



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Villahermosa

Software para simulación de redes de distribución hidráulica con aplicación en análisis CFD por secciones

Alumno: Ing. Ramiro Armengolt Núñez

Directora de tesis: Dra. Rocío del Carmen Antonio Cruz

CoDirector de tesis: Dr. Francisco López Villarreal



Carretera Villahermosa-Frontera Km. 3.5 Cd. Industrial C.P. 86010
Villahermosa, Tab. México Tel. 01 (993) 3530259, Ext. 101 e-mail:
dir_villahermosa@tecnm.mx
tecnm.mx | villahermosa.tecnm.mx



ÍNDICE

Agradecimientos	5
Resumen	6
Abstract	7
Introducción	8
Problemática	11
Justificación	12
Objetivos	13
Objetivo general	13
Objetivos específicos	13
1 Fundamento teórico	16
1.1 Procedimientos para la determinación de diámetros para sistemas de tuberías	14
1.1.1 Procedimiento para el dimensionamiento de tuberías que transportan líquidos y gases	16
1.2 Solución de redes de distribución de fluidos	23
1.2.1 Método de Hardy-Cross	23
1.2.2 Método de Newton-Raphson	25
2 Metodología	28
2.1 Revisión bibliográfica de redes de distribución hidráulica	28
2.2 Selección del lenguaje de programación para el desarrollo del software	28
2.3 Algoritmos de programación	29
2.4 Criterios para la programación del software de simulación de redes de distribución de fluidos	30
2.5 Ecuaciones y método de cálculo	32

3	Resultados	34
3.1	Ingreso de datos	35
3.1.1	Ingreso de datos de tuberías	35
3.1.2	Ingreso de datos del fluido	36
3.1.3	Ingreso de datos de fuentes y demandas	37
3.2	Visualización de datos cargados	38
3.3	Alertas de violación de criterios	39
3.4	Impresión de resultados en el software	40
	Conclusiones	42
	Bibliografía	43
	ANEXO	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Red mallada de transporte de fluidos.	24
Figura 2.1. Algoritmo general para la programación del software.	29
Figura 2.2. Diagrama de flujo para solución de una red de tuberías	30
Figura 3.1. Interfaz gráfica desarrollada para ingreso de datos al software hidráulico	34
Figura 3.2. Esquema de patín de medición de turbosina	34
Figura 3.3. Selección del diámetro de tuberías	35
Figura 3.4. Ingreso de longitud de la tubería	35
Figura 3.5. Selección del material y captura de nodos, altura, malla, sentido y rugosidad	36
Figura 3.6. Ingreso de datos de propiedades del fluido	37
Figura 3.7. Ingreso de datos de fuentes y demandas	37
Figura 3.8. Alerta de error en el balance general de materia	37
Figura 3.9. Datos cargados a la interfaz del simulador	38
Figura 3.10. Ventana de perfil de velocidades de flujo de 15 gpm en diámetro de 10"	38
Figura 3.11. Ventana de perfil de velocidades de flujo de 10 gpm en diámetro de 10"	39
Figura 3.12. Mensaje de alerta por alta velocidad en una tubería	39
Figura 3.13. Mensaje de alerta por alta caída de presión en una tubería	40
Figura 3.14. Resultados obtenidos con el simulador desarrollado	40
Figura 3.15. Resultados obtenidos con el simulador comercial PipeFlo	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Velocidades recomendadas para gases	15
Tabla 1.2. Velocidades y caídas de presión recomendadas para líquidos	16
Tabla 1.3 Diámetro nominal, espesores y diámetro interno para tuberías de acero al carbón	18

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi directora de tesis, Dra. Rocío del Carmen Antonio Cruz por su orientación y paciencia en la redacción de la tesis, y su aporte al desarrollo del software. Así como su tiempo dedicado para la revisión y corrección en la publicación realizada de este trabajo.

Al Dr. Francisco López Villarreal por su orientación y aporte en sus clases de simulación de procesos, que me permitieron obtener los conocimientos para la programación. Le agradezco la paciencia y tiempo dedicado en cada una de sus clases. Los consejos y tips brindados durante estos dos años para la correcta interpretación de criterios y conocimientos de diseño en hidráulica; que gracias a ellos pude concebir la idea de cómo programar los algoritmos para la interpretación de mensajes de alerta a los usuarios.

Así mismo, agradezco el aporte a mis revisoras de tesis para enriquecer el trabajo; la Dra. Nora Alicia Purata Pérez y la M.I. Alicia Sosa Medina.

También agradezco a CIATEQ A.C por permitirme desarrollar y probar el software, además la confianza brindada como alumno y colaborador en la institución.

Y por último agradezco a mi esposa que fue el pilar principal para el inicio y terminación de este trabajo, el motor que me ha impulsado para no darme por vencido en el proyecto y llegar a la meta.

Resumen

Debido al bajo costo que representa el transporte de fluidos por sistemas de tuberías, fluidos como el agua potable o combustibles líquidos son transportados por este medio. Derivado de ello, se han generado redes complejas para el transporte de fluidos como los son las redes de distribución de agua potable en una ciudad, un sistema de mitigación de incendios de un complejo industrial o el abasto de combustible de un aeropuerto con más de 20 vuelos por hora, las cuales pueden constar de un sistema mallado que facilita el mantenimiento y reduce el gasto de energía para el transporte o sistemas de tuberías abiertas. Sin embargo, el diseño y cálculo de diámetros se vuelve complejo debido a la cantidad de tuberías que puede llegar a tener una red. Actualmente se han desarrollado softwares que permiten el diseño de las redes, pero para realizar un análisis hidráulico en estos software se necesita personal con experiencia en hidráulica para interpretar los datos de velocidad y caída de presión. Puesto que estas variables pueden traer problemas de operación y consumo de energía una vez instalado el sistema.

Este trabajo presenta un software de simulación de redes de distribución hidráulica, el cual contiene programados los criterios de diseño de velocidad y caídas de presión. Al tener programados estos criterios, permite a los usuarios con poca experiencia en el diseño de redes de distribución hidráulica conocer problemas que pueden ocasionar las altas velocidades en tuberías y caídas de presión, optimizando el diseño de una red. Así también genera los perfiles de velocidad para flujos laminares, para que el usuario pueda ver la velocidad máxima alcanzada en la tubería. El software permite construir una red con un número infinito de tuberías; sin embargo, dependerá de la capacidad del hardware instalado; evalúa cada una de ellas para detectar los problemas hidráulicos, permitiendo que el usuario obtenga las alertas necesarias para minimizar los errores en el diseño.

Abstract

Due to the low cost represented by the transport of fluids through piping systems, fluids such as drinking water or liquid fuels are transported by this means. As a result, complex networks have been generated for the transport of fluids, such as drinking water distribution networks in a city, a fire mitigation system in an industrial complex or the fuel supply of an airport with more than 20 flights per hour, which can consist of a meshed system that facilitates maintenance and reduces energy consumption for transport or open piping systems. However, the design and calculation of diameters becomes complex due to the number of pipes that a network can have. Currently, software have been developed that allow the design of networks, but to carry out a hydraulic analysis in these software, personnel with experience in hydraulics are needed to interpret the velocity and pressure drop data. Since these variables can cause problems of operation and energy consumption once the system is installed.

This work presents a simulation software for hydraulic distribution networks, which contains programmed design criteria for speed and pressure drops. By having these criteria programmed, it allows inexperienced users in the design of hydraulic distribution networks to know problems that can cause high speeds in pipes and pressure drops, optimizing the design of a network. It also generates velocity profiles for laminar flows, so that the user can see the maximum velocity reached in the pipe. The software allows you to build a network with an infinite number of pipes but depending on the capacity of the installed hardware, evaluate each one of them to detect hydraulic problems, allowing the user to obtain the necessary alerts to minimize design errors.

Introducción

La simulación hidráulica asistida por ordenador permite optimizar el diseño de redes de distribución hidráulica. La Comisión Nacional del Agua, utiliza estos softwares para el diseño de sus redes de distribución de agua potable y así garantizar el abasto al flujo y presión requeridas en cada hogar al menor costo posible (CONAGUA, 2010).

Para el transporte de agua potable en México se tiene una infraestructura de más de 3 mil kilómetros de acueductos y 631 plantas potabilizadoras; para su diseño se utilizan softwares como el EPANET, Pipe flo y SiNet, que simulan las pérdidas de carga en las tuberías, el balance de materia y la difusividad de químicos en el agua (Ramesh, 2012, CONAGUA, 2010).

Estos paquetes computacionales requieren que el usuario tenga amplia experiencia en diseño de redes hidráulicas, además no permite realizar simulaciones en estado dinámico o cálculo de caudales a partir de las condiciones establecidas en el punto de suministro sin definir la presión en el punto de demanda, lo cual impide que una persona con poca experiencia en diseño de redes hidráulicas tenga éxito en el dimensionamiento de éstas.

Debido a que las redes son muy grandes, los softwares especializados en estos análisis no tienen módulos para análisis CFD (Computational Fluid Dynamics); por tanto, no se puede conocer el perfil de velocidad de flujo dentro de la tubería o las fuerzas que pueden afectar a las tuberías en condiciones de estrés derivado de las fuerzas internas.

Algunos desarrolladores de software han mejorado los algoritmos incluyendo módulos que son retroalimentados por un sistema SCADA, el cual permite realizar detecciones de fugas y recalcular los caudales en cada punto del sistema (DNV, 2018, Orazio Giustolisi, 2015).

EPCON Software en su software SINET incluye módulos para la simulación de flujos de gas, crudo, refrigerantes y cambiadores de calor; proporciona una interfaz para

simulación 2D. Sin embargo, el software sólo simula pérdidas de carga en tubería y velocidades de flujo, permite que el usuario introduzca criterios de velocidad y de caída presión, con ello el software emite alarmas cuando uno de éstos no se cumple, el usuario debe proporcionar los datos de demanda en cada nodo (EPCON, 2019).

