GRUPO BLR

FUNDAMENTOS Y APLICACIONES DEL TRANSPORTE DE FLUIDOS Y CALOR: UN ENFOQUE DESDE LA INGENIERÍA QUÍMICA

ISBN: 978-9907-802-30-6

Wilson Patricio León Cueva
Cristina Vanessa Fernández Vélez

2026

FUNDAMENTOS Y APLICACIONES DEL TRANSPORTE DE FLUIDOS Y CALOR: UN ENFOQUE DESDE LA INGENIERÍA QUÍMICA

Wilson Patricio León Cueva

Cristina Vanessa Fernández Vélez

AUTORES

UTMACH

Este libro ha sido debidamente examinado y valorado en la modalidad doble par ciego con fin de garantizar la calidad científica.

©Grupo Editorial BLR
Universidad Técnica de Machala
Riobamba – Ecuador
Correo: publicaciones@grupoblr.com
https://grupoblr.com/libros-investigo
REPOSITORIO



W, León., Fernández, C. (2026) Fundamentos y Aplicaciones del Transporte de Fluidos y Calor:Un Enfoque desde la Ingeniería Química. Grupo Editorial BLR.

© Wilson Patricio León Cueva
Cristina Vanessa Fernández Vélez

Fundamentos y aplicaciones del transporte de fluidos y calor:
Un enfoque desde la ingeniería química.

ISBN: 978-9907-802-30-6

El copyright promueve la libertad de expresión, protege la diversidad de ideas y conocimiento, además apoya la libre expresión. Se prohíbe de manera rigurosa la producción o el almacenamiento de esta publicación, ya sea en su totalidad o en parte, está estrictamente prohibido por ley, incluyendo el diseño de la portada, así como su difusión a través de cualquiera de sus medios, ya sean electrónicos, mecánicos, ópticos, de grabación o incluso de fotocopia, sin permiso de los propietarios de los derechos de autor.

Filiación de autores

Wilson Patricio León Cueva

Universidad Técnica de Machala

Correo Electrónico: wleon@utmachala.edu.ec

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5474-430X

Cristina Vanessa Fernández

Universidad Técnica de Machala

Correo Electrónico: cvfernandez@utmachala.edu.ec

ORCID: https://orcid.org/0000-0003-1256-405X

RESUMEN

El libro fundamentos y aplicaciones del transporte de fluidos constituye una obra formativa diseñada para estudiantes, docentes y profesionales de Ingeniería Química y disciplinas afines. A lo largo de cuatro capítulos, se desarrollan de manera secuencial y aplicada los principios fundamentales que gobiernan el comportamiento de los Fluidos dentro de las operaciones unitarias.

El primer capítulo presenta los conceptos básicos de mecánica de fluidos, tipos de flujo, ecuaciones de conservación, número de Reynolds, ecuación de Bernoulli y pérdidas en fricción, con ejercicios resueltos que contribuyen a fortalecer el aprendizaje. El segundo capítulo explica la manometría y los diferentes instrumentos utilizados para la medición de la presión. El tercer capítulo trata sobre el estudio de los caudalímetros su clasificación, características operativas y aplicaciones industriales. Finalmente, el capítulo cuarto se ocupa del estudio de las bombas, describiendo su clasificación, características operativas, parámetros de diseño, curvas características y aplicaciones industriales.

La obra incorpora un banco de preguntas por capítulo, ejemplos numéricos desarrollados y diagramas técnicos que facilitan la comprensión conceptual y el desarrollo de competencias ingenieriles. Este libro se presenta como un recurso académico sólido para el estudio, la docencia y la práctica profesional en ingeniería de procesos.

El libro está diseñado para acompañar al estudiante desde los principios básicos del comportamiento de los fluidos hasta el análisis de medidores

de flujo, manometría y bombas. El objetivo final es proporcionar un recurso completo que facilite el aprendizaje progresivo, fortaleciendo competencias ingenieriles necesarias en el entorno industrial contemporáneo.

ÍNDICE

RESUMEN ..... **i**
ÍNDICE DE TABLAS ..... **viii**
ÍNDICE DE FIGURAS ..... **ix**
INTRODUCCIÓN ..... **xiii**
CAPÍTULO I **15**
1 FUNDAMENTOS DEL TRANSPORTE DE FLUIDOS **15**
1.1 Flujo de fluidos 16
1.1.1 Aspectos generales sobre la mecánica de fluidos 16
1.2 Concepto de Fluido 17
1.3 Tipos de Flujo 18
1.3.1 Flujo Laminar 18
1.3.2 Flujo Turbulento 18
1.3.3 Flujo Permanente o Estacionario 18
1.3.4 Flujo Uniforme 19
1.3.5 Flujo Ideal 19
1.3.6 Flujo Incompresible 20
1.3.7 Flujo Newtoniano 20
1.3.8 Flujo No Newtoniano 21
1.4 Principio de Conservación de Masa, Ley de la Continuidad 21
1.4.1 Ejercicio 1.1: 24
1.4.2 Ejercicio 1.2: 25
1.4.3 Ejercicio 1.3: 27
1.4.4 Ejercicio 1.4: 29
1.5 Ley de conservación de la energía 30
1.5.1 Teorema de Bernoulli para Fluidos Incompresibles 30
1.6 Energía Potencial 32

1.7 Energía Cinética 33
1.8 Energía de Presión, (Energía de Flujo) 34
1.9 Energía Mecánica y Energía Térmica 35
1.10 Ecuación de Bernoulli 36
1.11 Interpretación de la Ecuación de Bernoulli 37
1.11.1 Ejercicio 1.5: 37
1.11.2 Ejercicio 1.6: 39
1.11.3 Ejercicio 1.7: 41
1.11.4 Ejercicio 1.8: 43
1.12 Aplicaciones de la ley de Energía, Sifón 44
1.12.1 Ejercicio 1.9: 44
1.13 Teorema de Torricelli 48
1.13.1 Ejercicio 1.10: 49
1.13.2 Ejercicio 1.11: 52
1.14 Flujo en Descenso 55
1.14.1 Ejercicio 1.12: 57
1.15 Número de Reynolds 57
1.15.1 Ejercicio 1.13: 60
1.15.2 Ejercicio 1.14: 62
1.15.3 Ejercicio 1.15: 63
1.15.4 Ejercicio 3.16: 64
1.15.5 Ejercicio 1.17: 66
1.15.6 Ejercicio 1.18: 67
1.15.7 Ejercicio 1.19: 68
1.16 Factor de corrección de energía cinética para flujo turbulento .. 71
1.16.1 Ejercicio 1.20: 71
1.17 Pérdidas por Fricción 74

