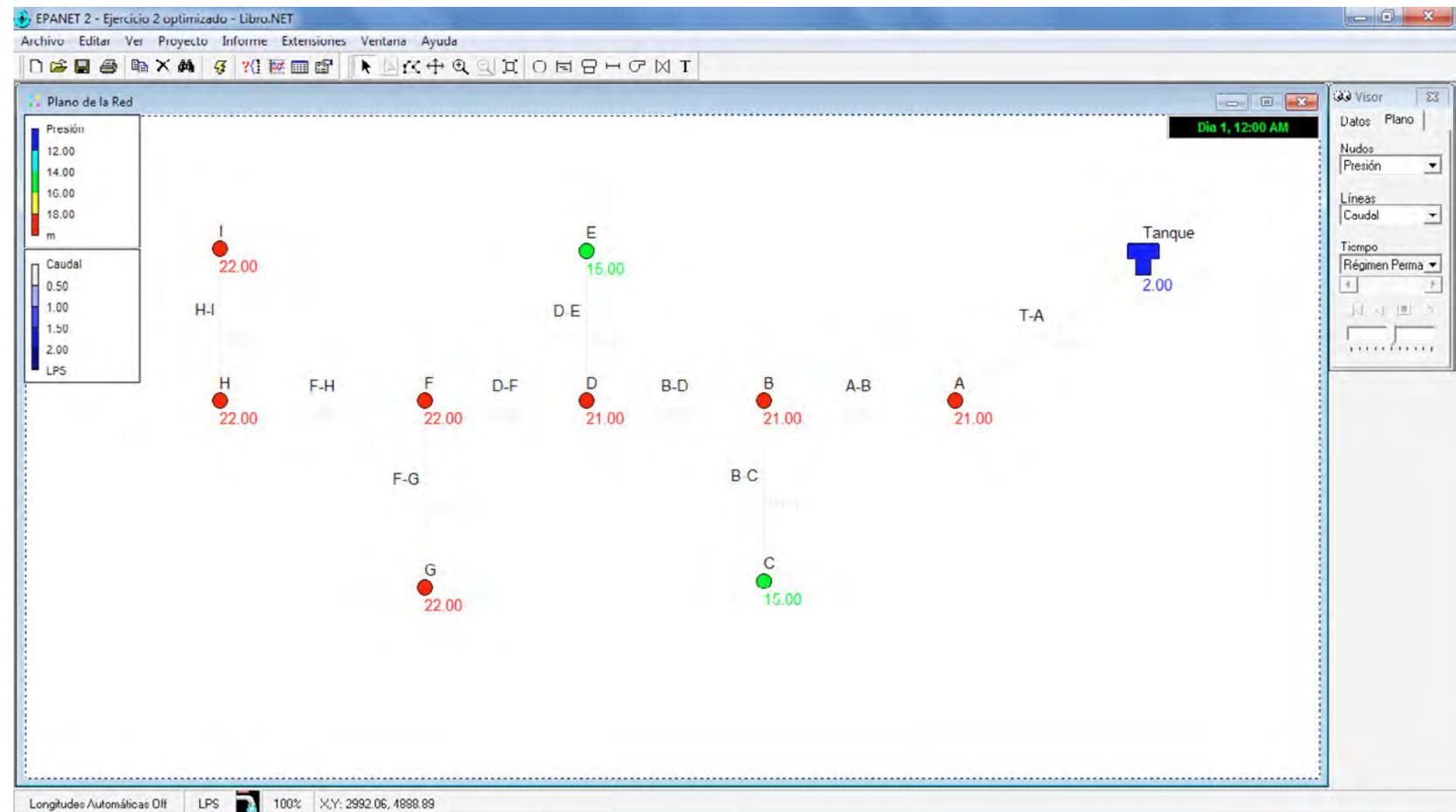
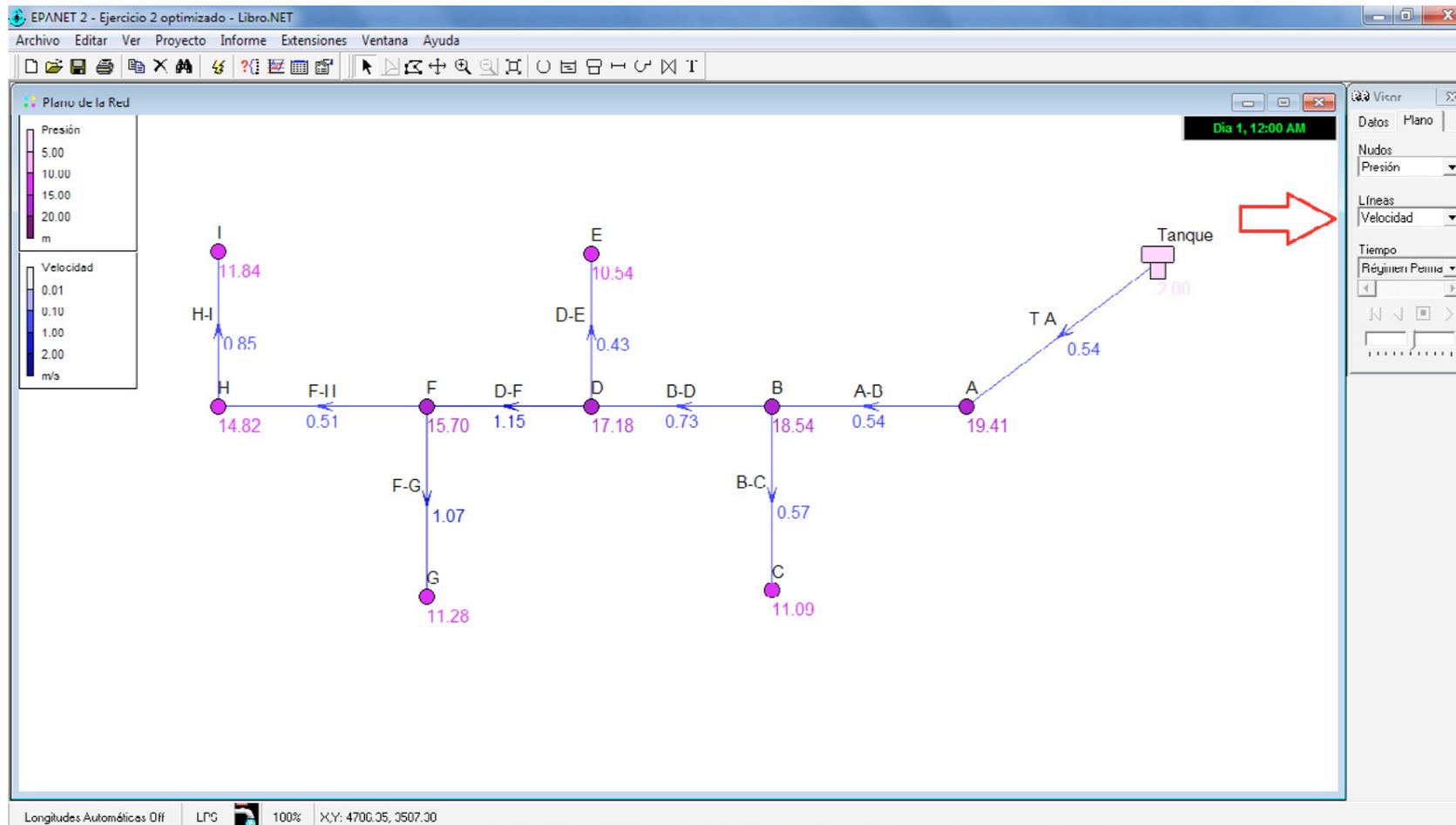


Figura 54. Velocidad en las tuberías para el ejercicio 2



Existen valores de velocidad mínima y máxima, pero antes se debe visualizar la velocidad obtenida para el modelo planteado en el ejercicio. Ésta se observa a través del visor: en vez de seleccionar caudal en las líneas, se marca velocidad. La figura 54 muestra la velocidad obtenida para el modelo simulado

Los valores de velocidad obtenidos para el ejemplo se encuentran dentro de los límites recomendados. Para el caso de la norma RAS (2011), la velocidad máxima para tuberías de PVC es de 6,0 m/s. En la tabla 21 se muestran los valores de velocidad para redes de distribución.

Tabla 20. Velocidades máximas en redes de distribución de agua potable

Material	Velocidad (m/s)
Acero sin revestimiento	5,00
Acero con revestimiento	4,00
Hierro dúctil	4,00
CCP	3,00
PVC-PVCO	6,00
PEAD	5,00
GRP	6,00
Polipropileno	6,00

Fuente: RAS (2011)

Para el caso del modelo simulado, la velocidad máxima que se genera es de 1,15 m/s, en el tramo de tubería D-F, cumpliendo con lo exigido por el RAS (2011).

Para el caso de la velocidad mínima, no hay un valor de referencia para las redes menores de distribución. Sin embargo es importante garantizar al menos un valor entre 0,50 y 0,60 m/s para evitar incrustaciones significativas de minerales presentes en el agua en las paredes de las tuberías metálicas y, para el caso de las tuberías plásticas, prevenir la formación prematura de biopelículas (Reyes del Toro y Saldarriaga, 2005).