Engineered Software, Inc. en su software Pipe Flo Professional incluye sólo análisis de pérdidas de carga en tuberías, no incluye módulos de transferencia de calor, aunque en su interfaz representa símbolos de cambiadores de calor, esto es sólo para considerar la pérdida de carga en los equipos. También el usuario puede ingresar criterios de caída de presión y velocidad para el dimensionamiento de las redes de tuberías. El usuario debe proporcionar los datos de demanda en cada nodo (Engineered Software, 2019)

Para los análisis CFD SolidWorks desarrolló para su software el módulo Flow Simulation para simular el flujo de fluidos a través de válvulas o de objetos, con la finalidad de mejorar el redimiendo de sus diseños al moverse a través de un fluido (gas o líquido) (SolidWorks, 2019)

Por otro lado, ANSYS en su software incluye un módulo para el CFD, el cual permite simular el flujo de calor y fluidos a través de un objeto o en una tubería corta (ANSYS 2019).

COMSOL en su algoritmo para CFD incluye análisis del flujo a través de cambiadores de calor, incluso permite simular una onda expansiva en el seno de un fluido (COMSOL, 2019).

Por tanto, podemos concluir que no existe un software de simulación de redes hidráulicas que realice una corrección de los flujos definidos por el usuario, y que incluya un análisis CFD, puesto que los softwares para análisis CFD no están especializados para análisis de redes hidráulicas, su finalidad es el mejorar el diseño de equipos o vehículos.

Por lo anterior, se plantea desarrollar un software que permita realizar simulaciones en estado estacionario y que pueda ser capaz de corregir los flujos de demanda especificados por el usuario con un error del 5% a partir de las condiciones en el punto

de bombeo o punto de suministro, geometría de la red y el balance de materia y energía elaborados con el algoritmo, además incluirá un módulo para la elaboración de perfiles de velocidad de flujo en el interior de la tubería de la sección de interés del usuario.

Problemática

Para la realización de análisis hidráulicos de redes de distribución de fluidos existen diferentes softwares en el mercado. Sin embargo, para la interpretación de los resultados de los cálculos se requiere personal con experiencia en hidráulica. Además, para que el software simule se requiere proporcionarle el balance de materia o energía, esto en un usuario con poca experiencia en simulación conlleva a tener errores de planteamiento del problema, puesto que no se consideran las condicionales de geometría impuesta por la red de tuberías; por tanto, se sobredimensionan los sistemas de tuberías o equipos de bombeo.

Justificación

En la actualidad para el transporte de diferentes productos desde combustible hasta el agua potable se utilizan sistemas de tuberías por su bajo costo y mantenimiento comparado con otro tipo de transportes. Para el diseño de una red de distribución existen softwares comerciales que facilitan esta labor, para su correcta aplicación se requiere definir las variables de flujo o de presión en puntos de demanda, esto limita al software a no considerar las restricciones geométricas que el sistema impone.

Puesto que en los grados de libertad establecidos en su algoritmo de los softwares actuales no se consideran las restricciones geométricas, las redes quedan sobredimensionadas o generan problemas de balance de materia en la operación de la red real, incrementando la inversión inicial o el costo de operación. En consecuencia, para la realización de análisis hidráulicos se requiere de personal con experiencia en hidráulica para el correcto dimensionamiento de redes de distribución.

Por tanto, se desarrollará un software que sirva como herramienta para el diseño de redes de distribución, para usuarios con poca experiencia en análisis hidráulicos, donde el software recalculé el balance de materia y energía de acuerdo con la geometría del sistema, y emita alertas cuando se sobre pasen los criterios de diseño especificados, como son los criterios de velocidad y caída de presión recomendados.

Objetivos

Objetivo general

Desarrollar un software para simulación de redes hidráulicas, capaz de estimar flujos en puntos nodales y demanda a partir de la definición de la geometría de la red y la especificación de la fuente del fluido, así como realizar análisis CFD por secciones de acuerdo al interés del usuario.

Objetivos específicos

1. Programar el algoritmo de cálculo.
2. Realizar pruebas del algoritmo programado
3. Comparar los resultados obtenidos con el algoritmo programado con resultados de softwares comerciales.

1 Fundamento teórico

El transporte de cantidad de movimiento y caídas de presión en una tubería se pueden estudiar desde tres puntos de vista, que son el molecular, microscópico y macroscópico (Bird, 2006). La elección del nivel de estudio depende del tipo de problema que se requiere resolver y la exactitud de la solución.

Por lo general, los problemas de transporte de fluidos para sistemas de tubería se ven desde el punto de nivel macroscópico, donde se describe el cambio de materia, cantidad de movimiento, energía, cantidad de movimiento angular debido a las corrientes que entran o salen del sistema o alteraciones que vienen del entorno (Bird, 2006). Por tanto, los procedimientos de cálculo que se describen en este trabajo estarán abordados desde el punto de vista de nivel macroscópico. En los siguientes capítulos se describirán los fundamentos teóricos para el dimensionamiento de tuberías, así como los criterios de velocidad y caídas de presión recomendadas.

1.1 Procedimientos para la determinación de diámetros para sistemas de tuberías

Para todo proceso de transformación de una materia prima en un producto de alto valor agregado se requiere del transporte de fluidos, que puede ser desde un sistema constituido solo por una bomba, tubería y recipiente de almacenamiento, hasta una red muy compleja de distribución, como lo son las redes de distribución de agua potable o redes de sistemas contraincendios.

Por tanto, la determinación del diámetro correcto de tuberías para el transporte de dichos fluidos se convierte en una parte esencial de proyectos de procesos de transformación industrial, debido a que la selección de un diámetro menor al requerido se convierte en un problema de alto consumo energético en el sistema de bombeo y un problema de erosión de tuberías a través del tiempo; la elección de un diámetro mayor al requerido representa un alto costo de inversión inicial y a través del tiempo se convierte en problemas de sedimentación y limpieza de tuberías (Bird, 2006, Crane, 1992 y Ludwig, 1997). Por este motivo toma relevancia conocer los criterios para la determinación de diámetros de tuberías.

Para el cálculo del diámetro de tuberías existen métodos gráficos y métodos analíticos; sin embargo, para este trabajo se abordarán los métodos analíticos, puesto que estos métodos son los requeridos para poder resolver problemas de transporte de fluidos mediante ordenador. La información mínima requerida para poder determinar el diámetro de una tubería es la siguiente (Bird, 2006, Crane, 1992 y Ludwig, 1997):

- 1) Tipo de fluido
- 2) Densidad del fluido
- 3) Viscosidad del fluido
- 4) Material de la tubería
- 5) Rugosidad de la tubería
- 6) Flujo másico o volumétrico
- 7) Presión en el punto final
- 8) Temperatura del fluido
- 9) Elevaciones de la ruta de tubería
- 10) Longitud de la tubería
- 11) Estado termodinámico del fluido (líquido subenfriado, líquido saturado, vapor saturado o vapor sobrecalentado).
- 12) Transferencia de calor con el medio que rodea la tubería
- 13) Criterios de velocidad y caída de presión recomendada al interior del tubo

La combinación de esta información ayuda a calcular y obtener el diámetro óptimo para el transporte del fluido. Algunos de los criterios de velocidades y de caídas de presión recomendadas se muestran en las tablas 1.1 y 1.2.

Tabla 1.1. Velocidades recomendadas para gases

Fluido	Descripción	Velocidad recomendada (pies/s)
Aire de proceso	Aire de proceso	100
	Aire de instrumentos	35
Gas	Gas húmedo	60
	Gas seco	100
	Gas Natural	100

Fuente: Crane, 1992, Ludwig, 1997.

Tabla 1.2. Velocidades y caídas de presión recomendadas para líquidos

Transporte en	Fluido	Velocidad recomendada (pies/s)	Caída de presión máxima recomendada (Psi/100pies)
Succión de bombas	Servicios generales	4-10	2
	Líquido saturado	1-4	0.05-0.025
	Líquido subenfriado	1-6	0.2-1
	Agua de enfriamiento	1-8	0.2-1
	Líquidos corrosivos y/o erosivos	3-6	
Descarga de bombas	Servicios generales	5-10	2
	Líquido saturado	5-15	1-4
	Líquido subenfriado	5-15	1-4
	Agua de enfriamiento	5-15	0.6-2
	Agua de alimentación a calderas	8-15	
	Líquidos corrosivos y/o erosivos	3-6	
	Descarga de agua e hidrocarburos		2
	Descarga de alta presión ($\geq 7,000$ psig)		3-4

Fuente: Crane, 1992, Ludwig, 1997.

1.1.1 Procedimiento para el dimensionamiento de tuberías que transportan líquidos y gases

1. Dimensionamiento de tuberías que manejan líquidos.

Como todo procedimiento de cálculo, para la determinación de diámetros de tuberías se requiere tomar ciertas consideraciones con la finalidad de facilitar el cálculo, el procedimiento que a continuación se describe es aplicable de acuerdo con las siguientes consideraciones (Crane, 1992):

- a) El fluido es newtoniano
- b) El tubo está completamente lleno.
- c) Existe una sola fase
- d) La densidad del fluido no varía a través del tubo
- e) La viscosidad no varía a través del tubo

Una vez que se verificó que el sistema cumple con las consideraciones establecidas, el primer paso a realizar es aproximar el diámetro para el transporte mediante la ecuación 1.1, de acuerdo con los criterios de velocidad recomendados de la tabla 1.2

$$d = 0.639(Q/v)^{1/2} \quad \text{Ec. 1.1}$$

Donde:

d = diámetro en pulgadas

Q = Flujo volumétrico en galones por minuto

v = Velocidad promedio en el tubo en pies por segundo

El diámetro calculado en la ecuación 1.1, corresponde al diámetro interno en pulgadas de la tubería, el diámetro nominal comercial a seleccionar depende del tipo de material de la tubería; por ejemplo, para tuberías de acero al carbón el espesor y diámetro interno del tubo se pueden consultar en el código ASME/ANSI B36.10/19. Un pequeño extracto de las dimensiones establecidas para tuberías de acero al carbono en el código se muestra en la Tabla 1.3.