1.17.1 Ejemplo 1.21: 76
1.17.2 Ejemplo 1.22: 79
1.18 Factor de Fricción 81
1.19 Diagrama de Moody 83
1.20 Rugosidad relativa 87
1.21 Caída de Presión en el Flujo Laminar 88
1.22 Obtención de la Ecuación de Poiseuille 89
1.23 Ecuación de Poiseuille 92
1.24 Pérdidas Menores 96
1.24.1 Ejercicio 1.23: 97
1.24.2 Ejercicio 1.24: 98
1.24.3 Ejercicio 1.25: 101
1.24.4 Ejercicio 1.26: 103
1.25 Método de Kármán 105
1.25.1 Ejemplo 1.27: 108
1.25.2 Ejercicio 1.28: 110
1.26 BANCO DE PREGUNTAS 114
Parte II: Ejercicios Aplicados 117
CAPÍTULO II **119**
2 MANOMETRÍA Y MEDICIÓN DE PRESIÓN **119**
2.1 Manometría 120
2.2 Tipos de Manómetros 120
2.2.1 Tubo Piezométrico 121
2.2.2 Tubo en U Abierto 122
2.2.3 Manómetro Diferencial 123
2.2.4 Tubo en U de dos fluidos 124
2.2.5 Manómetros mecánicos 124

2.2.6 Ejercicio 2.1: 124
2.2.7 Ejercicio 2.2: 126
2.2.8 Ejercicio 2.3: 127
2.2.9 Ejercicio 2.4: 128
2.2.10 Ejercicio 2.5: 129
2.2.11 Ejercicio 2.6: 130
2.2.12 Ejercicio 2.7: 132
2.2.13 Ejercicio 2.8: 133
2.2.14 Ejercicio 2.9: 134
2.2.15 Ejercicio 2.10: 135
2.2.16 Ejercicio 2.11: 136
2.2.17 Ejercicio 2.12: 138
2.2.18 Ejercicio 2.13: 139
2.3 BANCO DE PREGUNTAS 141
CAPÍTULO III **147**
3 MEDIDORES DE FLUJO **147**
3.1 Medidores de Flujo 147
3.2 Tubo de Pitot 148
3.3. Tubo Venturi 150
3.4. Placa de Orificio 154
3.5. Boquilla de Flujo 156
3.6. Rotámetros 157
3.6.1 Ejercicio 3.1: 160
3.6.2 Ejemplo 3.2: 161
3.7. BANCO DE PREGUNTAS 163
CAPÍTULO IV 168
4 BOMBAS 168

4.1 Bombas 169
4.1.1 Clasificación de las bombas 169
4.1.2 Características de las Bombas 170
4.2 Expresiones para la energía de una bomba 171
4.2.1 Potencia y Eficiencia 172
4.2.2 Eficiencia 173
4.3 Bombas Centrífugas 174
4.3.1 Altura 174
4.3.2 Altura total dinámica de descarga (TDH) 175
4.3.3 Velocidad Específica 175
4.3.4 Curvas Características de las bombas 177
4.3.5 Altura Neta Positiva de Succión (NPSH) 178
4.3.6 Ejercicio 4.1: 181
4.3.7 Ejercicio 4.2: 188
4.3.8 Ejercicio 4.3 191
4.3.9 Ejercicio 4.4: 194
4.3.10 Ejercicio 4.5: 196
4.3.11 Ejercicio 4.6: 197
4.3.12 Ejercicio 4.7: 199
4.3.13 Ejercicio 4.8: 201
4.4 BANCO DE PREGUNTAS 202
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 207

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. De Masa Ley de la Continuidad. 22
Tabla 2. Solución ejercicio 1.10 49
Tabla 3. Número de Reynolds. 59
Tabla 4. rugosidad promedio de algunos materiales. 96
Tabla 5. Dimensiones de cañerías de acero. 106
Tabla 6. Cálculo de la longitud equivalente. 113
Tabla 7. Tipos de Manómetros. 121
Tabla 8. Potencia del líquido entregado por la bomba. 173

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de conducto cerrado depende del principio de continuidad.....22
Figura 2. Flujo estacionario e incompresible. 26
Figura 3. Sección cuadrada de un sistema de distribución de aire. 28
Figura 4. Diámetro interno. 29
Figura 5. Teorema de Bernoulli para Fluidos Incompresibles.....31
Figura 6. Corriente de agua está fluyendo por un tubo de 3 pulg de diámetro.....37
Figura 7. Tubo de 2 cm de diámetro. 39
Figura 8. Tubería de 2 in de diámetro. 41
Figura 9. Tubería de 2 de diámetro. 43
Figura 10. Agua de una alberca. 44
Figura 11. Flujo en un tanque. 48
Figura 12. Flujo que sale por la boquilla.....49
Figura 13. Relación entre la velocidad de salida y el caudal con la carga (h).....51
Figura 14. Chorro vertical. 51
Figura 15. Bomba con carga de presión. 52
Figura 16. Energía suplida por la bomba.....53
Figura 17. Energía suplida por la bomba se convierte en energía potencial.....54
Figura 18. Tiempo requerido para vaciar un tanque.....55
Figura 19. Número de Reynolds. 58
Figura 20. Flujo de agua. 60
Figura 21. Intervalo de velocidad promedio del flujo. 62