El tramo D-E tiene una velocidad mínima de 0,43 m/s, un valor que se encuentra por debajo de los 0,50 m/s exigido por el RAS (2011), por lo tanto, se recomienda reevaluar el sistema para así dar cumplimiento a lo exigido en la normativa.

2.3 Ejercicio 3: red abierta con suministro por bombeo

Realizar la simulación de la red abierta planteada en el ejercicio anterior, pero implementando un sistema de bombeo sin tanque de almacenamiento, con el fin de configurar una bomba en EPANET.

2.3.1 Solución a ejercicio 3

El modelo que se va a simular debe suministrar la presión mínima de servicio a la red que aportaba el tanque de almacenamiento en el ejercicio anterior.

Paso A: estimar la altura manométrica o altura dinámica total de la bomba y el caudal a transportar.

En el ejercicio anterior, la energía suministrada al fluido por el tanque de almacenamiento tenía dos fuentes: la altura topográfica que poseía el fondo del tanque con respecto a la altura topográfica de cada uno de los nudos (conexiones) en la red y la altura que poseía el espejo de agua con respecto al fondo del tanque (altura piezométrica).

El tanque en el ejercicio 2 (véase tabla 12) tenía una altura topográfica de 2000 msnm y la lámina de agua en el tanque era de 2 metros, por lo tanto, la altura piezométrica del tanque era de 2002 metros.

Los 2002 metros eran los encargados de suministrar al modelo la energía necesaria para asegurar que el agua corriera del tanque hacia los nudos de la red (el agua se mueve de un punto de mayor a menor presión), con una presión residual que cumpliera con la mínima exigida por el RAS (2011).

Para determinar la energía que posee cada nudo con respecto al tanque, se debe realizar la diferencia entre la cota piezométrica del tanque (2002 m) y la cota topográfica de cada nudo. Por ejemplo, el nudo A tiene una altura topográfica de 1981 m, lo que indica que al nudo A el tanque le suministraba una energía de 21 m (2002 – 1981 = 21). En otras palabras, la energía que la bomba debe suministrar al nudo A es de 21 m para tener la equivalencia del modelo con el tanque.

Como el objetivo es realizar la simulación del modelo planteado en el ejercicio anterior, pero utilizando una bomba que brinde la misma energía, EPANET requiere de información previa para poder ejecutar la simulación de una bomba.

Los parámetros que EPANET solicita para el uso de una bomba son dos: altura manométrica y caudal suministrado al sistema; con estos dos datos se debe construir una curva característica de un solo punto.

La altura manométrica requerida es de 21 m y el caudal suministrado por el tanque se obtiene al sumar los caudales demandados en los nudos. Por lo tanto, el caudal a necesario es de 4,50 L/s y la altura manométrica de 21,00 m. En la tabla 22 se suman los caudales de demanda en los nudos para estimar el caudal total que debe trasegar la bomba.

Tabla 21. Demanda en los nudos para el ejercicio 3

Nudo	Demanda base (LPS)
A	0
B	0
C	0.8
D	0
E	1
F	0
G	1.5
H	0
I	1.2
Σ	4.5

Paso B: implementar la bomba en el modelo

Para introducir una bomba en EPANET se requieren dos nudos o conexiones, uno de partida y otro de llegada. El nudo de partida debe ser una fuente de agua (embalse) o a una conexión que esté alimentada por un embalse o un tanque.

Para el caso del modelo a realizar, el nudo de partida será un embalse con una altura total equivalente a la altura topográfica de la conexión inicial (1981 m), mientras que el nudo de llegada será el antiguo tanque de almacenamiento, que ahora será una conexión con una altura topográfica igual al fondo del tanque (2000 m).

A la hora de dibujar la bomba en el plano de la red, se debe dar clic en el nudo donde la bomba va a succionar el fluido (embalse 1) y luego en la conexión donde la bomba va a descargar o impulsar el fluido (nudo 2).

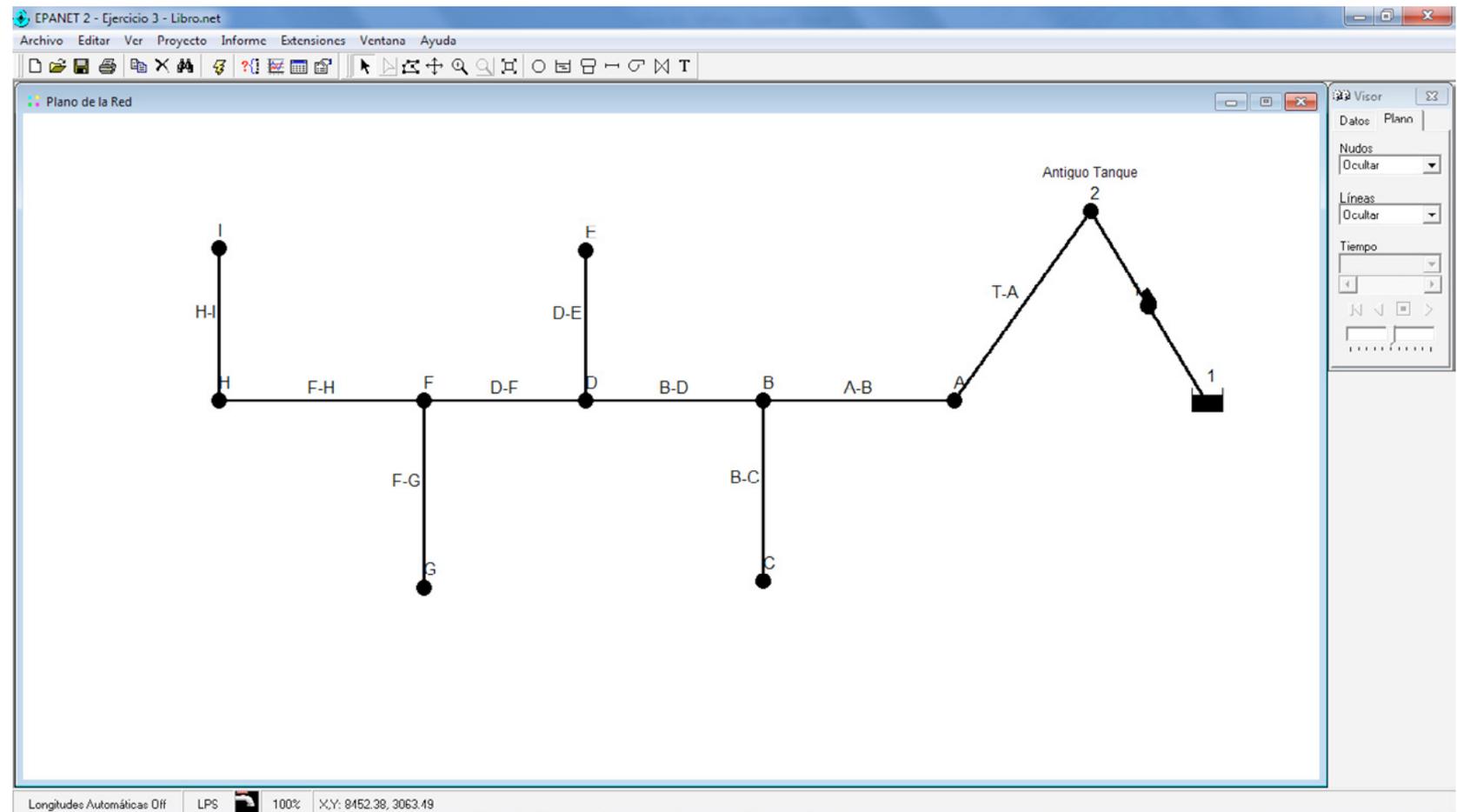
La manera de determinar si la bomba está bien dibujada es simple: debe estar apuntando hacia la conexión por donde impulsará el fluido. Para el caso de la figura 55, la bomba está apuntando hacia el nudo 2.

El siguiente paso es configurar las propiedades de la nueva conexión, el nuevo embalse y la bomba.

Paso C: configurar las propiedades de los nuevos elementos (conexión 2, embalse y bomba).

El primer elemento a configurar es la conexión. Al dar doble clic sobre éste, se abre la venta de diálogo donde la única propiedad a editar es la cota. La cota de la conexión 2 es la misma que tenía el tanque en el modelo anterior, por lo tanto, el valor a introducir es 2000 m. Es importante recordar que esta conexión no tiene demanda de caudal, ya que sirve como un accesorio que está uniendo a la bomba con la tubería T-A.

Figura 55. Modelo para ejercicio 3 sin ejecutar simulación



Por su parte, el embalse sólo requiere el valor de la altura a la que la bomba va a tomar el agua en el modelo. Para este caso, el embalse se encuentra a la misma altura de la conexión A, o sea 1981 m.