Una vez que se haya seleccionado el diámetro debe determinar la caída de presión que genera el flujo en la tubería seleccionada. La ecuación general de la pérdida de presión se conoce como fórmula de Darcy-Weisbach (ecuación 1.2), esta ecuación puede ser aplicable tanto para un flujo laminar como turbulento y cualquier diámetro de tubería sin importar el material de la misma (Bird, 2006, Crane, 1992 y Ludwig, 1997). Otra ecuación que se puede utilizar para la estimación de la caída de presión dentro de una tubería es la ecuación de Hazen-Williams. Sin embargo, es aplicable a diámetros mayores de 2 pulgadas (Bird, 2006, Crane, 1992 y Ludwig, 1997).

$$\Delta P_{100} = 0.0216 (f * \rho) \left(\frac{Q^2}{d^5} \right) \quad \text{Ec. 1.2}$$

Tabla 1.3 Diámetro nominal, espesores y diámetro interno para tuberías de acero al carbón

	Diámetro nominal de la tubería pulg.	Diámetro externo pulg.	Espesor pulg.	Diámetro interno		Funciones de diámetro interno (en pulg.)				Area transversal interna	
				d pulg.	D pies	d ²	d ³	d ⁴	d ⁵	d	A
Cédula 10	14	14	0.250	13.5	1.125	182.25	2460.4	33215.	448400.	143.14	0.994
	16	16	0.250	15.5	1.291	240.25	3723.9	57720.	894660.	188.69	1.310
	18	18	0.250	17.5	1.4583	306.25	5359.4	93789.	1041309.	240.53	1.670
	20	20	0.250	19.5	1.625	380.25	7414.9	144590.	2819500.	298.65	2.074
	24	24	0.250	23.5	1.958	552.25	12977	304980.	7167030.	433.74	3.012
	30	30	0.312	29.376	2.448	862.95	25350	744288.	21864218.	677.76	4.707
Cédula 20	8	8.625	0.250	8.125	0.6771	66.02	536.38	4359.3	35409.	51.85	0.3601
	10	10.75	0.250	10.25	0.8542	105.06	1076.9	11038.	113141.	82.52	0.5731
	12	12.75	0.250	12.25	1.021	150.06	1838.3	22518.	275855.	117.86	0.8185
	14	14	0.312	13.376	1.111	178.92	2393.2	32012.	428185.	140.52	0.9758
	16	16	0.312	15.376	1.281	236.42	3635.2	55894.	859442.	185.69	1.290
	18	18	0.312	17.376	1.448	301.92	5246.3	91156.	1583978.	237.13	1.647
	20	20	0.375	19.250	1.604	370.56	7133.3	137317.	2613252.	291.04	2.02
	24	24	0.375	23.25	1.937	540.56	12568	292205.	6793832.	424.56	2.948
	30	30	0.500	29.00	2.417	841.0	24389	707281.	20511149.	660.52	4.587
Cédula 30	8	8.625	0.277	8.071	0.6726	65.14	525.75	4243.2	34248.	151.16	0.3553
	10	10.75	0.307	10.136	0.8447	102.74	1041.4	10555.	106987.	80.69	0.5603
	12	12.75	0.330	12.09	0.0075	146.17	1767.2	21366.	258304.	114.80	0.7972
	14	14	0.375	13.25	1.1042	175.56	2326.2	30821.	408394.	137.88	0.9575
	16	16	0.375	15.25	1.2708	232.56	3546.6	54084.	824801.	182.65	1.268
	18	18	0.438	17.124	1.4270	293.23	5021.3	85984.	1472397.	230.30	1.599
	20	20	0.500	19.00	1.5833	361.00	6859.0	130321.	2476099.	283.53	1.969
	24	24	0.562	22.876	1.9063	523.31	11971	273853.	6264703.	411.00	2.8054
	30	30	0.625	28.75	2.3958	826.56	23764	683201.	19642160.	649.18	4.508
Cédula 40	1/8	0.405	0.088	0.269	0.0224	0.0724	0.0195	0.005242	0.00141	0.057	0.00040
	1/4	0.540	0.088	0.364	0.0303	0.1325	0.0482	0.01756	0.00639	0.104	0.00072
	3/8	0.675	0.091	0.493	0.0411	0.2430	0.1198	0.05905	0.02902	0.191	0.00133
	1/2	0.840	0.109	0.622	0.0518	0.3889	0.2406	0.1497	0.09310	0.304	0.00211
	3/4	1.050	0.113	0.824	0.0687	0.679	0.5595	0.4610	0.3799	0.533	0.00271
	1	1.315	0.133	1.049	0.0874	1.100	1.154	1.210	1.270	0.864	0.00600
	1 1/4	1.660	0.140	1.380	0.1150	1.904	2.628	3.625	5.005	1.495	0.01040
	1 1/2	1.900	0.145	1.610	0.1342	2.592	4.173	6.718	10.82	2.036	0.01414
	2	2.375	0.154	2.067	0.1722	4.272	8.831	18.250	37.72	3.355	0.02330
	2 1/2	2.875	0.203	2.469	0.2057	6.096	15.051	37.161	91.75	4.788	0.03322
	3	3.500	0.216	3.68	0.2557	9.413	28.878	88.605	271.8	7.393	0.05130
	3 1/2	4.000	0.227	3.548	0.2957	12.59	44.663	158.51	562.2	9.886	0.06870
	4	4.500	0.237	4.026	0.3355	16.21	65.256	262.76	1058.	12.730	0.08840
	5	5.563	0.258	5.047	0.4206	25.47	128.56	648.72	3275.	20.006	0.1390
	6	6.625	0.280	6.065	0.5054	36.78	225.10	1325.8	8206.	28.891	0.2006
	8	8.625	0.322	7.981	0.6651	63.70	508.36	4057.7	32380.	50.027	0.3474
	10	10.75	0.365	10.02	0.8350	100.4	1006.0	10080.	101000.	78.855	0.5475
	12	12.75	0.406	11.938	0.9965	142.5	1701.3	20306.	242470.	111.93	0.7773
	14	14.0	0.438	13.124	1.0937	172.24	2260.5	29666.	389340.	135.28	0.9394
	16	16.0	0.500	15.000	1.150	225.0	3375.0	50625.	759375.	176.72	1.2272
	18	18.0	0.562	16.876	1.4063	284.8	4806.3	81111.	1368820.	223.68	1.5533
	20	20.0	0.593	18.814	1.5678	354.0	6859.5	125320.	2357244.	278.00	1.9305
	24	24.0	0.687	22.626	1.8855	511.9	11583.	262040.	5929784.	402.07	2.7921
Cédula 60	8	8.625	0.406	7.813	0.6511	61.04	476.93	3725.9	29113.	47.94	0.3329
	10	10.75	0.500	9.750	0.8125	95.06	926.86	9036.4	88110.	74.66	0.5185
	12	12.75	0.562	11.626	0.9688	135.16	1571.4	18268.	212399.	106.16	0.7372
	14	14.0	0.593	12.814	1.0678	164.20	2104.0	26962.	345480.	128.96	0.8956
	16	16.0	0.656	14.688	1.2240	215.74	3168.8	46544.	683618.	169.44	1.1766
	18	18.0	0.750	16.500	1.3750	272.25	4492.1	72120.	1222982.	213.83	1.4849
	20	20.0	0.812	18.376	1.5313	337.68	6205.2	114028.	2095342.	265.21	1.8417
	24	24.0	0.968	22.064	1.8387	486.82	10741	236994.	5229036.	382.35	2.6552
Cédula 80	1/8	0.405	0.095	0.215	0.0179	0.0462	0.00994	0.002134	0.000459	0.036	0.00025
	1/4	0.540	0.119	0.302	0.0252	0.0912	0.0275	0.008317	0.002513	0.072	0.00050
	3/8	0.675	0.126	0.423	0.0353	0.1789	0.0757	0.03200	0.01354	0.141	0.00093
	1/2	0.840	0.147	0.546	0.0455	0.2981	0.1628	0.08866	0.04852	0.234	0.00163
	3/4	1.050	0.154	0.742	0.0618	0.5506	0.4085	0.3032	0.2249	0.433	0.00300
	1	1.315	0.179	0.957	0.0797	0.9158	0.8765	0.8387	0.8027	0.719	0.00499
	1 1/4	1.660	0.191	1.278	0.1065	1.633	2.087	2.6667	3.409	1.283	0.00891

Fuente: Código ASME/ANSI B36.10/19

La fórmula de Darcy-Weisbach que se muestra en la ecuación 1.2, está determinada para una tubería limpia, que no ha tenido incrustaciones o sedimentación por la operación; sin embargo, una vez que el sistema ha operado se tiene un aumento en la pérdida de presión con el tiempo, debido a las incrustaciones, las cuales reducen el diámetro de tubería. Se sabe que para

un flujo determinado y un factor de fricción fijo, la pérdida de presión por metro de tubería varía de manera inversamente proporcional con “d” a la quinta potencia. Por ejemplo, si reduce en 2% el diámetro, causa un incremento en la pérdida de presión de un 11%; a su vez, una reducción del 5% produce un incremento del 29%. Por este motivo, cuando se calcula el diámetro de una tubería se debe tener en consideración el envejecimiento de ésta, dado un factor de sobre diseño del 20% como se muestra en la ecuación 1.3 (Crane, 1992 y Ludwig, 1997).

$$\Delta P_{100} = (0.0216 (f * \rho) \left(\frac{Q^2}{d^5}\right))^{1.2} \quad \text{Ec. 1.3}$$

Donde:

ΔP_{100} = Pérdida de presión en psi por cada 100 pie de tubería

f = Factor de fricción de Fanning adimensional

d = diámetro interno en pulgadas

Q = Flujo volumétrico en galones por minuto

El factor de fricción para un flujo laminar es una función directa del número de Reynolds y se puede calcular directamente con la ecuación 1.4 (Bird, 2006).

$$f = \frac{64}{Re} \quad \text{Ec. 1.4}$$

Donde:

f = Factor de fricción de Fanning adimensional

Re = Número de Reynolds adimensional

El número de Reynolds está dado por la ecuación 1.5 (Bird 2006, Crane,1992).

$$Re = 50.6 \frac{Q * \rho}{d\mu} \quad \text{Ec. 1.5}$$

Donde:

Re = Número de Reynolds adimensional

Q = Flujo volumétrico en galones por minuto

d = diámetro interno en pulgadas

ρ = densidad del fluido en libras por pie cúbico

μ = Viscosidad del fluido en Centipoises

Para flujos turbulentos el factor de fricción no solo depende del número de Reynolds, sino también de la rugosidad relativa de las paredes de la tubería. La rugosidad relativa de una tubería es la relación que existe entre la rugosidad de la tubería y el diámetro interno de la misma, la cual se calcula mediante la ecuación 5.6 (Crane, 1992 y Ludwig, 1997).

$$\text{Rugosidad relativa} = \frac{\varepsilon}{D} \quad \text{Ec. 1.6}$$

Donde

ε = Rugosidad del material pulgadas

D = Diámetro interno de la tubería en pulgadas

Aunque existen diferentes modelos para el cálculo del factor de fricción en flujo turbulento, para el cálculo se utiliza la ecuación 1.7, conocida como modelo de Churchill, con rangos de aplicación de $4 \times 10^3 < Re < 1 \times 10^8$ y $1 \times 10^{-6} < \varepsilon/D < 0.05^{2,3}$. La rugosidad relativa para diferentes materiales se muestran en la figura 1.1.

$$f = 8 \left(\frac{8}{Re} \right)^{12} + (A + B)^{-1.5} \frac{1}{12} \quad \text{Ec. 1.7}$$

Donde

$$A = \left(2.457 * \ln \left(\frac{1}{\left(\frac{7}{Re} \right)^{0.9} + 0.27 * \frac{\varepsilon}{D}} \right) \right)^{16} \quad \text{Ec. 1.8}$$

$$B = \left(\frac{37530}{Re} \right)^{16} \quad \text{Ec. 1.9}$$

Una vez que se calcula la caída de presión en 100 pie, se compara el resultado con las caídas de presión recomendadas en la tabla 1.2, si el resultado está dentro de los parámetros se recomienda evaluar la caída de presión total de la línea, considerando la ruta con mayor longitud desde el punto de la fuente de presión hasta el punto más lejano donde interese suministrar el fluido a una presión dada, para determinar si el diámetro propuesto es el adecuado. Si no

está dentro de los parámetros recomendados en la tabla 1.2, se debe realizar el cálculo con el diámetro comercial mayor más próximo al calculado.

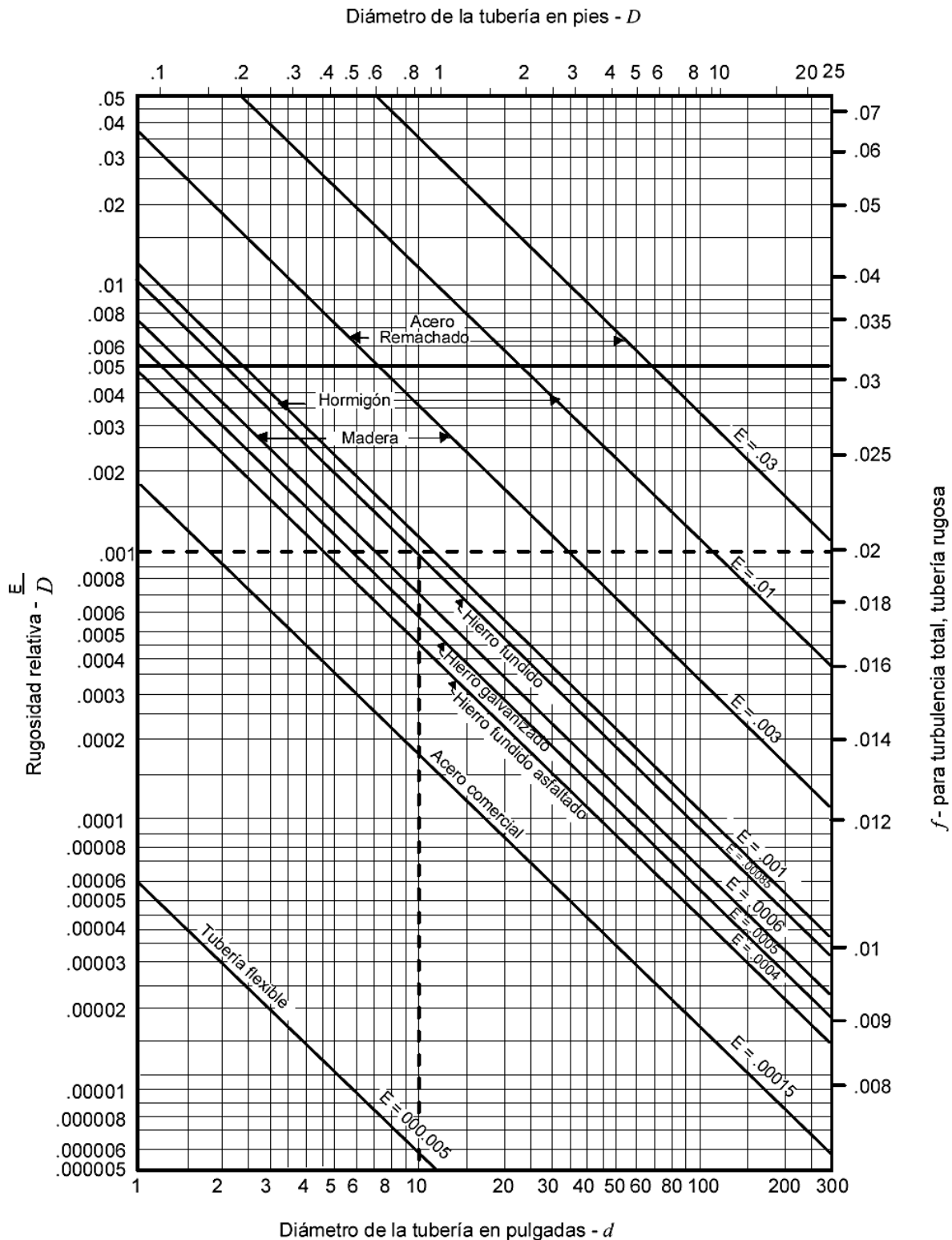


Figura 1.1. Rugosidad para diferentes tipos de materiales (Crane, 1992).

2. Dimensionamiento de tuberías que manejan gases o vapores sobrecalentados

Para el dimensionamiento de tuberías que manejan gases, debido a su característica de densidad variable no es aplicable directamente la ecuación de Darcy, por lo que se requiere tomar las siguientes consideraciones para su aplicación.

- a) Si la pérdida de presión calculada es menor que el 10% de la presión de entrada, se obtiene una exactitud razonable si el volumen específico que se introduce en la fórmula se basa en las condiciones de entrada o en las condiciones de salida, cualesquiera que sean conocidas.
- b) Si la caída de presión calculada es mayor al 10% pero menor a un 40% de la presión de entrada, la ecuación de Darcy puede aplicarse con precisión razonable utilizando el volumen específico basado en una medida de las condiciones de entrada y salida.

Con estas consideraciones se puede aplicar el procedimiento expuesto para tuberías que manejan líquidos.

1.2 Solución de redes de distribución de fluidos

El diseño óptimo de sistemas de distribución de un fluido ha permanecido como un problema que no se ha resuelto de una manera eficiente debido a su complejidad. Yates en 1984 lo clasificó como un problema NP-hard dentro de las ciencias computacionales, esto es, como un problema para el que no existe en la actualidad un algoritmo que lo resuelva en un tiempo acotado de forma polinómica con respecto al tamaño de la entrada de la instancia del problema y que, además, es al menos tan difícil de resolver como el más difícil de los problemas en la clase NP (problemas que pueden resolverse en un tiempo polinómico por una máquina de Turing no determinante). Sin embargo, su utilidad y beneficios lo mantienen como uno de los problemas más importantes dentro de la hidráulica (Sanvicente, 2003).

El problema general consiste en diseñar y colocar tuberías para conducir un fluido (red de distribución) desde los puntos fuente hasta los puntos demandantes, satisfaciendo sus requerimientos en cuanto a gasto y presión, y que el costo de construcción sea el mínimo. La complejidad de modelar las redes de distribución se fundamenta en el requerimiento de caudal y presión en todas las tuberías y nodos del sistema. La conceptualización del problema demanda las características físicas de las tuberías, y la especificación de las variables presión y caudal dentro del sistema (Sanvicente, 2003 y Valle, 2018).

Cuando se conocen puntos de presión y flujo del modelo, se pueden implementar ecuaciones de continuidad (balance de masa) y balance energético para estimar el caudal y la presión en cualquier punto del sistema. Varios métodos numéricos de resolución de problemas se han desarrollado para resolver el modelo en estado estacionario (Valle, 2018).

A continuación, se presentan algunos de los métodos de solución numérica para sistemas conformados por fluidos en una sola fase.

1.2.1 Método de Hardy-Cross

Es la metodología más utilizada para determinar los caudales circulantes en una red mallada cuyos diámetros son conocidos, desarrollado por Cross en 1935. Para aplicar esta metodología es necesario partir de diámetros supuestos y comprobar posteriormente los flujos y presiones requeridas en cada punto de demanda (Crane, 1992 y Ludwig, 1997).

El flujo en cada tubería de la red, se calcula mediante un proceso iterativo, basándose en dos principios hidráulicos fundamentales, que tienen similitud con las leyes de Kirchhoff en electricidad.

- 1) **Ley de nodos:** La masa de fluido (Q) que entra en un nodo debe ser igual a la suma de masas que salen de ese mismo nodo, ecuación 1.10.

$$\sum Q = 0 \quad \text{Ec. 1.10}$$

2) **Ley de mallas:** La suma algebraica de las pérdidas de presión o carga h_f en una malla es igual a cero, ecuación 1.11.

$$\sum h_f = 0 \quad \text{Ec. 1.11}$$

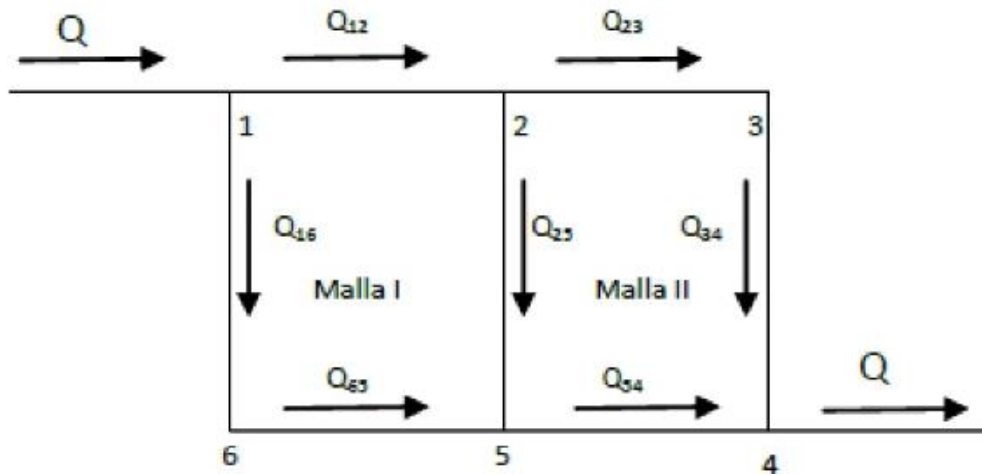


Figura 1.1. Red mallada de transporte de fluidos.