Figura 22. Aceite comestible. 63
Figura 23. Tubo de 1 pulg. 64
Figura 24. Agua que fluye por una cañería de 6 pulg. 66
Figura 25. Régimen de flujo y la viscosidad cinemática. 67
Figura 26. Tubo de cobre. 69
Figura 27. Tubería de diámetro interno de 52.2 mm. 71
Figura 28. Plano de referencia..... 76
Figura 29. Esquema de la figura de bombeo. 79
Figura 30. Diagrama de Coeficiente de Fricción Vs Número de Reynolds y Rugosidad Relativa. 82
Figura 31. Diagrama de Moody. 83
Figura 32. Diagrama de Moody. 86
Figura 33. Rugosidad relativa. 87
Figura 34. Obtención de la Ecuación de Poiseuille. 89
Figura 35. Elemento de área de un tubo conductor. 92
Figura 36. Factor f de fricción. 97
Figura 37. Ejercicio usando el diagrama moody 98
Figura 38. Flujo volumétrico de 110 L/min..... 99
Figura 39. Tubería de acero inoxidable horizontal. 101
Figura 40. Ejercicio 1.25 con el diagrama de Moody. 103
Figura 41. Viscosidad de un fluido..... 104
Figura 42. Flujo de gas natural metano..... 109
Figura 43. Tanque de gran diámetro. 111
Figura 44. Tubo Piezométrico. 121
Figura 45. Tubo en U Abierto..... 122
Figura 46. Manómetro Diferencial..... 123
Figura 47. Tubo en U de dos fluidos. 124

Figura 48. Presión del aire en un tanque. **125**
Figura 49. Ejercicio de presión. **126**
Figura 50. Presión en el punto B. **127**
Figura 51. Altura h. **129**
Figura 52. Altura equivalente en m de agua. **130**
Figura 53. PA en el interior del tubo. **131**
Figura 54. Manómetro diferencial. **132**
Figura 55. PA - PB **133**
Figura 56. Manómetro en U **134**
Figura 57. Diagrama para encontrar PA – PB. **135**
Figura 58. Flujo de una tubería. **137**
Figura 59. Tubo que contiene mercurio. **138**
Figura 60. Ejercicio aplicado en altura con masa **140**
Figura 61. Tubo de Pitot. **149**
Figura 62. Tubo Venturi. **151**
Figura 63. Placa de orificio. **155**
Figura 64. Boquilla de flujo. **156**
Figura 65. Rotámetro. **158**
Figura 66. Diámetro del cuello de un venturimetro. **160**
Figura 67. Gasómetro de tubo de Pitot. **162**
Figura 68. Presión del tanque abierto **176**
Figura 69. Curvas características de las bombas. **177**
Figura 70. Velocidades determinadas y pruebas en laboratorio. **178**
Figura 71. Cañería de descarga. **182**
Figura 72. Caída de presión. **189**
Figura 73. Bombeado desde un evaporador. **191**
Figura 74. Sistema de agua. **195**

Figura 75. Presión para 100ft de gasolina. 196
Figura 76. Diagrama para encontrar NPSHD. 198
Figura 77. Potencia de bomba. 199
Figura 78. Potencia necesaria para elevar 2000 L de leche. 201

INTRODUCCIÓN

El estudio del transporte de fluidos constituye uno de los pilares fundamentales dentro de las operaciones unitarias de la Ingeniería Química. La comprensión de cómo se comportan los fluidos al fluir a través de tuberías, equipos y sistemas, permite diseñar, optimizar y operar procesos industriales con eficiencia, seguridad y sostenibilidad.

Este libro surge como respuesta a la necesidad de disponer de un material didáctico actualizado, claro y práctico que facilite el proceso de enseñanza–aprendizaje en asignaturas relacionadas con flujo de fluidos, medición de caudales y bombas. A lo largo de esta obra, el lector encontrará explicaciones conceptuales fundamentadas en la física y la ingeniería, acompañadas de ejercicios resueltos, diagramas técnicos, tablas, ecuaciones y problemas aplicados al sector industrial.

El contenido se organiza en cuatro capítulos fundamentales, el primero de ellos trata sobre los fundamentos de la mecánica de fluidos, donde se estudian las leyes de conservación, el número de Reynolds, las pérdidas por fricción; el segundo capítulo aborda los diferentes tipos de manómetros que se utilizan para medir la presión; el tercer capítulo trata sobre el estudio de los caudalímetros y por último el cuarto capítulo se dedica a estudiar las bombas, muy utilizadas en los sistemas de transporte, distribución de fluidos y sus aplicaciones industriales..

La presente obra busca no solo transmitir conocimientos teóricos, sino también fortalecer la capacidad analítica y resolutiva del estudiante, mediante un enfoque práctico y aplicado a situaciones reales de

ingeniería. Así, este libro se convierte en una herramienta valiosa tanto para la formación académica como para el ejercicio profesional.

CAPÍTULO I

1 FUNDAMENTOS DEL TRANSPORTE DE FLUIDOS

La primera unidad introduce los principios esenciales que gobiernan el comportamiento de los fluidos en reposo y en movimiento. Aquí se abordan conceptos como propiedades de los fluidos, tipos de flujo, número de Reynolds, ecuaciones de conservación y pérdidas por fricción. Esta base teórica permite comprender cómo se comportan los fluidos dentro de tuberías y equipos, lo cual es fundamental para cualquier operación unitaria en ingeniería química.

Objetivo general

Comprender los fundamentos físicos y matemáticos que explican el comportamiento del flujo en sistemas hidráulicos.

Objetivos específicos

1. Identificar las propiedades físicas de los fluidos y su influencia en el flujo.
2. Diferenciar entre flujo laminar, transitorio y turbulento mediante el número de Reynolds.
3. Aplicar las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía.
4. Analizar la ecuación de Bernoulli y sus usos en sistemas reales.
5. Calcular pérdidas por fricción en tuberías rectas y accesorios.