Antes de configurar las propiedades de la bomba, es necesario construir la curva característica que definirá su comportamiento hidráulico. La manera de construir la curva característica es a través del *Visor*, dando clic en la pestaña *Datos*, para luego buscar la opción *Curvas* y luego *Añadir*. La figura 56 resalta la opción descrita, utilizando el visor de EPANET.

Figura 56. Insertar una curva característica para una bomba I

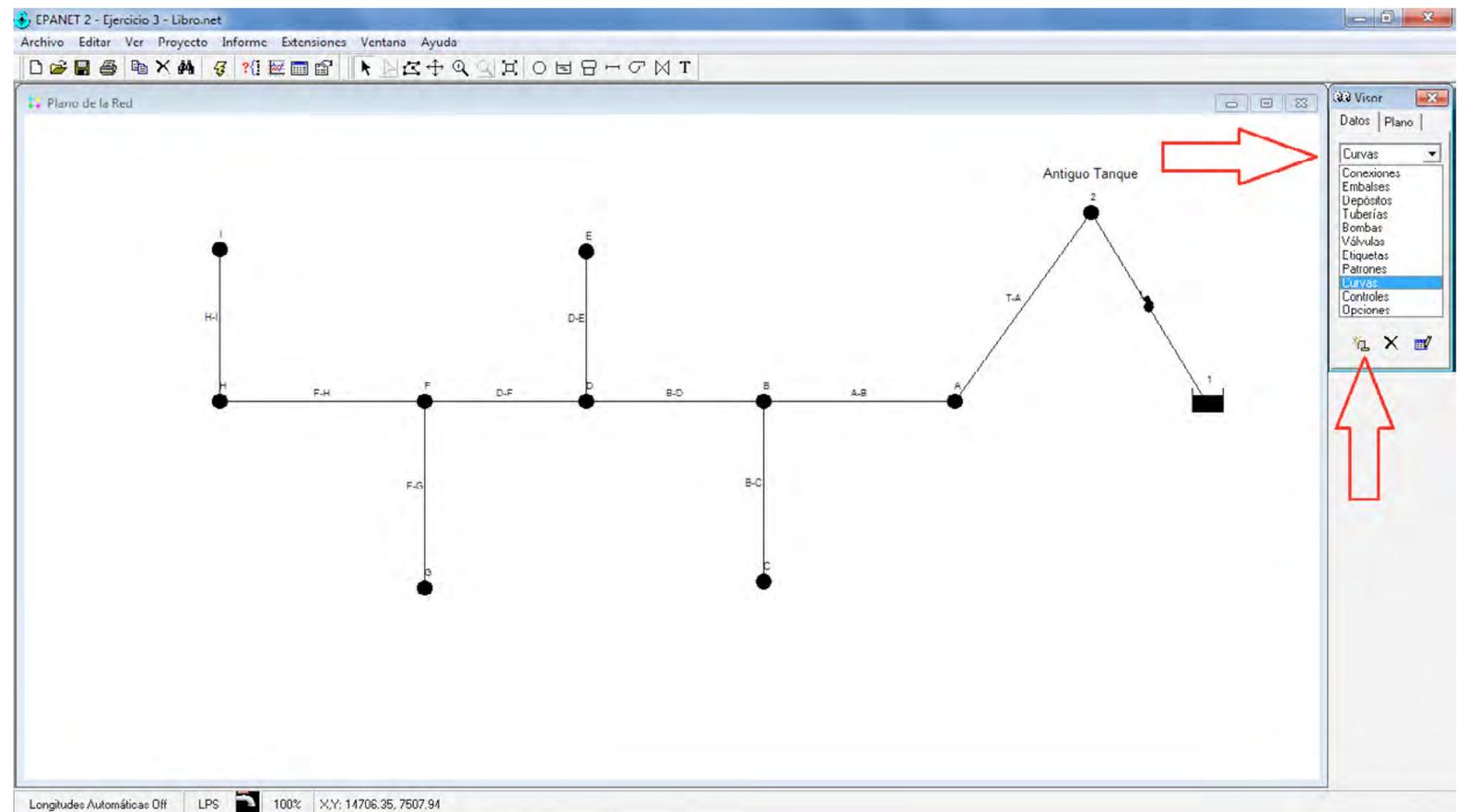


Figura 57. Insertar una curva característica para una bomba 2

The screenshot shows the EPANET 2 interface with the 'Editor de Curva' dialog box open. The dialog contains the following information:

- ID Curva:** 1
- Descripción:** Curva Característica de la bomba
- Tipo de Curva:** BOMBA
- Ecuación:** $Altura = 28.00 - 0.3457[Caudal]^2.00$

A table within the dialog shows the following data point:

Caudal	Altura
4.5	21

To the right of the table is a graph showing the head (Altura in meters) on the y-axis (ranging from 0 to 25) versus the flow rate (Caudal in LPS) on the x-axis (ranging from 0 to 8). A red curve starts at approximately 28 m head at 0 LPS flow and decreases as flow increases. The background network diagram shows a pump node 'F' connected to nodes 'H', 'G', and 'T'. Node 'T' is connected to 'A', which is connected to 'Z' (Antiguo Tanque). Node 'Z' is connected to node '1'.

Al picar el ícono *Añadir*, se abre una ventana de diálogo en la cual se deben introducir los datos de Caudal (4,50), *Altura* (21) y el nombre asignado a la curva –*ID curva*– (1). Por último, se debe dar clic en el botón *Aceptar* (figura 57).

Ahora el modelo cuenta con una curva característica de un solo punto (caudal versus altura). Los otros puntos que se requieren para construir la gráfica, EPANET los obtiene de la siguiente forma: cuando el caudal es cero, el programa asume que la altura manométrica es un 33% adicional a la suministrada, o sea 27,93 m ($21 \times 1,33 = 27,93$ m), y cuando la altura manométrica es cero el caudal es el doble del introducido, es decir, 9 L/s ($2 \times 4.5 = 9$ L/s).

El paso final para terminar con la configuración de los elementos es dar doble clic en la bomba en el plano de la red y establecer el nombre de la curva característica asignado, para el caso del ejemplo se debe introducir "1".

La figura 58 muestra cómo se carga la curva característica a la bomba respectiva.

Por último, se debe ejecutar el modelo con el ícono Iniciar análisis para obtener los datos de la simulación.