Para cualquier tubería en el que Q_0 es asumido como el flujo inicial, la ecuación 1.12, puede ser estimada usando una expansión de la serie Taylor como sigue en la ecuación 1.13.

$$h_f = KQ^n \quad \text{Ec. 1.12}$$

$$h_f = K(Q_0^n + Q_0^{n-1}\Delta Q + n(n-1)Q_0^{n-2}\Delta Q^2 + \dots) \quad \text{Ec. 1.13}$$

$$\Delta Q = Q - Q_0 \quad \text{Ec. 1.14}$$

Donde

h_f = Caída de presión en la sección de tubería.

K = Resistencia impuesta por la tubería.

n = Potencia característica que depende del método para el cálculo de caída de presión para Darcy-Weisbach es 2 y para Hazen-Williams es de 1.852.

Q = Flujo corregido en cada iteración.

ΔQ = Es el factor de corrección del flujo.

Si ΔQ es relativamente insignificante en comparación con Q_0 , la ecuación 1.13, podría ser descrita como se muestra en la ecuación 1.15.

$$h_f = K(Q_0^n + Q_0^{n-1}\Delta Q) \quad \text{Ec. 1.15}$$

Para una red de distribución como la mostrada en la figura 1.2 se tiene la ecuación 5.16.

$$\sum h_f = \sum KQ^n = \sum KQ |Q|^{n-1}\Delta Q \quad \text{Ec. 1.16}$$

$$= \sum KQ |Q|^{n-1}\Delta Q + \Delta Q \sum knk |Q_0|^{n-1} = 0$$

Donde se asume ΔQ de igual forma para todas las secciones de tubería en la malla. Se denota el valor absoluto para tener en cuenta la dirección de la sumatoria alrededor de la malla dada. Para obtener ΔQ se utiliza la ecuación 1.17.

$$\Delta Q = \frac{\sum KQ_0 |Q_0|^{n-1}}{\sum knk |Q_0|^{n-1}} \quad \text{Ec. 1.17}$$

1.2.2 Método de Newton-Raphson

El método de Newton-Raphson es un método numérico que permite resolver sistemas de ecuaciones matemáticas de manera simultánea. Su principal utilidad, radica en la facilidad que ofrece para resolver ecuaciones diferenciales cuando se conocen valores aproximados de los parámetros desconocidos deseados (Valle, 2018).

El objetivo de este método multivariable es linealizar los sistemas de ecuaciones mediante el uso de series de Taylor, de tal manera que el modelo resultante pueda ser resuelto a través de un determinado método de eliminación como el Gaussiano con sustitución hacia atrás (Valle, 2018).

Suponga que los caudales de un sistema de tuberías están representados mediante la formulación observada en la ecuación 18, el cual no es lineal y sus variables pueden ser aproximadas inicialmente con el sistema de ecuaciones 1.18 y 1.19 (Valle, 2018).

$$\begin{aligned} f_1(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) &= 0 \\ f_2(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) &= 0 \\ f_m(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) &= 0 \end{aligned} \quad \text{Ec. 1.18}$$

$$Q_1 = Q_1^k, Q_2 = Q_2^k, \dots, Q_n = Q_n^k \quad \text{Ec. 1.19}$$

Entonces, al utilizar las series de Taylor se puede obtener una aproximación inicial de los valores de la forma indicada en la ecuación 5.20.

$$\begin{aligned} f_i(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) &= \\ f_i(Q_1^k, Q_2^k, \dots, Q_n^k) \sum_{j=1}^n \frac{\partial f_i}{\partial Q_j} \Big|_{Q_j^k} (Q_j - Q_j^k) &= 0 \end{aligned} \quad \text{Ec. 1.20}$$

Este resultado puede ser representado matricialmente, como se muestra en la ecuación 1.21

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1^k}{\partial Q_1^k} & \frac{\partial f_1^k}{\partial Q_2^k} & \dots & \frac{\partial f_1^k}{\partial Q_n^k} \\ \frac{\partial f_2^k}{\partial Q_1^k} & \frac{\partial f_2^k}{\partial Q_2^k} & \dots & \frac{\partial f_2^k}{\partial Q_n^k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m^k}{\partial Q_1^k} & \frac{\partial f_m^k}{\partial Q_2^k} & \dots & \frac{\partial f_m^k}{\partial Q_n^k} \end{bmatrix}_{m \times n} \begin{bmatrix} Q_1 - Q_1^k \\ Q_2 - Q_2^k \\ \vdots \\ Q_n - Q_n^k \end{bmatrix}_{n \times 1} = - \begin{bmatrix} f_i(Q_1^k, Q_2^k, \dots, Q_n^k) \\ f_i(Q_2^k, Q_2^k, \dots, Q_n^k) \\ \vdots \\ f_i(Q_n^k, Q_2^k, \dots, Q_n^k) \end{bmatrix}_{m \times 1} \quad \text{Ec. 1.21}$$

De tal manera que al reordenar se tiene lo expresado en la ecuación 1.22.

$$\begin{bmatrix} Q_1 - Q_1^k \\ Q_2 - Q_2^k \\ \vdots \\ Q_n - Q_n^k \end{bmatrix}_{n \times 1} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1^k}{\partial Q_1^k} & \frac{\partial f_1^k}{\partial Q_2^k} & \dots & \frac{\partial f_1^k}{\partial Q_n^k} \\ \frac{\partial f_2^k}{\partial Q_1^k} & \frac{\partial f_2^k}{\partial Q_2^k} & \dots & \frac{\partial f_2^k}{\partial Q_n^k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m^k}{\partial Q_1^k} & \frac{\partial f_m^k}{\partial Q_2^k} & \dots & \frac{\partial f_m^k}{\partial Q_n^k} \end{bmatrix}_{m \times n} \begin{bmatrix} f_1(Q_1^k, Q_2^k, \dots, Q_n^k) \\ f_2(Q_1^k, Q_2^k, \dots, Q_n^k) \\ \vdots \\ f_m(Q_1^k, Q_2^k, \dots, Q_n^k) \end{bmatrix}_{m \times 1} \quad \text{Ec. 1.22}$$

En la ecuación 1.23 se pueden observar los valores corregidos para la iteración posterior.

$$\begin{bmatrix} Q_1^{k+1} \\ Q_2^{k+1} \\ \vdots \\ Q_n^{k+1} \end{bmatrix}_{n \times 1} = \begin{bmatrix} Q_1^k \\ Q_2^k \\ \vdots \\ Q_n^k \end{bmatrix}_{n \times 1} + \begin{bmatrix} Q_1 - Q_1^k \\ Q_2 - Q_2^k \\ \vdots \\ Q_n - Q_n^k \end{bmatrix}_{n \times 1} \quad \text{Ec. 1.23}$$

De lo anterior se puede concluir que, a medida que los valores de la matriz $Q_1 - Q_1^k$ tienden a cero, el método logrará alcanzar una convergencia y el proceso iterativo habrá llegado a su fin.

2 METODOLOGÍA

Para el desarrollo del software de simulación hidráulica se procedió con la siguiente metodología.

- 1.- Revisión bibliográfica de redes de distribución hidráulica.
- 2.- Selección del lenguaje de programación para el desarrollo del software.
- 3.- Elaboración de algoritmos para la programación.
- 4.- Programación del software de simulación de redes de distribución de fluidos.
- 5.- Comparación de resultados con software comerciales.

2.1 Revisión bibliográfica de redes de distribución hidráulica

Se revisó la información existente en fuentes bibliográficas como son:

1. Fuentes bibliográficas de fundamentos teóricos de flujos de fluidos, para conocer las leyes físicas que gobiernan la mecánica de fluidos.
2. Artículos técnicos enfocados al desarrollo de software de simulación de redes de distribución hidráulica.
3. Sitios web de desarrolladores de software para verificar los avances en las aplicaciones de simulación de redes de distribución de fluidos.

2.2 Selección del lenguaje de programación para el desarrollo del software

Para el desarrollo de software se seleccionó el lenguaje de programación Java bajo los siguientes criterios:

1. El lenguaje de programación es desarrollado en un entorno integrado libre, por tanto, no se infringen derechos de autor.
2. Contiene gestión de interfaz de usuario.
3. Contiene gestión de almacenamiento (Guardar o cargar algún dato).
4. Permite que el software desarrollado sea multiplataforma (se ejecuta en Linux, Microsoft Windows, entre otros.)

2.3 Algoritmos de programación

En las figuras 2.1 y 2.2 se presentan los algoritmos que sirven de base para la programación del simulador, en las figuras se describen el flujo que siguen las diferentes instrucciones que ejecuta el software para realizar los diferentes cálculos. En la figura 2.1 se muestran las instrucciones generales que sigue el software y las verificaciones que hace antes de iniciar con el cálculo; el bance de materia y energía en la red se realiza mediante a la metodología de Hardy-Cross.