1.1 Flujo de fluidos

1.1.1 Aspectos generales sobre la mecánica de fluidos

Los fluidos de interés industrial presentan propiedades físicas y un comportamiento mecánico que determina su respuesta durante su almacenamiento, transporte y procesamiento. Algunas sustancias se mueven con facilidad, mientras que otras presentan mayor dificultad para fluir, lo cual se debe a diversas propiedades como la viscosidad, la densidad y la reología. Para estudiar este comportamiento, es necesario medir propiedades y variables como presión, velocidad y caudal, y aplicar los principios de la hidrostática y la hidrodinámica. Estos fundamentos permiten el análisis y diseño de sistemas de transporte de fluidos, empleados en los más diversos procesos de la industria química. (Cheng & Zhang, 2021)

El estudio del flujo de fluidos es fundamental en la ingeniería, la física y muchas aplicaciones industriales y biológicas. Tradicionalmente, se ha basado en la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes mediante métodos numéricos, pero los avances recientes en inteligencia artificial y computación han revolucionado el campo, permitiendo simulaciones más rápidas y precisas. (Kochkov et al., 2021)

El transporte de fluidos es importante en muchas Operaciones Unitarias ya que manejar líquidos es mucho más sencillo, más barato y menos engorroso que transportar sólidos. Se denomina Mecánica de los fluidos a la ciencia que estudia el equilibrio y el movimiento de los fluidos, así como la acción recíproca de las fuerzas que actúan sobre el fluido. (Fukami et al., 2020)

Todos los fenómenos se estudian de modo experimental y los resultados se presentan en forma de fórmulas empíricas, por consiguiente, la Mecánica de Fluidos es una ciencia semiempírica. Muchos alimentos se presentan como líquidos en algún punto de su desarrollo, así los jugos, desde leche, yogurt. Es importante que el Ingeniero en Alimentos, conozca los principios básicos de la Mecánica de los Fluidos, la forma en que un fluido fluye a través de un sistema dado depende de la velocidad, densidad y forma de la tubería. Los problemas de flujo de fluidos se resuelven mediante la aplicación de los principios de conservación de materia y energía. (Raissi et al., 2020)

1.2 Concepto de Fluido

Los fluidos son sustancias que bajo la acción de un esfuerzo cortante, se deforman continuamente mientras el esfuerzo sea mantenido, sin importar que tan pequeño sea. Esta posibilidad de fluir indefinidamente es una de las principales características que distingue a los fluidos de los sólidos. Los fluidos son esencialmente líquidos y gases. Los líquidos, al hallarse en reposo tienen un volumen prácticamente definido y forman una superficie libre, mientras que los gases se expanden hasta llenar de volumen el recipiente en que se encuentran. En muchas aplicaciones de ingeniería, los líquidos se pueden considerar aproximadamente incompresibles cuando las variaciones de densidad son despreciables; sin embargo, la compresibilidad de los gases es a menudo más significativa. (Kochkov et al., 2021)

Se concluye que la propiedad obvia de los fluidos es la de fluir y cambiar de forma, como resultado de su incapacidad para resistir esfuerzos cortantes. (Morimoto et al., 2022)

1.3 Tipos de Flujo

1.3.1 Flujo Laminar

Es aquel en el que no existen entrelazamientos de las líneas de flujo ni en las trayectorias de las partículas del fluido, las capas del fluido se deslizan suavemente una sobre otra de manera ordenada a lo largo de dimensiones paralelas. (Sreenivasan, 2025)

1.3.2 Flujo Turbulento

El flujo turbulento es aquel en que las partículas del fluido presentan un movimiento irregular, desordenado y fluctuante, con continuos cambios en la magnitud y dirección de la velocidad. En este tipo de flujo se forman remolinos o vórtices de distintos tamaños que producen una intensa mezcla entre las diversas capas del fluido. (Sreenivasan, 2025)

1.3.3 Flujo Permanente o Estacionario

Cuando en el fluido las condiciones de presión, densidad, temperatura no cambian con el tiempo;

$$\frac{dp}{dt} = o. \frac{dp}{dt} = o, \frac{dt}{dt}$$

Es decir la misma cantidad de peso de fluido pasa por una misma sesión en la unidad de tiempo siendo la descarga es constante.

1.3.4 Flujo Uniforme

Se dice que un flujo es uniforme cuando las propiedades del movimiento del fluido, principalmente la velocidad, son constantes de un punto a otro en la dirección considerada. En un flujo perfectamente uniforme, todas las partículas de fluido se desplazan con la misma velocidad en todos los puntos considerados. En su mayor parte, esta situación es una idealización, puesto que en fluidos reales la viscosidad y la interacción con las paredes de los conductos producen variaciones de velocidad. (Taira & Nair, 2022)

1.3.5 Flujo Ideal

El flujo ideal es una representación teórica del movimiento de un fluido en la cual se adoptan ciertas simplificaciones con el fin de facilitar el análisis matemático de los sistemas de flujo. Los fluidos reales tienen viscosidad y pérdidas de energía, pero el modelo de flujo ideal es una buena forma de entender los principios básicos de la mecánica de fluidos. Tiene las siguientes características:

a) Es un flujo no viscoso se considera que la viscosidad del fluido es nula o despreciable ($\mu=0$). Por lo tanto, no existen esfuerzos cortantes asociados con la fricción interna entre las diferentes capas del fluido ni pérdidas de energía mecánica debidas a efectos viscosos.

b) Es un flujo estacionario, la descarga es constante donde las propiedades del fluido en un punto determinado, como la velocidad, presión, densidad y temperatura, permanecen constantes con respecto al tiempo. En consecuencia, bajo condiciones de flujo estacionario, el caudal o descarga se mantiene constante

1.3.6 Flujo Incompresible

Se dice que un flujo es incompresible cuando la densidad del fluido se mantiene constante o varía de forma despreciable en el movimiento de este, sin importar los cambios de presión que puedan ocurrir en el sistema. Esta circunstancia es típica de la mayoría de los líquidos, ya que necesitan de grandes variaciones de presión para que se produzcan cambios apreciables en su densidad, el volumen que ocupa una determinada masa de fluido prácticamente no varía. circunstancia es típica de la mayoría de los líquidos, ya que necesitan de grandes variaciones de presión parase producirán cambios apreciables en su densidad.