Figura 58. Insertar una curva característica para una bomba 3

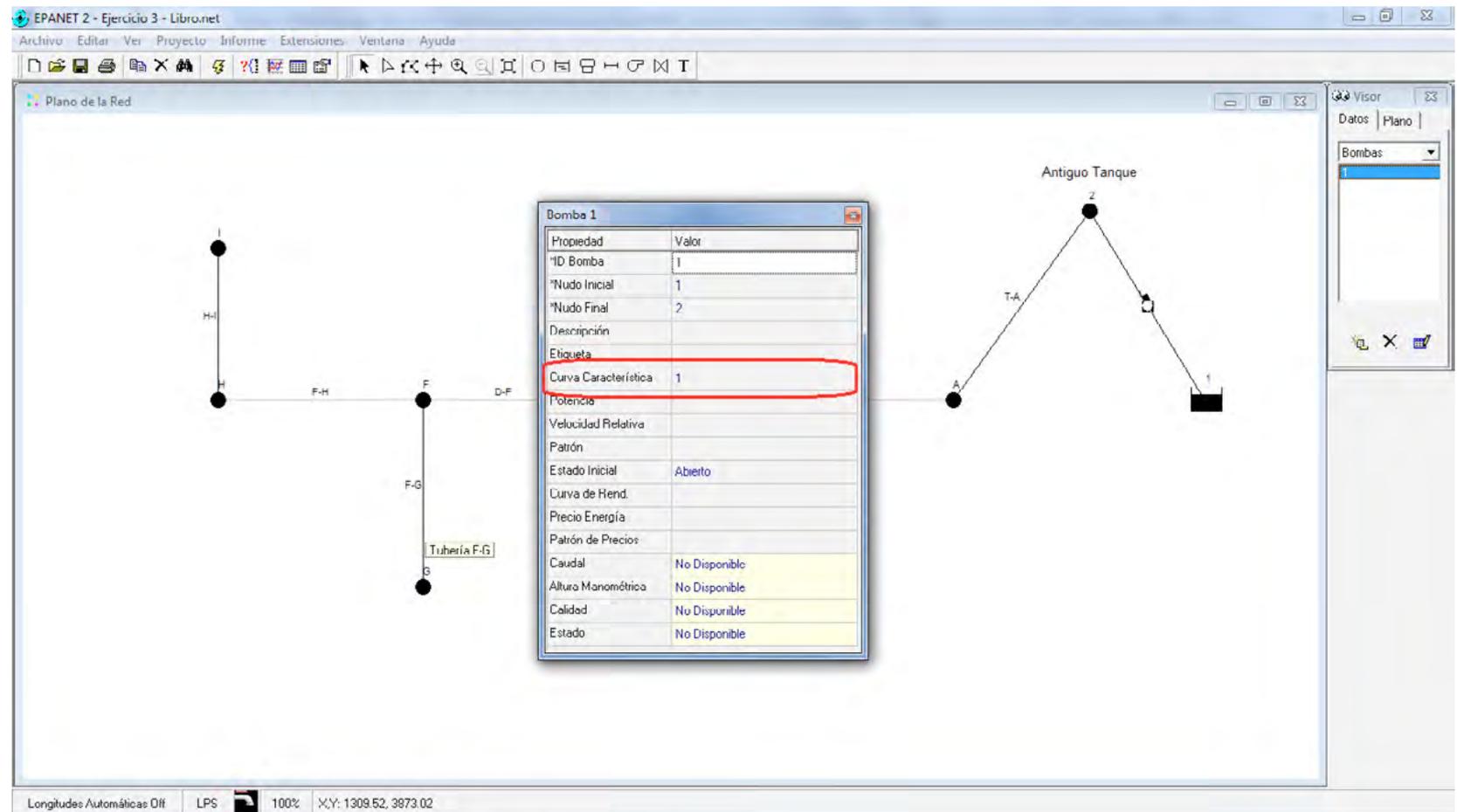
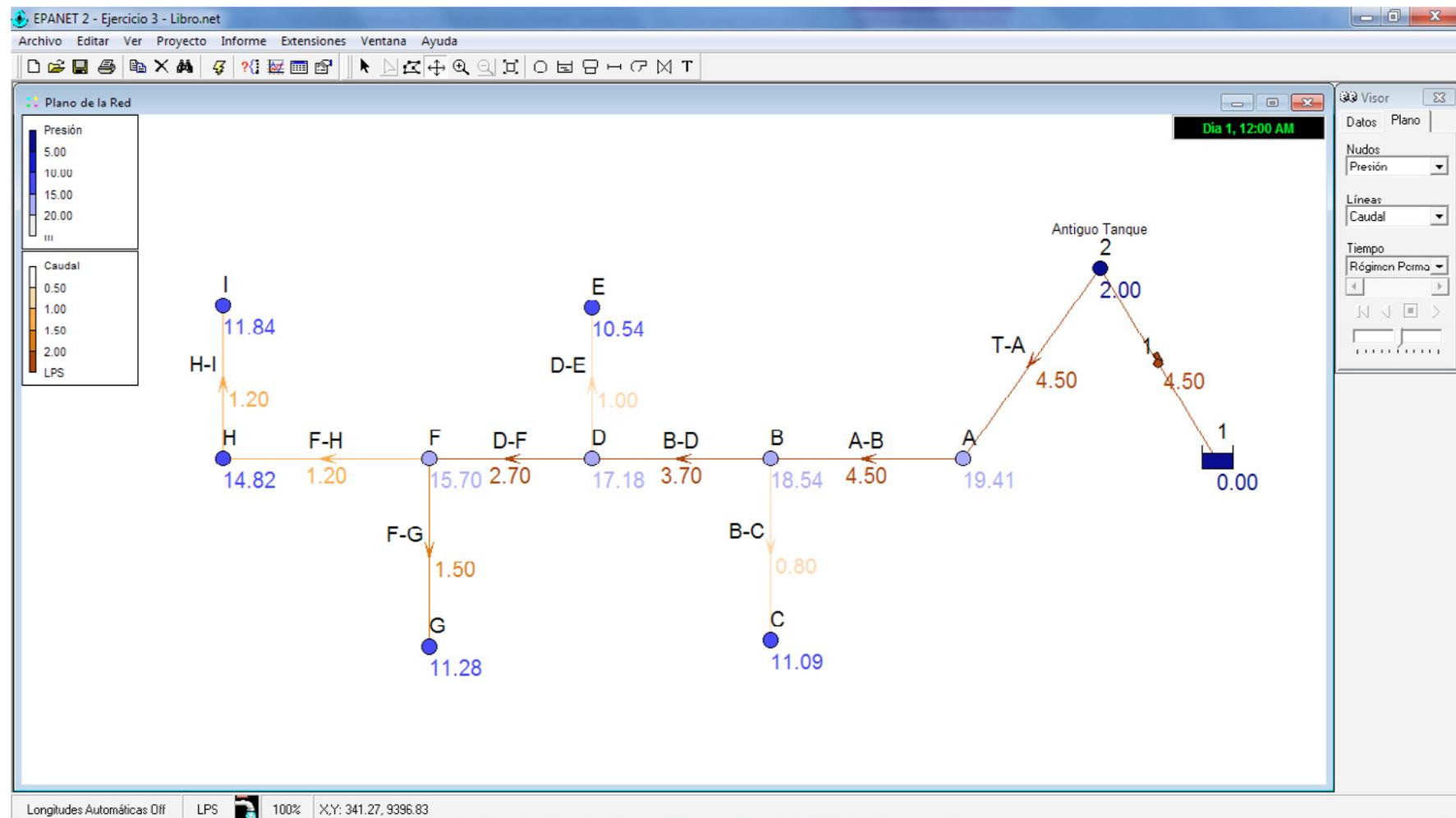


Figura 59. simulación del modelo para el ejercicio 3



Los datos de presión y caudal obtenidos son iguales a los registrados para el sistema alimentado por gravedad del ejercicio 2 (véase figura 49).

Paso D: análisis de resultados.

El análisis de este ejercicio se justifica en saber por qué se calculó el valor de la altura manométrica de la bomba como 21 m. La altura manométrica se puede expresar para el caso de EPANET como la diferencia de alturas entre la cota del espejo de agua en el embalse y la cota de la conexión donde descarga la bomba (altura estática total), más la presión deseada en el nudo de impulsión o descarga.

Altura manom. = Alt. estática total + Presión deseada nudo de descarga

$$\text{Altura manométrica} = (2000 \text{ m} - 1981 \text{ m}) + 2 \text{ m}$$

$$\text{Altura manométrica} = 21 \text{ m}$$

El valor de la presión en el nudo 2 se asumió como 2 metros para tener equivalencia con el nivel piezométrico del modelo con tanque de almacenamiento (ejercicio 2). Con una presión de 2 metros en el nudo 2 se asegura el mismo funcionamiento

del modelo anterior a gravedad, pero en este caso se va a analizar por qué la presión en el nudo 1 es de 11,84 metros.

Primero se debe visualizar la pérdida unitaria para cada tramo de tubería a través de *Informe >> Tablas >> Líneas de la red >> Columnas >> Longitud y pérdida unitaria >> Aceptar* (véanse figuras 47 y 48).

El paso siguiente es calcular la pérdida de energía ocasionada por la fricción entre el fluido y las paredes de la tubería. Recuerde que la pérdida de energía se puede obtener multiplicando la pérdida unitaria en m/km por la longitud del tramo en km. Para realizar esa multiplicación en cada tramo, se genera una tabla en EPANET para líneas con los valores de longitud y pérdida unitaria, luego se llevan los valores a una hoja de cálculo y se obtiene la pérdida de energía por tramo.

Al generar la tabla en EPANET, se seleccionan los valores y se copian con el ícono *Copiar >> Copiar al portapapeles*, para después pegar en una hoja de cálculo. Cuando ya se encuentren los valores en la hoja de cálculo, se realiza la conversión de metros a kilómetros para la longitud de la tubería (dividir por 1000 los valores expresados en metros) y luego se multiplica la longitud por la pérdida unitaria para hallar la pérdida de energía por tramo de tubería. La tabla 23 explica el resultado de la pérdida de energía.

Tabla 22. Cálculo de pérdida de energía por tramo para el ejercicio 3

ID línea	Longitud		Pérdida unitaria m/km	Pérdida de energía hf. m
	m	km		
Tubería A-B	300	0.30	2.89	0.87
Tubería B-C	150	0.15	9.71	1.46
Tubería B-D	200	0.20	6.80	1.36
Tubería D-E	150	0.15	4.27	0.64
Tubería D-F	100	0.10	24.79	2.48
Tubería F-G	150	0.15	29.48	4.42
Tubería F-H	150	0.15	5.89	0.88
Tubería H-I	150	0.15	19.85	2.98
Tubería T-A	550	0.55	2.89	1.59

Con la tabla 23 se busca estimar la presión del nudo I para el modelo simulado con bomba.

El cálculo a realizar consiste en restar el valor de la sumatoria de la pérdida de energía para los tramos que conducen el agua, desde el nudo 2 hasta el nudo I, con respecto al nivel topográfico del nudo I.

Los tramos que conducen el agua del nudo A hasta el I son los siguientes: 2 (T)-A-B-D-F-H-I. En la tabla 23 se visualiza la sumatoria de las pérdidas de energía por tramo.