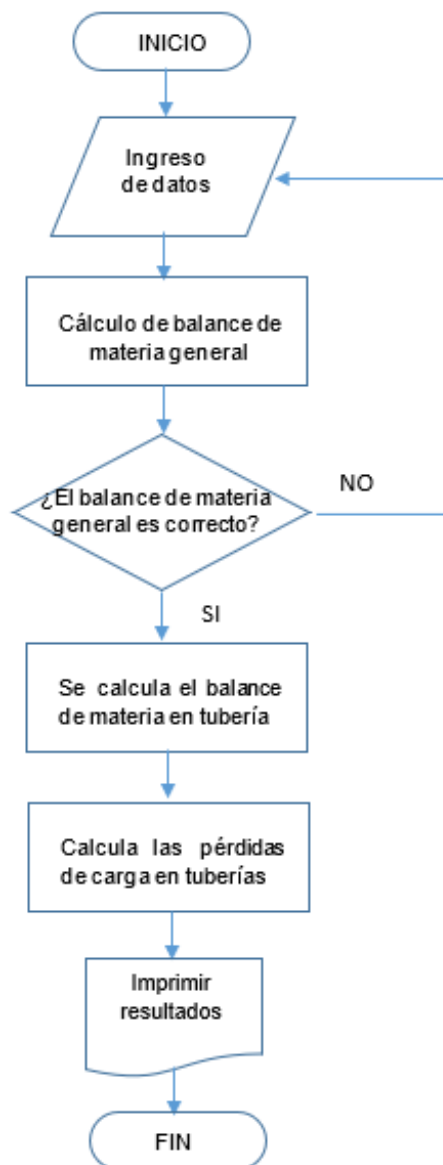


Figura 2.1. Algoritmo general para la programación del software.

En la figura 2.2 se muestra el diagrama de flujo para realizar el cálculo de pérdidas de presión en el interior de tuberías que forman parte de una red mallada mediante la metodología de Hardy-Cross.

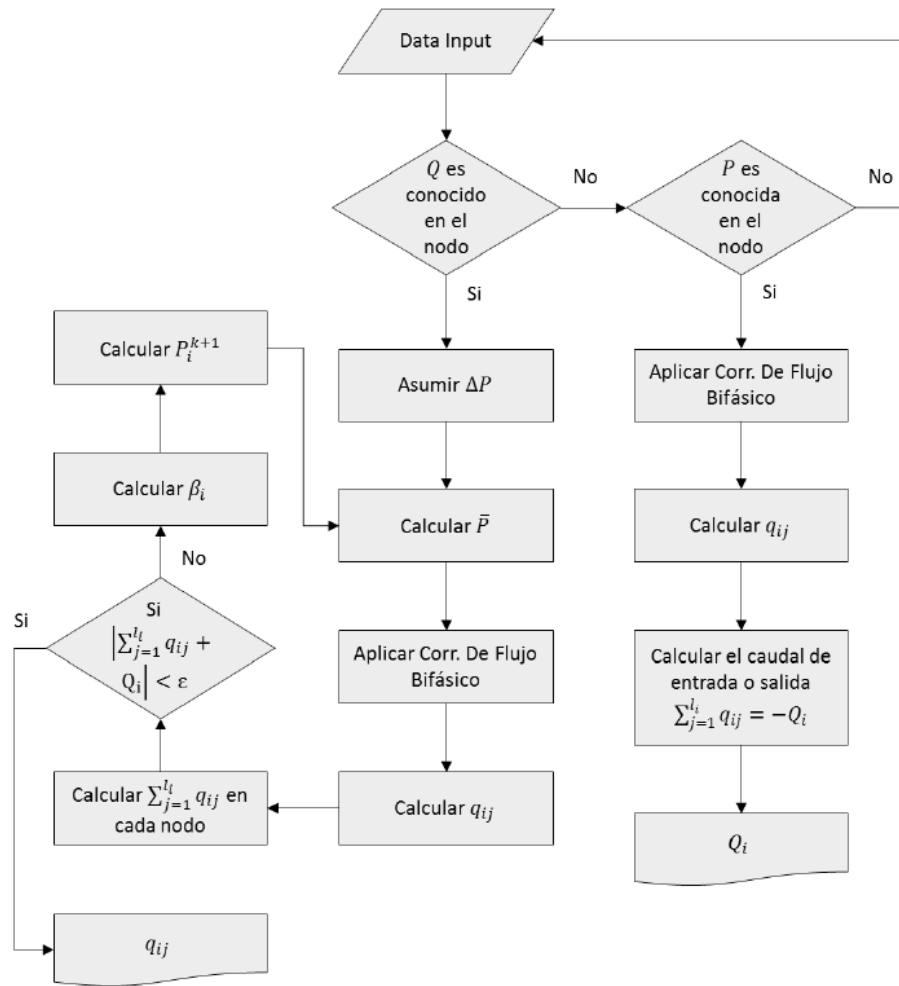


Figura 2.2. Diagrama de flujo para solución de una red de tuberías (Valle, 2018).

2.4 Criterios para la programación del software de simulación de redes de distribución de fluidos.

Para el desarrollo de software se tomaron los siguientes criterios:

1. El método iterativo de solución de la red de distribución es Hardy-Cross, descrito en el capítulo 1.

2. El software se desarrolló para soluciones de redes en estado estacionario.
3. El fluido sigue la ley de Newton de la viscosidad.
4. El fluido es incompresible en todo el trayecto de la tubería.
5. El fluido fluye en una sola fase y no presenta cambios de fase parcial o total en el interior de la tubería.
6. Los tubos se encuentran completamente llenos.
7. No simula el comportamiento de bombas o equipos que cambien la presión mediante trabajo mecánico.
8. Para la solución de la red, siempre se deberá especificar una demanda de flujo o presión y un punto fuente de presión o flujo.
9. Cuando en la demanda se especifiquen como criterio de simulación los flujos de salida, los puntos fuente deben ser seleccionados como presión; por el contrario, si en la demanda se especifica la presión de salida, los puntos fuente deben ser seleccionados como flujo.
10. Las válvulas de regulación se simulan como restricciones, dando una caída de presión fija.
11. No se considera la ganancia o pérdida de energía a través de la superficie del tubo.
12. Los equipos ubicados en una ruta de tuberías se consideran como una restricción al flujo, por tanto; ésta deberá ser especificada por el usuario.
13. El ángulo de cada tubería se considera positivo cuando el nodo con el número mayor se encuentra a una altura superior que el nodo con el número menor.
14. El material de tuberías cargado a la base de datos será acero al carbono de acuerdo con el ASME/ANSI B36.10/19.
15. El software debe proporcionar en los resultados las gráficas de caída de presión con respecto a la distancia en tuberías rectas que no presenten ramificaciones.
16. El software debe tener una subrutina para la simulación CFD de una tubería con régimen laminar.
17. Los resultados deben presentarse al usuario mediante la consola de salida.

2.5 Ecuaciones y método de cálculo

El software internamente trabaja con el sistema inglés, esto es debido a que los trabajos de ingeniería y dimensiones de tuberías y accesorios se encuentran en este sistema, por tanto, las constantes y dimensiones de las ecuaciones que se presentan a continuación están de acuerdo con el sistema inglés de unidades. La ecuación para caída de presión es la de Darcy-Weisbach.

$$\Delta P_{100} = (0.0216 (f * \rho) \left(\frac{Q^2}{d^5}\right)) * 1.2 \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde:

ΔP_{100} = Pérdida de presión en psi por cada 100 pie de tubería

f = Factor de fricción de Fanning adimensional

d = diámetro interno en pulgadas

Q = Flujo volumétrico en galones por minuto

$$Re = 50.6 \frac{Q * \rho}{d\mu} \quad \text{Ec. 2.2}$$

Donde:

Re = Número de Reynolds adimensional

Q = Flujo volumétrico en galones por minuto

d = diámetro interno en pulgadas

$$\text{Rugosidad relativa} = \frac{\varepsilon}{D} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Donde

ε = Rugosidad del material pulgadas

D = Diámetro interno de la tubería en pulgadas

$$f = 8 \left(\frac{8}{Re}\right)^{12} + (A + B)^{-1.5} \frac{1}{12} \quad \text{Ec. 2.4}$$

Donde

$$A = (2.457 * \ln(\frac{1}{(\frac{7}{Re})^{0.9} + 0.27 * \frac{\epsilon}{D}}))^{16} \quad \text{Ec. 6.5}$$

$$B = (\frac{37530}{Re})^{16} \quad \text{Ec. 2.7}$$

Para el cálculo del flujo y caída de presión en la red mallada se utilizó el procedimiento de cálculo de Hardy-Cross mostrado en el capítulo 1.2.1.

La sumatoria de flujos en entrada y salida de nodos debe ser igual a cero, como se muestra en la ecuación 6.8

$$\sum Q = 0 \quad \text{Ec. 2.8}$$

La sumatoria de las caídas de presión en todas las tuberías debe ser igual a cero como se muestra en la ecuación 6.9

$$\sum \Delta P_f = 0 \quad \text{Ec. 2.9}$$

$$\sum P_f = \sum KQ^n = \sum KQ |Q|^{n-1} \Delta Q = 0 \quad \text{Ec. 2.10}$$

La corrección de flujo en cada iteración viene dada por la ecuación 6.11, y el cálculo termina hasta que la diferencia entre la ΔQ de la iteración "n" y la ΔQ de la iteración "n-1" sea menor a 1×10^{-6} .

$$\Delta Q = \frac{\sum KQ_0 |Q_0|^{n-1}}{\sum nk |Q_0|^{n-1}} \quad \text{Ec. 2.11}$$

3 RESULTADOS

El código del software no se puede presentar debido a la confidencialidad con la empresa CIATEQ A.C (Ver anexo).

Se desarrolló la interfaz gráfica para el ingreso y control de datos como se muestra en la figura 3.1.



Figura 3.1. Interfaz gráfica desarrollada para ingreso de datos al software hidráulico.

Se analizó el funcionamiento del software mediante el siguiente problema. Se tiene un flujo de turbosina de 3047.00 gpm que se distribuye en un patín de medición que tiene 3 ramales, como se muestra en la figura 3.2, calcular la presión de salida en la tubería que descarga al cabezal general de distribución. La turbosina se encuentra a una temperatura de 25 °C y tiene una densidad de 51.19 lb/pies³. Las dimensiones del patín de medición tienen una longitud equivalente (incluye sus restricciones) de 15 pies, la tubería de suministro tiene una longitud de 15 pies y la tubería de la demanda una longitud de 8 pies. El fluido se suministra al patín a una presión de 65 psig. El material de tuberías es acero al carbón cédula 40 y el diámetro es de 10”.