1.3.7 Flujo Newtoniano

Son aquellos que tienen una relación lineal entre el esfuerzo cortante aplicado y la velocidad de formación resultante, permaneciendo constante la viscosidad, y están reguladas por la ley de Newton $\tau = u\left(\frac{dv}{dy}\right)$ gráficamente estos flujos presentan una línea recta que pasa por el origen, el agua y los gases se consideran flujos newtonianos. (Fukami et al., 2020)

1.3.8 Flujo No Newtoniano

Estos flujos son complejos, presentan una mayor viscosidad y no se ajustan a la ley de Newton gráficamente presentan una serie de curvas, el esfuerzo cortante es nulo así como su viscosidad. (Fukami et al., 2020)

1.4 Principio de Conservación de Masa, Ley de la Continuidad

El estudio de los fluidos en movimientos es muy importante en el área de los alimentos los problemas de flujo de fluidos se resuelven mediante la aplicación de los principios de conservación de masa y energía. El flujo se mide por su gasto o calidad, la ecuación de la continuidad es una expresión analítica del principio general de la conservación de la masa, es decir la cantidad de fluido que pasa a través de una sección transversal dada, por unidad de tiempo. (Kochkov et al., 2021)

La cantidad de flujo que fluye en un sistema por unidad de tiempo se puede expresar mediante tres términos.

Q.; como la rapidez de flujo de volumen de flujo que fluye por una sección por unidad de tiempo.

W.; la rapidez de flujo de peso de fluido que fluye por una sección por unidad de tiempo.

M.; la rapidez de flujo de masa de fluido que fluye por una sección por unidad de tiempo.

En el siguiente cuadro se expresa las unidades correspondientes:

Tabla 1. De Masa Ley de la Continuidad.

Símbolo	**Nombre**	**Definición**	**Unidades SI**	**Unidades Sistema Británico**
Q	Rapidez de Flujo de Volumen	Q = A v	$\frac{m^3}{seg}$	$\frac{pie^3}{seg}$
W	Rapidez de flujo de Peso	$W = \gamma\ Q$ $W = \gamma\ \ v\ A$	$\frac{Kg}{seg}$	$\frac{Lb}{seg}$
M	Rapidez de flujo de masa	$M = \rho\ Q$ $M = \rho\ v\ A$	$\frac{Kg}{seg}$	$\frac{Slug}{seg}$

A = área de sección v = velocidad promedio $\gamma = peso\ espesifico\ \ \rho = densidad$

El método para calcular la velocidad de flujo de un fluido en un sistema de conducto cerrado depende del principio de continuidad.

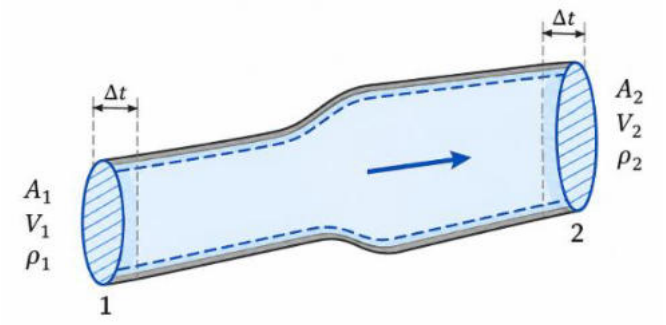


Figura 1. Sistema de conducto cerrado depende del principio de continuidad.

Aplicando un balance de materia entre 1 y 2, la cantidad de líquido que entra por uno y sale por la sección 2. El fluido fluye de la sección 1 a la sección 2 con una rapidez constante (flujo uniforme), la masa del flujo que pasa por la sección 2 en un tiempo dado debe ser la misma que la que fluye por la sección 1 en el mismo tiempo, si el fluido es incompresible sus pesos específicos y densidades son iguales:

Volumen del flujo que entra en la sección 1, $A_1 \ . \ v_1 \ , \ \Delta t$

Volumen de flujo que sale en la sección 2, $A_2 \ v_2 \ \Delta t$

Masa que entra en la sección (1) $\rho_1 A_1 \ v_1 \ \Delta t$ masa que sale en sección (2) $\rho_2 \ A_2 \ V_2 \ \Delta t$, (unidades de masa):

$$\rho_1 A_1 v_1 \Delta t = \rho_2 A_2 v_2 \Delta t$$

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = const \qquad \left(\frac{m^3}{seg}\right)$$

$$Q_1 = Q_2$$

Conocido como ecuación de la continuidad para flujo permanente si son masa de dos tramos.

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = 0$$

Donde Q es el flujo volumétrico expresado en $\frac{m^3}{seg}$, $\frac{ft^3}{seg}$

Si el líquido circula por una cañería circular., el área será

$$A = \frac{\pi}{4} D^2$$

$$\frac{\pi}{4} D_1^2 v_1 = \frac{\pi}{4} D_2^2 \ v_2$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2$$

Las velocidades son inversamente proporcionales al cuadrado de los diámetros.

La velocidad Másica se puede obtener de:

$$A_1\ v_1\ \rho_1 = A_2\ v_2\ \rho_2$$

$$A_1\ v_1\ \frac{m_1}{V_1} = A_2\ v_2\ \frac{m_2}{V_2} \qquad \rho = \frac{Masa}{Volumen}$$

$$A_1\ \frac{v_1}{V_1} = A_2\ \frac{v_2}{V_2} \qquad m_1 = m_2$$

$$\frac{Q_1}{V_1} = \frac{Q_2}{V_2} = W$$

$$W = \frac{Q}{V}$$

$$donde$$

$$W = Flujo\ \ M\grave{a}sico$$

$$\boldsymbol{Q = W\ V}$$

1.4.1 Ejercicio 1.1:

Una manguera de diámetro interno de 10 cm se utiliza para llenar un recipiente con 20 L de jugo de naranja en 1 minuto. Suponiendo flujo estacionario e incompresible, determine la velocidad media con la que el jugo sale de la manguera?

$$D = 10\ \text{cm} = 0{,}10\ \text{m}$$

$$V = 20\ \text{L} = 0{,}020\ \text{m}^3$$

$$t = 1\ \text{min} = 60\ \text{s}$$

$$v = ?$$



El caudal volumétrico se obtiene a partir del volumen llenado por unidad de tiempo:

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{0{,}020\ \text{m}^3}{60\ \text{s}} = 3{,}333 \times 10^{-4}\ \text{m}^3/\text{s}$$

El área transversal de la manguera es:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi(0{,}10\ \text{m})^2}{4} = 7{,}854 \times 10^{-3}\ \text{m}^2$$