Tabla 23. Pérdida de energía del nudo 2 al I para el ejercicio 3

ID línea	Longitud		Pérdida unitaria m/km	Pérdida de energía hf. m
	m	km		
Tubería T-A	550	0.55	2.89	1.59
Tubería A-B	300	0.30	2.89	0.87
Tubería B-D	200	0.20	6.80	1.36
Tubería D-F	100	0.10	24.79	2.48
Tubería F-H	150	0.15	5.89	0.88
Tubería H-I	150	0.15	19.85	2.98
Σ				10.16

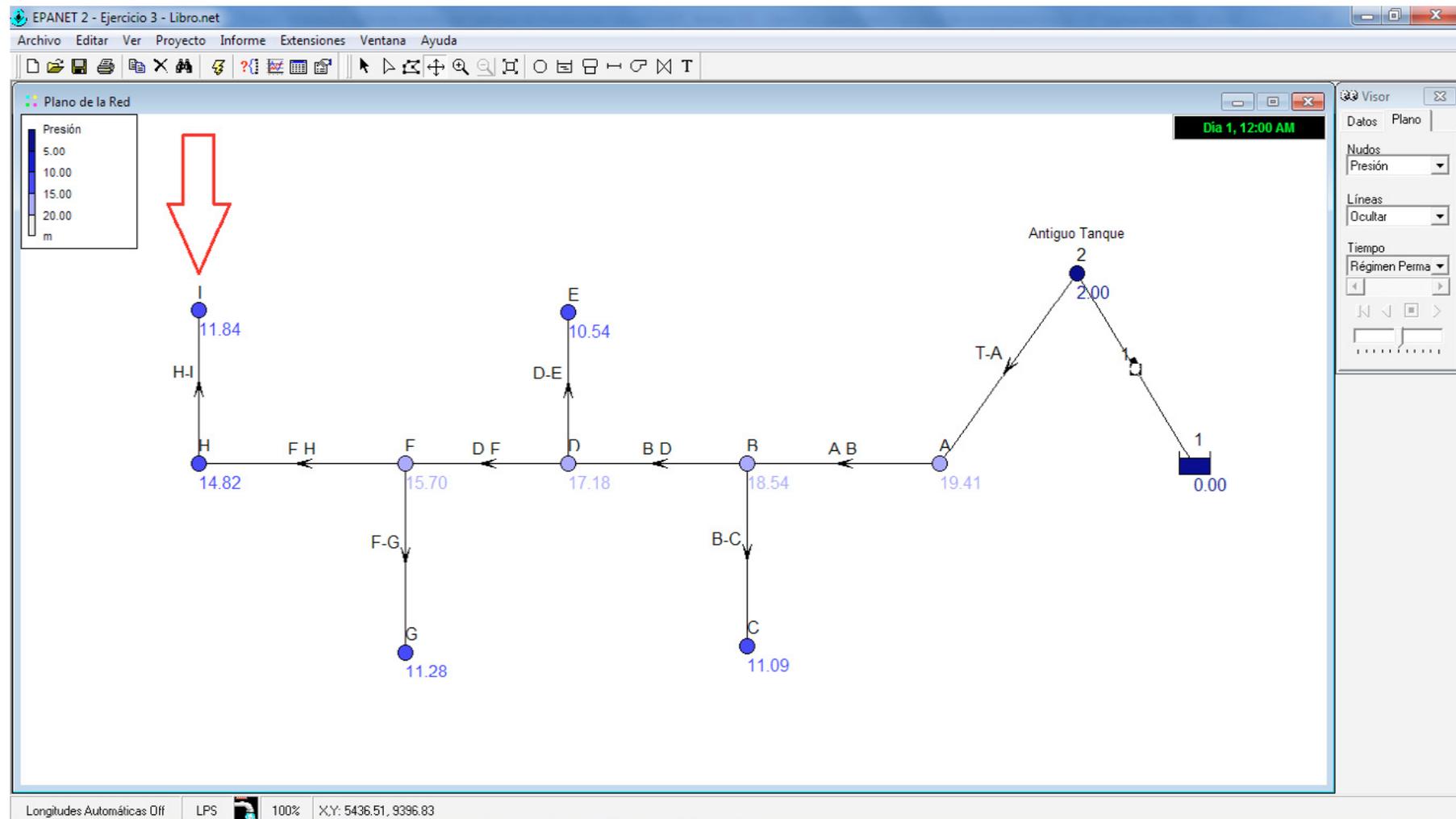
Como ya se ha calculado el valor de la sumatoria de la pérdida de energía para el tramo que suministra agua desde 2 hasta I, lo último que se realiza es la resta entre el nivel piezométrico del nudo 2 (2000 m + 2 m) y la cota del nudo I (1980 m), y nuevamente se resta con la sumatoria de la pérdida de energía (10,16 m).

$$\text{Presión nudo I} = 2002 \text{ m} - 1980 \text{ m} - 10,16 \text{ m}$$

$$\text{Presión nudo I} = 11,84 \text{ m.}$$

De esta manera se encuentra la presión en el nudo I y se verifica con el ya obtenido por medio de EPANET (figura 60).

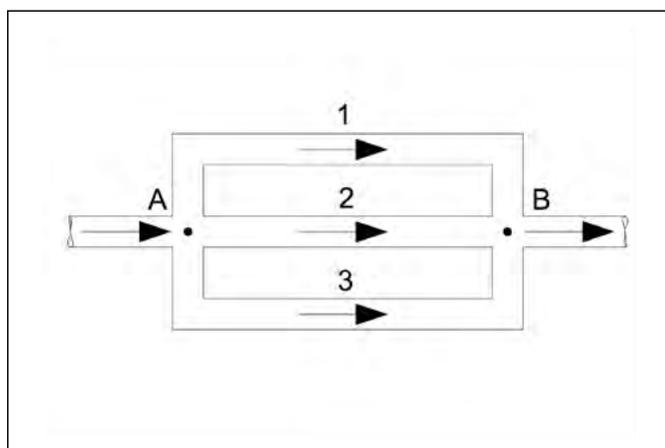
Figura 60. Presión para nudo I, ejercicio 3



2.4 Ejercicio 4: red con tuberías en paralelo

Realizar la simulación de la red mostrada en la figura 61 con tuberías en paralelo, si se sabe que el caudal total que circula por el sistema es 12 cfs (ft^3/s). Determine el caudal que circula por cada uno de los tramos que componen el circuito, así como la presión en la conexión B teniendo en cuenta la presión suministrada en A (56,36 m) (Streeter y Wylie, 1979).

Figura 61. Planteamiento ejercicio 4



Fuente: Streeter y Wylie (1979)

Los datos para cada uno de los elementos físicos se relacionan en las tablas 24 y 25.

Tabla 24. Datos de entrada para tuberías en ejercicio 4

Tramo	Longitud	Diámetro	Rugosidad
	(m)	(mm)	(mm)
1	914.40	304.80	0.30480
2	609.60	203.20	0.03048
3	1219.20	406.40	0.24384

Fuente: Streeter y Wylie (1979)

Tabla 25. Datos de entrada para nudos en ejercicio 4

ID	Cota	Presión		Demanda base	
	(m)	(kPa)	m	ft^3/s	L/s
A	30,480	552,928	56,360	0,00	0,00
B	24,384	Se debe calcular en EPANET.		12,00	339,80

Fuente: Streeter y Wylie (1979)

Tabla 26. Propiedades de fluido para ejercicio 4

Tipo de fluido	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad cinemática (m ² /s)
Fluido del problema	1031.00	$2,790 \times 10^{-6}$
Agua (como referencia)	1000.00	$1,007 \times 10^{-6}$

Fuente: Streeter y Wylie (1979)

2.4.1 Solución a ejercicio 4

Para realizar la simulación del modelo propuesto, es necesario interpretar cuáles son los datos de entrada y salida, pues EPANET no permite estimar la presión en una conexión como un dato de entrada.

Como en el nudo A existe una presión de 56,36 metros, se debe implementar en el modelo un reservorio que suministre dicha energía a la unión A para determinar la presión con base en los caudales que circulan por cada uno de los tramos de tubería en el circuito. A continuación, se muestra la manera de solucionar el ejercicio.

Paso A: configurar las propiedades hidráulicas para el caso de las pérdidas de energía, unidades de caudal, peso específico y viscosidad relativa.

En los datos de entrada de las tuberías, la rugosidad absoluta fue suministrada en milímetros, lo cual indica que la metodología a elegir para el cálculo de pérdidas de energía es la de Darcy-Weisbach.

El caudal en el circuito fue suministrado en pies cúbicos por segundo, por lo tanto, se recomienda realizar la conversión a sistema internacional para configurar las unidades en litros por segundo (L/s).