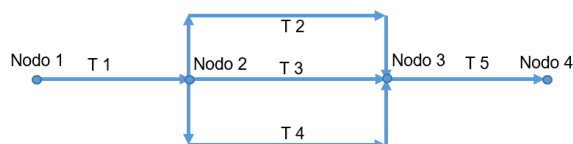


Figura 3.2. Esquema de patín de medición de turbosina.

3.1 Ingreso de datos

3.1.1 Datos de tuberías

La figura 7.3, muestra el simulador hidráulico, donde se puede seleccionar el diámetro nominal de 1/2" hasta 36", dando clic en la pestaña se despliega el menú para seleccionar el diámetro considerado.



Figura 3.3. Selección del diámetro de tuberías.

En la figura 3.4 se observa donde se ingresa el dato de la longitud, y se puede seleccionar en unidades de pies o metros, dependiendo de los datos del usuario, cabe aclarar que el software convierte internamente los datos al sistema inglés.



Figura 3.4. Ingreso de longitud de la tubería.

En la figura 3.5 se muestran los materiales disponibles; sin embargo, el software en su base datos únicamente tiene las características del material de acero al carbono (A.C.), en el apartado que indica rugosidad ingresar los datos de rugosidad para los demás materiales. Además, también se observa que se deben ingresar los datos de los nodos inicial y final de cada tubería, elevación inicial y final para el cálculo de presión estática en cada tubería, el número de malla y el sentido de flujo. El número de malla es determinado por el usuario de acuerdo al sistema, el sentido es positivo si el flujo en la malla tiene un sentido horario y negativo si tiene un sentido antihorario. Una vez capturados todos los campos mostrados en las figuras, se presiona el botón agregar y los campos se vacía para agregar los datos de una nueva tubería.

The image shows a software interface titled "DATOS DE TUBERÍAS". It features several input fields and dropdown menus. The "Material" dropdown menu is open, showing options: "A.C.", "PVC", and "Vidrio". Other fields include "Diámetro", "Longitud" (with a unit dropdown set to "m"), "Nodo inicial", "Nodo final", "Malla", "Sentido", "Rugosidad" (with a unit dropdown set to "pie"), "Altura inicial", and "Altura final". There are three buttons at the bottom: "Agregar", "Editar", and "Eliminar".

Figura 3.5. Selección del material y captura de nodos, altura, malla, sentido y rugosidad.

3.1.2 Ingreso de datos del fluido

En la figura 7.6 se observa la sección para ingresar los datos del fluido, se debe colocar el nombre, este dato se toma como informativo. La densidad del fluido se puede ingresar en kg/m^3 o lb/pie^3 y la viscosidad en cP. El software trabaja en sistema inglés, por lo tanto, internamente convierte los datos ingresados por el usuario a ese sistema.

Figura 3.6. Ingreso de datos de propiedades del fluido.

3.1.3 Ingreso de datos de fuentes y demandas

En la figura 3.7 se muestra la sección para ingresar las demandas y fuentes en el sistema, para las fuentes es necesario ingresar los datos de flujo, presión y nodo, una vez capturados los campos presionar el botón agregar. Para la demanda únicamente se debe agregar el flujo requerido y el nodo, la presión de salida es calculada por el software. Si el balance de materia no coincide con las entras y salidas, el software enviará un mensaje de error como lo muestra la figura 3.8.

Figura 3.7. Ingreso de datos de fuentes y demandas.

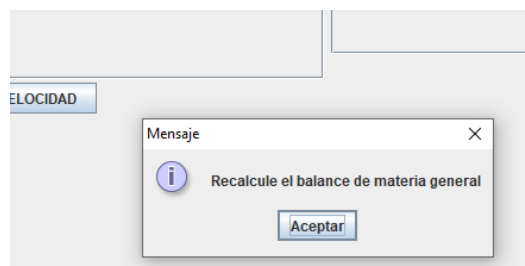


Figura 3.8. Alerta de error en el balance general de materia.

3.2 Visualización de datos cargados

En la figura 3.9 se muestra la pantalla de visualización de los datos, si existiera un error el usuario puede seleccionar los datos que desea editar y corregirlos, posteriormente, presionar el botón editar, para que sean ingresados a la memoria del software, si desea eliminar una tubería de sistema debe seleccionar la fila y presionar el botón eliminar. Para generar los resultados se debe presionar el botón calcular y para generar el perfil de velocidades se presiona el botón generar perfil de velocidades, y éste abrirá la ventana mostrada en la figura 3.10.

The screenshot shows a software interface for hydraulic simulation. It is divided into several sections:

- DATOS DE TUBERÍAS:** Fields for Diámetro (10"), Longitud (15 pies), Material (Selección), Malla, Sentido, and Rugosidad. Includes buttons for 'Agregar', 'Editar', and 'Eliminar'.
- PROPIEDADES DEL FLUIDO:** Fields for Nombre (Turbosina), Densidad (51.19 lb/pe3), and Viscosidad (2 cP). Includes a 'CALCULAR' button.
- FUENTE:** Fields for Flujo (gpm) and Presión (psig). Includes an 'Agregar fuente' button.
- DEMANDA:** Fields for Demanda (gpm) and Nodo. Includes an 'Agregar demanda' button.
- Table:** A table with columns: No., D.N., D.I(Pig), Longitud, Unidad, Material, Inicio, Fin, Alt. Inicial, Alt. Final, Malla, Sentido. It contains 5 rows of data.
- FLUJO DE FUENTES:** A table with columns: Flujo, Unidad, Presión, Unidad, Nodo. It shows a value of 3047 gpm at 65 psig at node 1.
- FLUJO DE DEMANDAS:** A table with columns: Flujo, Unidad, Nodo. It shows a value of 3047 gpm at node 4.
- Buttons:** 'GENERAR PERFIL DE VELOCIDAD' and 'Salir'.

Figura 3.9. Datos cargados a la interfaz del simulador.

El software está limitado a realizar los perfiles de velocidad para flujos laminares, por lo tanto, por tanto, para esta gráfica se tomó un flujo de 15 gpm y de 10 gpm. Las gráficas se muestran en las figuras 3.10 y 3.11.

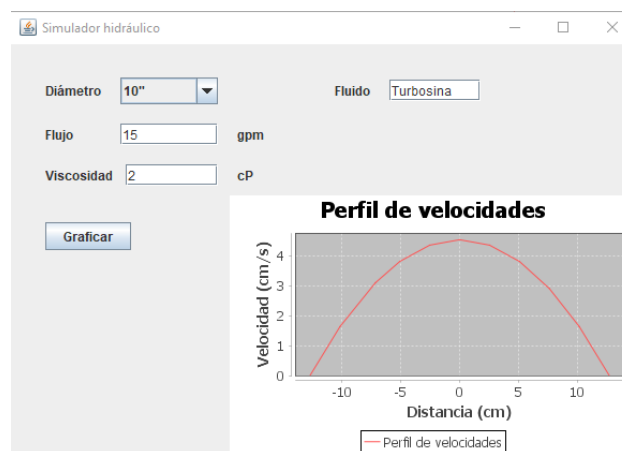


Figura 3.10. Ventana de perfil de velocidades de flujo de 15 gpm en diámetro de 10".

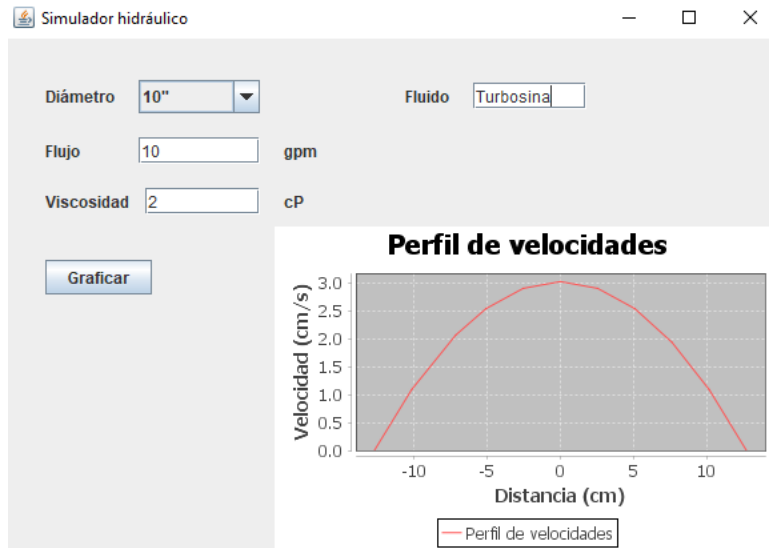


Figura 3.11. Ventana de perfil de velocidades de flujo de 10 gpm en diámetro de 10”.

3.3 Alertas de violación de criterios

Para ayudar al usuario el software tiene cargados los criterios de velocidad y caída de presión mostrados en la tabla 5.2. Cuando un criterio se esté sobre pasando enviará mensajes al usuario para que pueda corregir los diámetros y/o flujos en las demandas. De esta forma se ayudará a que los usuarios con poca experiencia puedan realizar una mejor estimación de diámetros de tuberías y potencia de bombas en redes de distribución de fluidos. En las figuras 3.12 y 3.13 se muestran las imágenes de dos alertas de violación de criterios de velocidad y caída de presión.

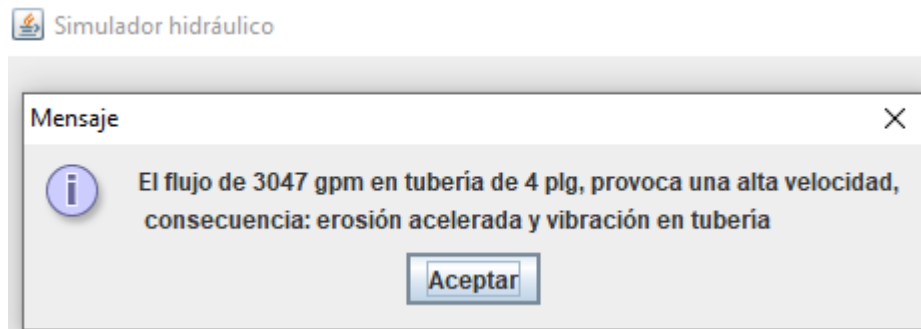


Figura 3.12. Mensaje de alerta por alta velocidad en una tubería.