Aplicando la relación entre caudal y velocidad media, Q = Av:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{3{,}333 \times 10^{-4}\ \text{m}^3/\text{s}}{7{,}854 \times 10^{-3}\ \text{m}^2} = 4{,}244 \times 10^{-2}\ \text{m/s}$$

$$v = 0{,}0424\ \text{m/s} = 4{,}24\ \text{cm/s}$$

1.4.2 Ejercicio 1.2:

A través de una tubería de 2 in de diámetro interno fluye leche integral hacia una centrífuga con una velocidad promedio de 40 cm/s. La leche integral tiene una gravedad específica de 1.035. En la centrífuga, la leche se separa en dos corrientes: crema, con gravedad específica de 1.01, y

leche desnatada, con gravedad específica de 1.04. Ambas corrientes se descargan mediante tuberías de (3/4) in de diámetro interno. Considerando flujo estacionario e incompresible, determine las velocidades de descarga de la crema y de la leche desnatada.

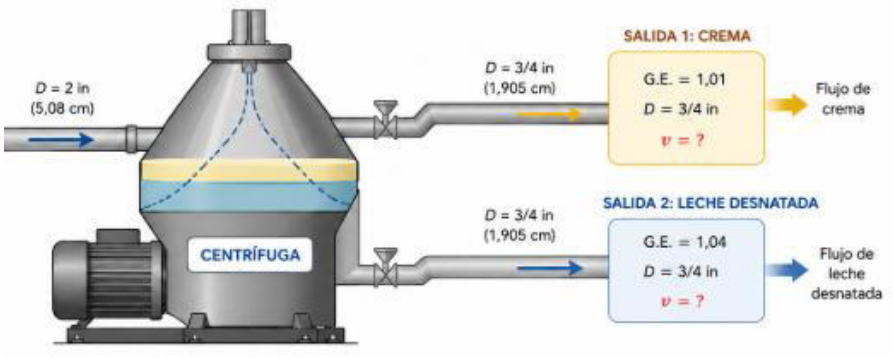


Figura 2. Flujo estacionario e incompresible.

$$\gamma_1 A_1 v_1 = \gamma_2 A_2 v_2 = \gamma_3 A_3 v_3 \qquad Ecuacion\ 1$$

$$A_1 = \frac{\pi}{4}\left(2in\ \times\ \frac{2.54}{in}cm\right)^2$$

$$A_1 = 20cm^2$$

$$A_2 = A_3 = \frac{\pi}{4}\left(\frac{3}{4}\ \times\ 2.54\right)^2 = 2.82cm^2$$

$$\gamma_1 = 1.035 \times \gamma_{H2O}$$

$$\gamma_2 = 1.04\ \times \gamma_{H2O}$$

$$\gamma_3 = 1.01\ \times \gamma_{H2O}$$

$$despejo \quad v_2 = \frac{\gamma_1 A_1 v_1 - \gamma_3 A_3 v_3}{\gamma_2 A_2} \qquad \gamma = cons\ tan\ t\ e$$

$$v_2 = \frac{(A_1 v_1 - A_3 v_3)}{A_2} \ldots (2) \qquad sustituyendo\ en\ 1$$

$$\gamma_1 A_1 v_1 = \gamma_2 A_2 \frac{(A_1 v_1 - A_3 v_3)}{A_2} + \gamma_3 A_3 v_3$$

$$\gamma_1 A_1 v_1 = \gamma_2 A_1 v_1 - \gamma_2 A_3 v_3 (\gamma_3 - \gamma_2) \ \ldots \ (3)$$

$$\gamma_1\ A_1\ v_1\ =\gamma_2\ A_2\ v_1\ -\ \ \gamma_2\ A_3\ v_3\ +\ \ \gamma_3\ A_3\ v_3$$

sustituyendo valores

$$A_1\ v_1\ (\ \gamma_1\ -\ \gamma_2\ )\ \ =\ \ A_3\ v_3\ (\gamma_3\ -\ \gamma_2\ )$$

$$20\ \times\ 40(1.035 - 1.04) = 2.82 v_3 (1.01 - 1.04)$$

$$-4 = -0.0842 v_3$$

$$v_3 = 47.5\, {}^{cm}/_{S} \quad velocidad\ de\ crema$$

$$sustituyendo\ en\ (1)$$

$$v_2 = \frac{(20 \times 40) - (2.82 \times 47.5)}{2.82}$$

$$= 235 \frac{cm}{seg} \quad velocidad\ de\ la\ leche$$

1.4.3 Ejercicio 1.3:

En una sección cuadrada de un sistema de distribución de aire el conducto tiene un lado de 12 pulg y el aire a 14.7 Lb/pulg^2 y 100 ºF tiene una velocidad promedio de 1200 pie/min, en otra sección del mismo sistema el conducto es redondo y tiene un diámetro de 18 pulg y su velocidad de 900 pie/min. Calcular la densidad del aire en la sección redonda y la rapidez de flujo de peso del aire en Lb/hr a 14.7 Lb/pulg^2 abs y 100 ºF, la densidad del aire es 2.2 x10^{-3} slug/pie^3 y su peso específico de 7.09 x10^{-2} Lb/pie^3.



Figura 3. Sección cuadrada de un sistema de distribución de aire.