El peso específico y la viscosidad relativa para el fluido que circula por el sistema se deben calcular con base en la información suministrada en el ejercicio, de manera que la información en la tabla 26 se utiliza de la siguiente manera:

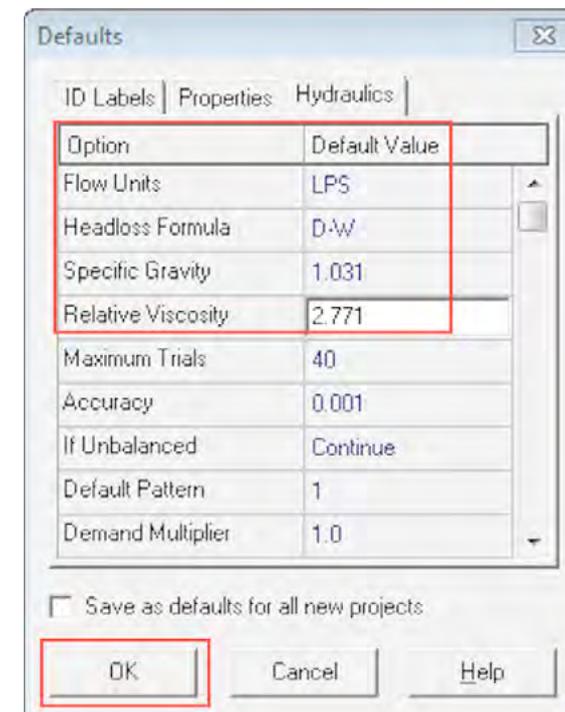
$$\text{Peso específico - EPANET (gravedad específica)} = \frac{1031 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 1,031$$

$$\text{Viscosidad relativa} = \frac{2,790 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}}{1,007 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 2,771$$

Es importante tener en cuenta que el peso específico en EPANET es la misma gravedad específica y que la viscosidad relativa se calcula con base en la viscosidad cinemática. En la tabla 26, las propiedades han sido tomadas con relación al agua a 4 °C para la densidad y a 20 °C para la viscosidad cinemática en relación con lo exigido por EPANET cuando el fluido modelado no es agua.

En la figura 62 se visualizan las propiedades del fluido en EPANET.

Figura 62. Propiedades hidráulicas para ejercicio 4



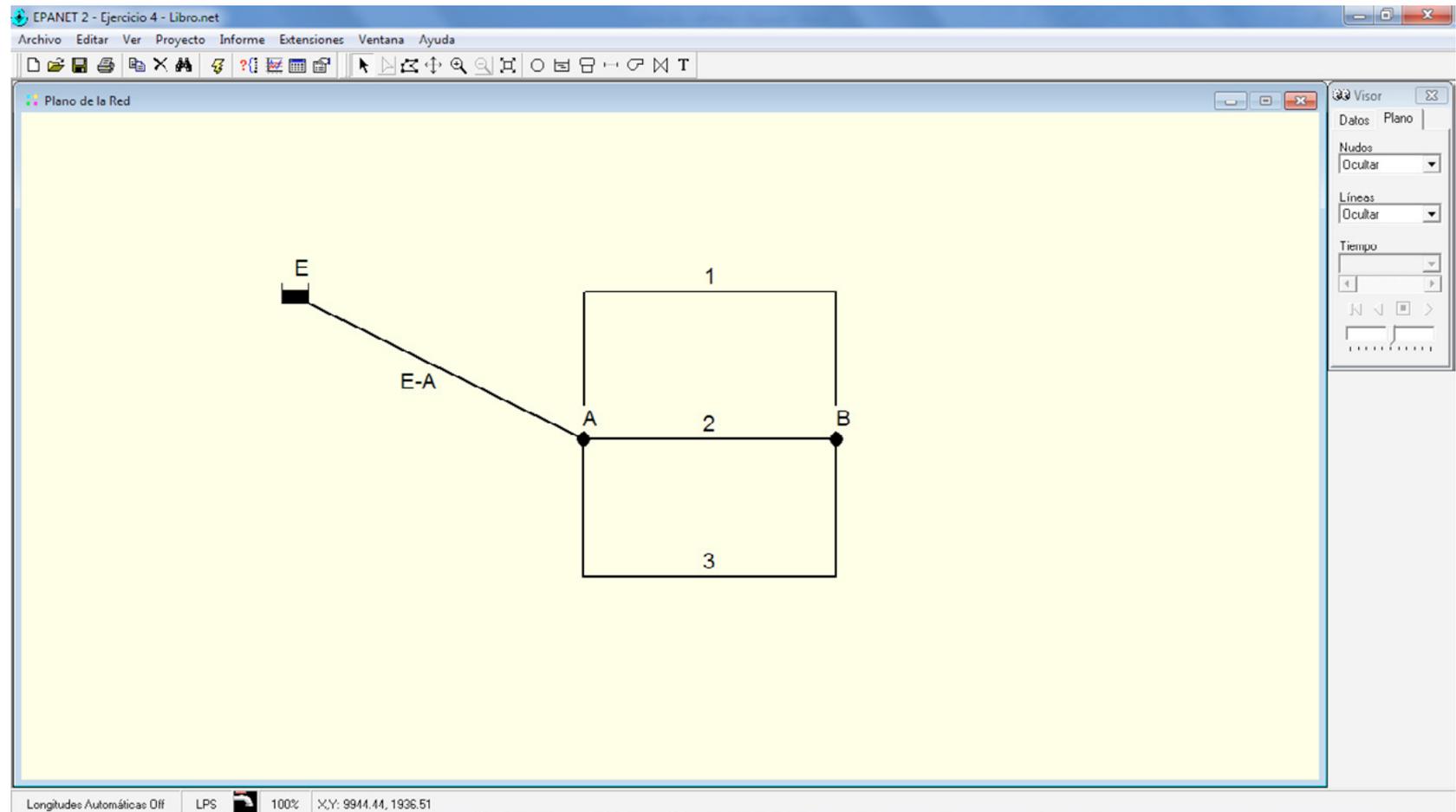
Paso B: introducir objetos físicos es EPANET.

El ejercicio planteado tiene tres tramos de tubería por donde circula el fluido, pero requiere de un tramo adicional que alimente al circuito. Por esa razón, se debe colocar un embalse que funcione como fuente de suministro y que adicionalmente transfiera al fluido la energía suficiente para asegurar la presión requerida en la conexión A.

Las propiedades del tramo adicional, que está ubicado entre el embalse y la conexión A, se pueden asumir como un tubo de gran diámetro, con una pequeña longitud y una rugosidad absoluta similar a la del PVC; todo esto con el fin de asegurar que no exista pérdida de energía en dicho tramo para tener mayor similitud con el ejercicio planteado.

Los nudos en el modelo son: el embalse que sirve como fuente y suministra energía al fluido, el nudo A que funciona como un accesorio de unión y el nudo B que cumple doble función, sirve de unión y adicionalmente permite configurar la demanda total del sistema para lograr estimar los caudales que circulan en las tuberías 1, 2 y 3, así como la presión en el nudo B.

Figura 63. Objetos físicos ejercicio 4



En la figura 63, se muestran los tramos de tubería para el modelo (tramo E-A, 1, 2 y 3) que unen los diferentes nudos. Para las tuberías 1 y 3, la manera de unir los nudos A con B se hace sin necesidad de tener un nudo adicional en el lugar donde la tubería cambia de dirección (90°), simplemente se da clic sobre el área de trabajo para obtener la misma tubería con varios vértices. La tubería 1 debe ser alineada para que tenga un aspecto similar a la tubería 3, esto se hace con el ícono *Seleccionar vértice*.

Se debe tener seleccionada la tubería 1 para luego dar clic en el ícono *Seleccionar vértice*, automáticamente EPANET visualiza los vértices existentes en la tubería. Luego se debe sostener el clic del botón izquierdo del mouse durante el tiempo en que se va a reubicar el vértice.

Luego de reubicar los vértices, se debe dar clic nuevamente en el ícono convencional del cursor para continuar con la introducción de las propiedades de los elementos.

Paso C: cargando propiedades a los elementos de la red.

Con la información suministrada al inicio del ejercicio, se deben introducir los valores de las propiedades para cada elemento.

Para las propiedades del tramo del embalse a la conexión A, se introducen con base en valores que generen una pérdida mínima de energía. En la tabla 27 se consignan las propiedades para dicha tubería.

Tabla 27. Propiedades en tubería embalse-A para el ejercicio 4

Tramo	Longitud	Diámetro	Rugosidad
	(m)	(mm)	(mm)
Emb.-A	0.000001	1000.00	0.0015

Para el caso del embalse, se requiere suministrar la altura piezométrica que posee con respecto a los nudos. Como la tubería de conexión entre el embalse y el nudo A no va a generar pérdidas debido a las propiedades introducidas, el embalse tendrá inicialmente una altura piezométrica igual a la presión requerida en el nudo A (altura total = 56,36 m).

Paso D: ejecución del modelo.

Como ya se han establecido tanto las propiedades hidráulicas del modelo como las propiedades de cada elemento físico de la red, el paso a seguir es ejecutar la simulación con el ícono *Iniciar análisis* para visualizar los datos de caudal en las tuberías y presión en el nudo A y B.

El objetivo principal del ejercicio planteado fue determinar el caudal que circula por cada una de las tuberías del circuito, así como la presión en la conexión B. Con los datos introducidos en el paso anterior se puede estimar que los caudales que circulan para las tuberías 1, 2 y 3 son los reportados por la primera simulación (Q1= 101,18 L/s, Q2= 48,59 L/s, Q3= 190,03 L/s).