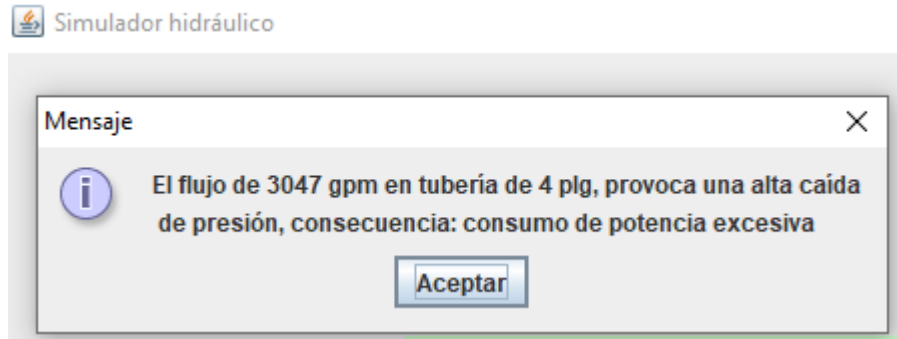


Figura 3.13. Mensaje de alerta por alta caída de presión en una tubería

3.4 Impresión de resultados en el software

En la figura 3.14 se muestran los resultados obtenidos mediante el simulador desarrollado para el cálculo de redes de distribución hidráulicas.

```

Output - SimulHidra (run) x Start Page x SimuHidra.java x Simulador.java x PerfilDeVelocidad.java x PerfilVel.java x
run:
Flujo en Tubería 0 = 3047.0 gpm
Flujo en Tubería 1 = 1015.6666666666666666 gpm
Flujo en Tubería 2 = 1015.6666666666666666 gpm
Flujo en Tubería 3 = 1015.6666666666666666 gpm
Flujo en Tubería 4 = 3047.0 gpm
NuRe en tubería 0 = 393831.4400199601
NuRe en tubería 1 = 131277.14667332004
NuRe en tubería 2 = 131277.14667332004
NuRe en tubería 3 = 131277.14667332004
NuRe en tubería 4 = 393831.4400199601
Rugosidad 0 = 1.7964071856287425E-4
Rugosidad 1 = 1.7964071856287425E-4
Rugosidad 2 = 1.7964071856287425E-4
Rugosidad 3 = 1.7964071856287425E-4
Rugosidad 4 = 1.7964071856287425E-4
Delta P en Tubería 0 = 0.6525310383347855 Psi
Delta P en Tubería 1 = 0.08358267851895486 Psi
Delta P en Tubería 2 = 0.08358267851895486 Psi
Delta P en Tubería 3 = 0.08358267851895486 Psi
Delta P en Tubería 4 = 0.34801655377855223 Psi
Presión de entrada = 65.0 Psi
Presión de salida = 63.915869729367714 Psi

```

Figura 3.14. Resultados obtenidos con el simulador desarrollado.

En la figura 3.15 se muestran los resultados obtenidos mediante el simulador comercial para el cálculo de redes de distribución hidráulicas PipeFlo. En esta figura observamos que los resultados del cálculo de la caída de presión y distribución de flujo son similares a los resultados obtenidos mediante el software desarrollado.

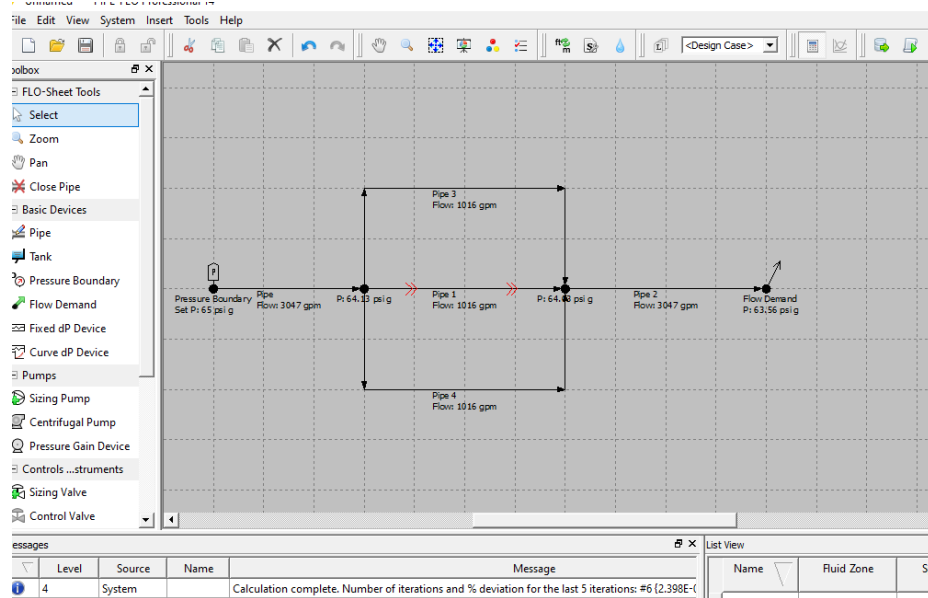


Figura 3.15. Resultados obtenidos con el simulador comercial PipeFlo.

3.4.1 Discusión de resultados de cálculos

Los resultados obtenidos del flujo calculado por el software desarrollado en cada ramal del patín de medición son de 1015.66 gpm, mientras que el calculado por el software comercial PipeFlo es de 1016.00 gpm. El error observado es debido a que el software comercial redondea los decimales a enteros.

Para el cálculo de la caída de presión se observa que el software comercial calcula una presión de salida de 63.56 Psig, mientras que el software desarrollado calcula una presión de salida de 63.92, dando un error de 0.57%.

CONCLUSIONES

El software funciona correctamente, está limitado a fluidos newtonianos y análisis de perfiles de velocidad para regímenes laminares; sin embargo, si se compara con un software comercial se tiene que los resultados son muy similares, teniendo un error del cálculo de 0.5% respecto al software comercial.

Se puede analizar también que respecto a la distribución del flujo en el patín de medición el software comercial marca un flujo de 1016.0 gpm en cada ramal, y el software desarrollado marca un flujo de 1015.66 gpm. Esta diferencia se debe a que el software comercial está realizando un redondeo para mostrar los resultados. Por tanto, ambos softwares dan el mismo resultado.

Trabajo futuro

Este trabajo se limitó a desarrollar el algoritmo para calcular el perfil de velocidad en régimen laminar, el desarrollo de un software para realizar un CFD en flujo turbulento queda como trabajo futuro para la mejora y optimización del software.

Bibliografía

1. ANSYS Inc (2019). FIUIDOS. <https://www.ansys.com/> .
2. COMSOL Inc (2019). Products. Simulate Fluid Flow Applications with the CFD Module. <https://www.comsol.com/>.
3. CONAGUA. (2010). Datos Básicos para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado. En Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (7-19). México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
4. Crane. (1992). Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. México: McGraw-Hill.
5. Dassault Systèmes SolidWorks Corporation, (2019). Soluciones. Simulaciones. <https://www.solidworks.com/es>.
6. DNV.GL (2019). <https://www.dnvgl.com/#>
7. Engineered Software (2019). <https://eng-software.com/>.
8. EPCON International (2019). <http://www.epcon.com/sinet.html>.
9. Ludwig, E. (1997). Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants: Volume 2 (3rd Edition). Elsevier: Gulf Professional Publishing.
10. Valle-Tamayo, G.; Valbuena-Luna, L.; Rojas-Beltrán, C. & Cabarcas-Simancas, M.. (2018). Modelo numérico para el análisis y el diseño de redes de tubería para flujo bifásico. Revista UIS Ingenierías, 17 (2), 2-35.
11. Ramesh, H.; Santhosh, C. & Jagadeesh J. (2012). Simulation of Hydraulic Parameters in Water Distribution Network Using EPANET and GIS . International Conference on Ecological, Environmental and Biological Sciences , 7-8, 350-353.
12. Sanvicente Sánchez, H. & Frausto Solís J. (2003). Optimización de los diámetros de las tuberías de una red de distribución de agua mediante algoritmos de recocido simulado. Tecnología y Ciencias del Agua, 18 (1), 105-118.
13. Giustolisi, O.; Kapelan, Z and Savic, D. (2015). A Hydraulic Simulation Model for Pipe Networks with Leakage Out-flows and Pressure-Driven Demand. ResearchGate, 1, 1-15.

14. Byron Bird, R.; Stewart, W. & Lightfoot, W. (2006). Fenómenos de Transporte.
México: Reverté, S.A.

Anexo

Carta de propiedad intelectual de CIATEQ A.C.



VILLAHERMOSA TABASCO, A 8 DE FEBRERO DEL 2021

M.A. ANGEL FRANCISCO VELAZCO MUÑOZ
DIRECTOR DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE VILLAHERMOSA
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

El que suscribe C. M.I. Carlos B. Castañeda Castañeda, Director de Ingeniería de Plantas del CIATEQ A.C, tiene a bien informar que el estudiante C. Ing. Ramiro Armengolt Núñez con número de control **M18301349** del Instituto Tecnológico de Villahermosa realizó su estancia de acuerdo con los registros en la carta de presentación.

Durante su estadía en nuestra institución desarrolló un software para simulación hidráulica, que sirve como base para su Tesis de Maestría en Ingeniería titulada "**Software para simulación de redes de distribución hidráulica con aplicación en análisis CFD por secciones**", por tanto, notifico que el desarrollo es satisfactorio para nuestro Centro y será utilizado para la operación de la Dirección que represento; y por motivos de registro de derechos se encuentra restringida la difusión del código fuente.

Se extiende la presente, enviando un cordial saludo.

Atentamente,


M.I. Carlos B. Castañeda Castañeda,
Director de Ingeniería de Plantas

Calle 23 de agosto No. 253, Col. Jesús Carrón, CP 90040, Villahermosa, Tabasco, México.
+52 (991) 780 45 43 | www.ciateq.mx