Solución:

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2$$

$$\rho_2 = \frac{\rho_1 A_1 v_1}{A_1 v_2}$$

$$A_1 = 12 \times 12 = 144\, pulg^2$$

$$A_2 = (\pi/4)(18)^2 = 245\, pulg^2$$

$$\rho_2 = 2.2 \times 10^3 \left(\frac{slug}{pie^3}\right)\left(\frac{144\, pulg^2}{254\, pulg^2}\right)\left(\frac{1200\frac{pie}{min}}{900\frac{pie}{min}}\right)$$

$$\rho_2 = 1.66 \times 10^{-3}\ \frac{slug}{pie^3}$$

$$W = \gamma_1 A_1 v_1$$

$$W = 7.09 \times 10^{-2} \left(\frac{lb}{pie^3}\right)(144\, pulg^2)\left(\frac{pie^2}{144\, pulg^2}\right)\left(1200\frac{pie}{min}\right)\left(60\frac{min}{hr}\right)$$

$$W = 5104.8\, lb/hr$$

1.4.4 Ejercicio 1.4:

El diámetro interno es de 50 mm en la sección 1 y en la sección (2) 100 mm, fluye agua a 70 ºC con una velocidad promedio de $8\frac{m}{seg}$ en la sección (1). Calcular:

$a)\ v_2$

$b)\ Flujo\ volumètrico$

$c)\ Flujo\ de\ peso$

$d)\ Flujo\ de\ masa$

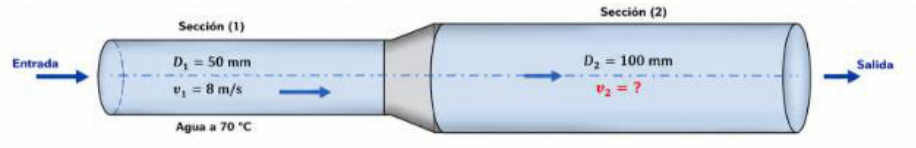


Figura 4. Diámetro interno.

$$a)\ A_1 v_1 = A_2 v_2$$

$$v_2 = \frac{A_1}{A_2} v_1 = \frac{\frac{\pi}{4}(50)^2}{\frac{\pi}{4}(100)^2} \frac{(mm)^2}{(mm)^2} \times 80\frac{m}{seg}$$

$$v_2 = 2.0\frac{m}{seg}$$

$$b)\ Q = vA = v_1 A_1 = 8\frac{m}{seg} \times \frac{\pi}{4}(50mm)^2 \times \frac{m^2}{(10^3 mm)^2}$$

$$Q = 0.0157 \frac{m^3}{seg}$$

$$c)\ W = 8Q \quad a \quad 70ºC \qquad \gamma_{H2O} = 9.59k \frac{N}{m^3}$$

$$W = 9.59k \frac{N}{m^3} \times 0.0157 \frac{m^3}{seg} \qquad \rho_{h2O} = 987 \frac{Kg}{m^3}$$

$$W = 0.151k \frac{N}{seg}$$

$$d)\ M = \rho Q$$

$$M = 987 \frac{kg}{m^3} \times 0.0157 \frac{m^3}{seg}$$

$$M = 15.36 \frac{kg}{seg}:$$

1.5 Ley de conservación de la energía

1.5.1 Teorema de Bernoulli para Fluidos Incompresibles

En el análisis de la figura, se toma en cuenta toda la energía del sistema.

El enunciado de la ley de conservación de Energía dice “La Energía no puede ser creada ni destruida, solo puede ser transformadas de un tipo a otro”. (Sreenivasan, 2025)

En la figura vemos a considerar los cambios de Energía total que experimenta la unidad del fluido al pasar de la sección 1 a la sección 2.

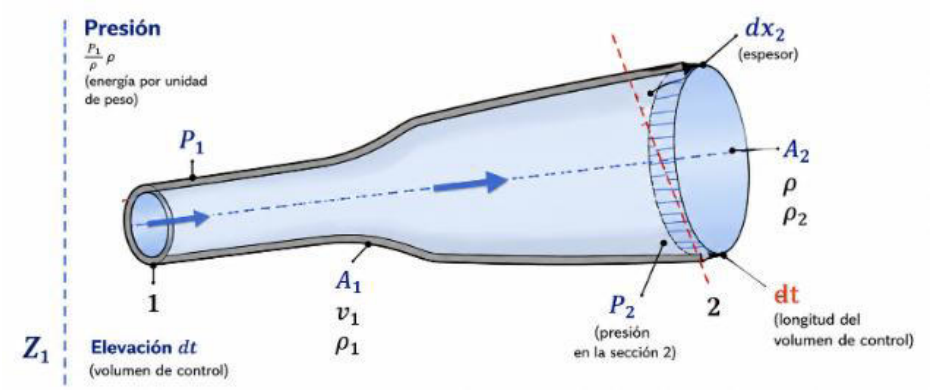


Figura 5. Teorema de Bernoulli para Fluidos Incompresibles.

1 Cambios de Energía Intrínseca del fluido

a. Energía Potencial
b. Energía Cinética
c. Energía de Presión

2 Intercambios de Energía con el entorno.

a. Pérdida de Energía con el entorno por fricción.
b. Energía Mecánica añadida al sistema por una bomba.
c. Energía térmica proveniente de calentar o en fusionar al fluido.

Para nuestro estudio vamos a asumir las condiciones de flujo ideal:

El flujo es incompresible

El flujo es estacionario

El flujo es uniforme

La masa del fluido bajo consideración se desplaza a una distancia dx1 en la sección 1 y dx_2 en un tiempo dt.

La expresión está expresada en $\frac{Lbf}{ft^2}$, (Pa), la velocidad $\frac{Ft}{se}\left(\frac{m}{seg}\right)$.

L altura en Ft o (m), aplicando el principio de conservación de la energía en un diagrama y sabiendo que la energía es la capacidad para hacer trabajo, como el peso del fluido es el mismo sea aplicando una libra fuerza de fluido, es decir por unidad de peso. (Treybal, 1988)

$$Energia\ total\ en\ 1 = E.Potencial + E.Cinetica + E.de\ Presion$$

$$Energia\ total\ en\ 2 = E.Potencial + E.Cinetica + E.de\ Presion$$

$$Energia\ Ganada\ 1\ y\ 2 = E.sup\,lida\ por\ la\ bomba$$

$$Energia\ Perdida\ 1-2\ =\ E.perdida\ por\ friccion.$$

1.6 Energía Potencial

Es la energía de posición con respecto a un plano de referencia Z = 0, para elevar un peso de un fluido a una altura determinada, hay que hacer un trabajo con la fuerza de gravedad.(Ocon & Tojo, 1980)

$$W = \gamma A dx \qquad peso\ del\ fluido$$

$$W = \frac{Lbf}{ft^2} \times ft^2 \times ft$$

$$W = Lbf$$

$$\phi\left(\frac{Lbf}{ft^3}\right) \times A_1(ft^2)Z_1(ft)dx_1(ft) = \gamma A_1 Z_1 dx_1 \qquad Lbf - ft$$

$$por\ unidad\ de\ peso\ de\ fluido$$

$$EP. \quad \frac{\gamma A_1 Z_1 dx_z}{\gamma A dx_1} = Z_1 \ (ft)$$

En el punto (2) será Z_2.