La presión encontrada en los nudos A (58,11 m.) y B (57,84 m) no obedece a la solicitada para el ejercicio planteado, por lo tanto, se debe modificar la *Altura total* en el embalse hasta obtener la presión requerida en los nudos. La tabla 28 muestra los resultados preliminares para el ejercicio propuesto.

Tabla 28. Resultados preliminares para ejercicio 4

Elemento	Caudal	Presión
	(L/s)	(mca)
Tubería 1	101.18	No aplica
Tubería 2	48.59	No aplica
Tubería 3	190.03	No aplica
Nudo A	No aplica	58.11
Nudo B	No aplica	57.84

La presión a cumplir en el nudo A según el enunciado del ejercicio es de 56,36 m, así que el embalse debe tener una altura sobre el nudo A equivalente a la presión requerida. El nudo A tiene una cota de 30,48 m, si a este valor se le adiciona el valor de la presión requerida en A, se obtendrá la cota que se debe introducir en las propiedades del embalse.

$$\text{Cota embalse} = \text{Cota de nudo A} + \text{Presión requerida en nudo A}$$

$$\text{Cota embalse (altura total)} = 30,48 \text{ m} + 56,36 \text{ m} = 86,84 \text{ m}$$

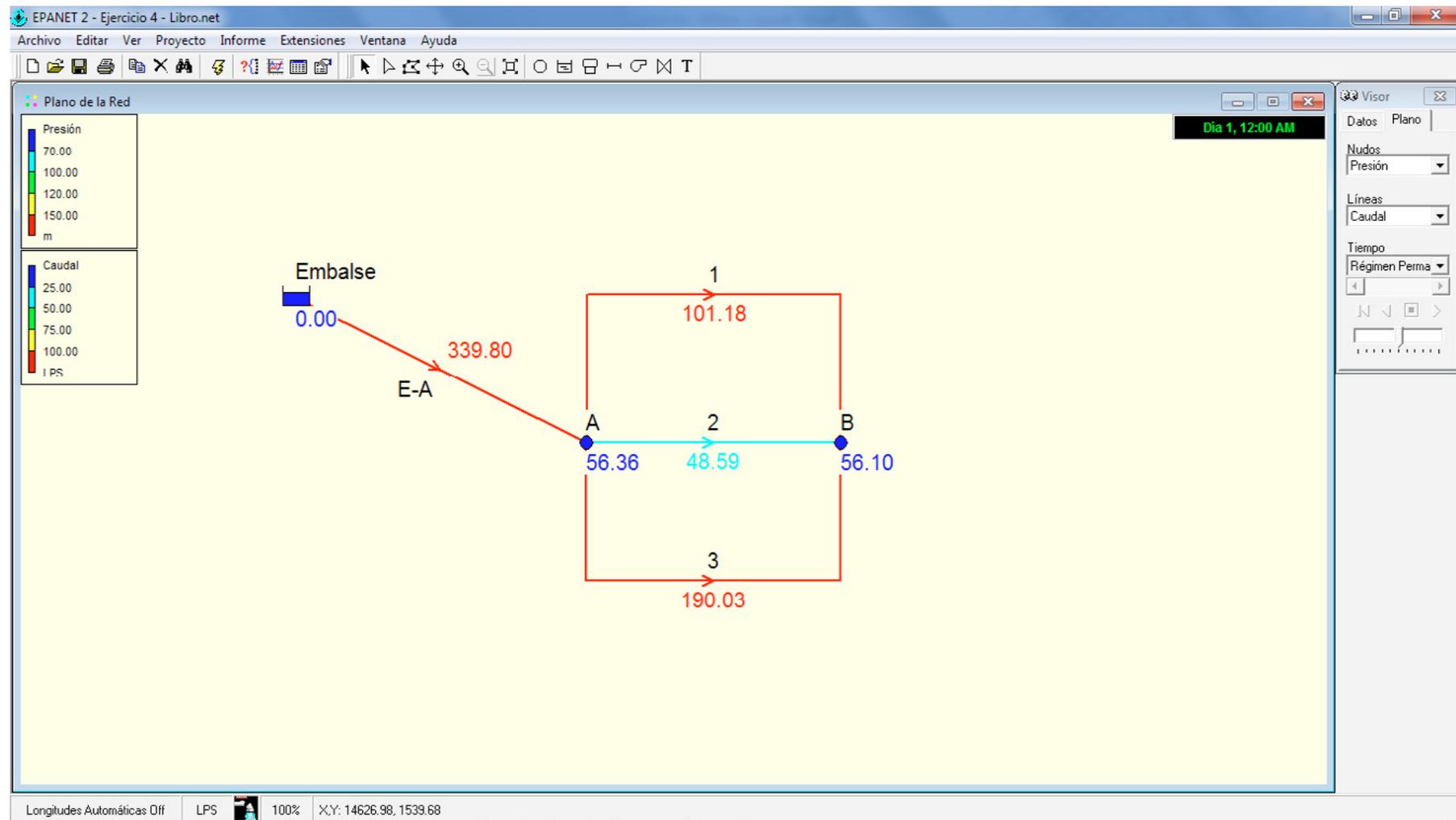
Con la nueva cota en el embalse de 86,84 metros, se debe ejecutar nuevamente la simulación para obtener la presión en los nudos.

Luego de modificar la cota del embalse, la presión obtenida en el nudo A es de 58,11 metros con respecto a los 56,36 metros requeridos en el ejercicio, lo que evidencia que el cálculo realizado para la cota del embalse (86,84 m.) sólo aplica a tuberías donde circule agua a temperatura normal (viscosidad relativa y peso específico de 1).

Debido al tipo de fluido simulado, es necesario encontrar el valor de la *Altura total* del embalse que suministre al sistema la presión requerida en el nudo A.

Al hacer uso de un proceso iterativo se encuentra que, con una *Altura total* en el embalse de 85,15 metros se genera una presión en el nudo A de 56,36 metros, lo que indica que se ha encontrado la presión en el nudo A, pero también en B.

Figura 64. Simulación para el modelo del ejercicio



Paso E: análisis de resultados.

Con el modelo final se cumplió con la presión requerida en el nudo A, pero hay que analizar el valor introducido en la *Altura total* del embalse. La cota suministrada al embalse que permitió cumplir con el parámetro de presión en el nudo A fue de 85,15 m. De tal forma, si se realiza la diferencia entre la cota del embalse y la cota del nudo se obtiene la energía disponible en A.

$$\text{Energía disponible en A} = \text{Cota embalse} - \text{Cota conexión}$$

$$\text{Energía disponible en A} = 85,15 \text{ m} - 30,48 \text{ m} = 54,67 \text{ m}$$

La energía disponible y la presión para el nudo A son iguales debido a que el tramo E-A no produce pérdida de energía, ya que tiene una rugosidad absoluta baja y un gran diámetro.

La presión simulada en EPANET se realizó con base en la cota del embalse que asegurara una presión de 56,36 m, pero hidráulicamente dicha cota del embalse (85,15 m) no generaría la presión de 56,36 m. La presión real que debería generar el embalse con la altura de 85,15 m es de 54,67 m (85,15 – 30,48).

Este error se debe a que EPANET utiliza la propiedad Peso específico (1,031) para calcular la presión en los nudos y las aumenta o reduce con base en un valor de 1, que está en función del peso específico del agua a temperatura normal (para EPANET el peso específico equivale a la gravedad específica).

El error encontrado no indica que los valores obtenidos para la simulación están errados, ya que el ejercicio planteado se analiza desde el nudo A hasta el nudo B. Se debe tener en cuenta que el embalse y el tramo E-A fueron utilizados para lograr obtener un resultado en el modelo simulado en EPANET.

Con base en el análisis anterior, el modelo válido es el mostrado en la figura 64, que visualiza una presión de 56,36 m para el nudo A y 56,10 m para el nudo B; los caudales de las tuberías son de 101,18 L/s para la tubería 1, 48,59 L/s para la tubería 2 y 190,03 L/s para la tubería 3.

Cabe resaltar que, para las tuberías que están en paralelo, la pérdida de energía debe ser la misma por cada tramo del circuito, con el fin de garantizar la misma presión en el nudo B durante su funcionamiento. La manera de comprobar esto, es realizando el cálculo de la pérdida de energía para cada tramo de tubería (1, 2 y 3). En la tabla 29 se muestra el cálculo de la pérdida de energía para cada tramo del circuito en paralelo.

Tabla 29. Pérdida de energía para tuberías en paralelo

ID línea	Longitud		Pérdida unitaria m/km	Pérdida de energía hf. m
	m	km		
Tubería 1	914.40	0.914	6.94	6.35
Tubería 2	609.60	0.610	10.42	6.35
Tubería 3	1219.20	1.219	5.21	6.35

Con el cálculo anterior se valida la teoría de tuberías en paralelo y se plantea de forma clara cómo lograr la simulación de un modelo que normalmente es propuesto en la academia y en la ampliación de sistemas de acueducto.

A continuación se muestran los anexos 1-5, los cuales contienen las propiedades de los fluidos y las características de materiales y accesorios o aditamentos para el cálculo de la hidráulica a presión desarrollada a partir de los ejercicios solucionados.

Anexo 1. Propiedades del agua a una atmósfera de presión

Agua			
Temperatura (°C)	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad dinámica (Pa ·Ws)	Viscosidad cinemática (m ² /s)
0	1000	$1,788 \cdot 10^{-3}$	$1,788 \cdot 10^{-6}$
10	1000	$1,307 \cdot 10^{-3}$	$1,307 \cdot 10^{-6}$
20	998	$1,003 \cdot 10^{-3}$	$1,005 \cdot 10^{-6}$
30	996	$0,799 \cdot 10^{-3}$	$0,802 \cdot 10^{-6}$
40	992	$0,657 \cdot 10^{-3}$	$0,662 \cdot 10^{-6}$
50	988	$0,548 \cdot 10^{-3}$	$0,555 \cdot 10^{-6}$
60	983	$0,467 \cdot 10^{-3}$	$0,475 \cdot 10^{-6}$
70	978	$0,405 \cdot 10^{-3}$	$0,414 \cdot 10^{-6}$
80	972	$0,355 \cdot 10^{-3}$	$0,365 \cdot 10^{-6}$
90	965	$0,316 \cdot 10^{-3}$	$0,327 \cdot 10^{-6}$
100	958	$0,283 \cdot 10^{-3}$	$0,295 \cdot 10^{-6}$

Fuente: White, 1983

[ANEXOS]

Anexo 2.

Propiedades físicas de los fluidos a
1 atm de presión y 20 °C

Líquido	Densidad. (kg/m ³)	Viscosidad dinámica (Pa · s)
Amoníaco	608	0.220 · 10 ⁻³
Benzeno	881	0.651 · 10 ⁻³
Tetracloruro de carbono	1590	0.967 · 10 ⁻³
Etanol	789	1.200 · 10 ⁻³
Glicol etílico	1117	0.214 · 10 ⁻³
Gasolina	680	0.292 · 10 ⁻³
Glicerina	1260	1490 · 10 ⁻³
Queroseno	804	1.920 · 10 ⁻³
Mercurio	13550	1.560 · 10 ⁻³
Metanol	791	0.598 · 10 ⁻³
Aceite SAE 10W	870	104 · 10 ⁻³
Aceite SAE 10W30	876	170 · 10 ⁻³
Aceite SAE 30W	891	290 · 10 ⁻³
Aceite SAE 50W	902	860 · 10 ⁻³
Agua de mar	1025	1.070 · 10 ⁻³

Fuente: Saldarriaga, 2016

Anexo 3.

Rugosidad absoluta para materiales utilizados
en la conducción de fluidos

Rugosidad absoluta	
Material	K _s (mm)
Vidrio	0.0003
PVC, CPVC	0.0015
Asbesto cemento	0.03
GRP	0.03
Acero	0.046
Hierro forjado	0.06
CCP	0.12
Hierro fundido asfaltado	0.12
Hierro galvanizado	0.15
Arcilla vitrificada	0.15
Hierro fundido	0.15
Hierro dúctil	0.25
Madera cepillada	0,18 a 0,90
Concreto	0,30 a 3,00
Acero bridado	0,90 a 9,00

Fuente: Saldarriaga, 2016

Anexo 4.

Coefficientes de Hazen-Williams para materiales utilizados en la conducción de fluidos

Coeficiente	
Material	C_{H-W}
Vidrio	140
PVC, CPVC	150
Asbesto cemento	140
Hierro dulce	De 55 a 130
Mampostería	100
Hierro galvanizado	120
Arcilla vitrificada	100
Madera	120
Concreto	De 135 a 140
Acero soldado	De 118 a 120
Acero bridado	De 107 a 113

Fuente: Saldarriaga, 2016

Anexo 5.

Constantes de aditamento o accesorio para el cálculo de pérdidas menores

Constantes de aditamentos o accesorios	
Aditamento	K_m
Válvula de globo, completamente abierta	10.00
Válvula en ángulo, completamente abierta	5.00
Válvula de cheque	2.50
Válvula de compuerta, completamente abierta	0.20
Válvula de compuerta, con 3/4 de apertura	De 1,00 a 1,15
Válvula de compuerta, con 1/2 de apertura	5.60
Válvula de compuerta, con 1/4 de apertura	24.00
Codo de radio corto	0.90
Codo de radio medio	De 0,75 a 0,80
Codo de radio largo	0.60
Codo de 45°	De 0,40 a 0,42
Retorno (curva en u)	2.20
Tee de paso directo	0.30
Tee de paso de lado	1.80
Unión	0.30
Ye de 45° de paso directo	0.30
Ye de 45° de paso de lado	0.80
Entrada recta a tope	0.50
Entrada con boca acampanada	0.10
Entrada con tubo entrando a tanque	0.90
Salida	1.00

Fuente: Saldarriaga, 2016

[GLOSARIO]

Altura piezométrica: es la altura que se obtiene al sumar la cabeza de posición con la cabeza de presión en una tubería presurizada.

Altura topográfica: es la altura que posee el terreno con respecto al nivel 0. El nivel 0 se referencia con el mar.

C_{H-W} : coeficiente que relaciona de forma subjetiva las propiedades del material de la tubería para calcular las pérdidas de energía con el uso de la metodología empírica de Hazen-Williams.

Cloro: en el libro, hace referencia al compuesto desinfectante que se presenta de forma líquida, sólida o gaseosa, para el tratamiento de agua con fines de potabilización.

EAB: sigla de la Empresa de Acueducto de Bogotá.

Gradiente hidráulico: se obtiene del cociente entre las pérdidas de energía y la longitud que genera dicha pérdida. Por lo tanto, se considera con la pendiente de la línea piezométrica o la línea de energía. También es conocido como pérdida unitaria o *slope friction*.

hf: hace referencia a la pérdida de energía que se genera por la fricción del fluido viscoso con la pared sólida del tubo. hf son las iniciales del inglés *headloss friction*.

hm: se utiliza para referenciar las pérdidas de energía ocasionada por los accesorios o aditamentos. Proviene de las iniciales en inglés de *headloss minor*.

Km: constante o coeficiente del accesorio a aditamento.

Ks: rugosidad absoluta del material que se utiliza para construir las tuberías.

LPS: se utiliza para hacer referencia a las unidades en las que se expresa el caudal para el sistema internacional de unidades: los litros por segundo (L/s).

Mampostería: término utilizado para referirse a los objetos contruidos en ladrillo cocido de arcilla.

Portapapeles: término utilizado en EPANET para designar el texto que es copiado y luego pegado.

RAS (2011): reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico del año 2011.

RDAP: red de distribución de agua potable.

RDE: relación que existe entre el diámetro y el espesor de la pared (d/e). Es utilizada en tuberías que son construidas en plástico.

SCH: Schedule. Hace referencia al calibre de la pared del tubo metálico (espesor de pared). Se utiliza en tuberías que son construidas en materiales metálicos.

Solera: término mexicano que hace referencia al fondo de un canal o un tanque.

Trihalometanos: son compuestos químicos volátiles que se generan durante el proceso de potabilización del agua por la reacción de la materia orgánica.

[BIBLIOGRAFÍA]

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Viceministerio de Agua y Saneamiento. (2011). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS. Título B. Bogotá: Universidad de los Andes, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Mohapatra, S., Sargaonkar, A. y Labhasetwar, P. K. (2014). Distribution network assessment using EPANET for intermittent and continuous water supply. *Water Resour Manage*, 28, 3745-3759. doi:10.1007/s11269-014-0707-y

Pavco-Mexichem. (1 de abril de 2014). Manual Técnico Tubosistemas Biaxial. Bogotá, Colombia. Recuperado de <http://www.pavco.com.co/manuales/manuales-tecnicos/4-25/i/25>

Reyes del Toro, P. y Saldarriaga, J. G. (1 de noviembre de 2005). Comportamiento de biopelículas luego de lavados sucesivos en tuberías de agua a presión. *Revista de Ingeniería*, 22, 142-150. Recuperado e de <http://www.redalyc.org/pdf/1210/121014219016.pdf>

Rossman, L. A. (2000). *Epanet 2. Users Manual*. Cincinnati, Ohio, US: Environmental Protection Agency. Recuperado de <https://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P1007WWU.pdf>

Saldarriaga, J. (2016). *Hidráulica de tuberías. Abastecimiento de agua, redes y riegos* (3.^{ra} ed.). Bogotá: Alfaomega.

Streeter, V. L. y Wylie, E. B. (1979). *Mecánica de fluidos*. Nueva York: McGraw-Hill.

Todini, E. y Pilati, S. (1987). A gradient method for the analysis of pipe networks. *International Conference on Computer Applications for Water Supply and Distribution*. Leicester: Leicester Polytechnic.

White, F. M. (1983). *Mecánica de fluidos* (2.^{da} ed.). Naucalpan de Juárez: McGraw-Hill.



Ingeniería
Civil
Facultad de
Ingenierías