La energía Potencial también está por EP = mgh

1.7 Energía Cinética

Cuando el fluido está en movimiento va a realizar un trabajo para volver al estado de reposo, es la energía de traslación del sistema (McCABE & SMITH, 1973)

$Trabajo = Fuerza \times Dis\,tan\,c\,ia.$

$$F = \frac{m\ a}{gc} \qquad v^2 = 2ax \quad , \quad x = espacio \ \ desplazado$$

$$x = \frac{v^2}{2a} \qquad , \quad v = velocidad\ del\ fluido$$

$$Energia\ Cinetica = Trabajo = F\ x = \frac{ma}{gc} \times \frac{v^2}{2a} = \frac{1}{2}\ \frac{mv^2}{gc}$$

$$EK = \frac{kv^2}{2g} \quad , \quad \frac{Lbf}{\left(\frac{ft}{seg^2}\right)}\left(\frac{ft}{seg}\right)_2^2 = \qquad ft - Lbm$$

$$Aplicando\ Integrales$$

$$T_{1-2} \ = \int_1^2 Fdx \ \ = \int_1^2 ma\ dx = \int_{v_1}^{v_2} \frac{m}{gc}\ \frac{dv}{dt} \times \ vdt$$

$$dx = vdt$$

$$T_{1-2} = \int_{v=0}^{v} \frac{m}{gc} v dv = \frac{m}{gc}\left(\frac{v^2}{2}\right)_0^v$$

$$T_{1-2} = Ec = \frac{m}{2gc}\ v^2$$

La energia cinetica por unidad de peso de fluido

$$Ec = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\ \frac{w}{g}\ \times\ v^2 = \frac{1}{2}\ \frac{A_1\gamma\ dx}{g}\ v^2$$

$$Ec = \frac{\frac{1}{2}\ \frac{A_1\gamma\ dx}{g} v^2}{A_1\gamma\ dx} = \frac{1}{2}\ \frac{v_1^2}{g} \qquad \frac{ft^2/seg^2}{ft/seg^2} = ft$$

$$En\ el\ punro\ 2 \quad Ec = \frac{1}{2}\ \frac{v_2^2}{g}$$

1.8 Energía de Presión, (Energía de Flujo)

Representa la cantidad de trabajo necesario para mover el elemento de fluido a través de una sección.

$$Ep = P \times V \quad , \quad P = presion$$
$$V = Ads \quad , \quad V = volumen$$
$$En\ el\ punto\ 1\ sera:$$
$$P_1\left(\frac{Lbf}{ft^2}\right)\ \times\ A_1(ft^2)\ \times\ dx\ (ft) = P_1A_1ds_1 \quad ft - Lbf$$

La energia de presion por unidad de peso

$$Ef = \frac{P_1 A_1 dx_1}{\gamma\ A_1 dx} = \frac{P_1}{\gamma} \quad ft$$

Energía Pérdida entre 1 y 2 al moverse un fluido a través de un tubo pasando por los accesorios encuentran una resistencia debida a la fricción con las paredes, que se ha de vencer gastando energía, esta energía sale del fluido por lo que las pérdidas por fricción constituyen una disminución de las reservas de energía del fluido, se representa por **hf** y se llama carga de fricción y está dado en ft de fluido. (Kochkov et al., 2021)

1.9 Energía Mecánica y Energía Térmica

Es la suministrada por una bomba y está dado por Lb de fluido cuando se añade o se extrae calor del sistema y es necesario incluir un balance de calor. Por consiguiente el balance de energía queda:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 + hp - hf = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2$$

Llamando a esta ecuación de Bernoulli, si no hay Energía Mecánica ni pérdidas por fricción, tendremos:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2$$

La ecuación de Bernoulli indica que la suma del trabajo de la Presión, Energía Cinética y Potencial permanece constante a lo largo de la línea de corriente. La identidad de esta ecuación se manifiesta cuando puede aplicarse toda la sección de flujo de un conducto y no limita a una línea de corriente dada.

1.10 Ecuación de Bernoulli

$\frac{P_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2gc} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2gc} + Z_2 \; \rho_1 = \rho_2$

$$P_1 + \frac{\rho \; v_1^2}{2gc} + \rho \; Z_1 = P_2 + \rho \frac{v_2^2}{2gc} + \rho Z_2$$

$$Pz = Pr\,e\,sion \;\; de \;\; altura$$

$$\frac{\rho \; v^2}{2gc} = Pr\,e\,sion \;\; de \;\; velocidad$$

$$P = Presion$$

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 + hp - hf = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2$$

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2gc} + Z_1 \, {}^{g}/_{gc} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2gc} + Z_2 \, {}^{g}/_{gc}$$

$$La \;\; ecuacion \;\; de \;\; Bernoulli \;\; en \;\; forma \;\; diferencial$$

$$vdv + \frac{dp}{\rho} + gdz = 0$$

$$\rho = cons\,tan\,t\,e \quad v = 0 \quad , \; integrando$$

$$\int_0^v vdv + \int_0^p \frac{dp}{p} + \int_0^z gdz = 0$$

$$\frac{v^2}{2} + \frac{P}{\rho} + gz = cons\,tan\,t\,e$$

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho \; g} + Z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho \; g} + Z_2$$

$$Siendo:$$

$$Z = C\,arg\,a \;\; de \;\; energia \;\; Potencial$$

$$\frac{v^2}{2g} = C\,arg\,a\;\;de\;velocidad$$

$$\frac{P}{\rho\;g} = C\,arg\,a\;\;Pizometrica\;en\;virtud\;de\;la\;presion$$

1.11 Interpretación de la Ecuación de Bernoulli

Cada término de la ecuación de Bernoulli es el resultado de dividir una expresión de energía entre el peso de un elemento de fluido y tiene unidades de longitud m o ft y se observa $A_1 < A_2\;por\;consiguiente,\;v_2 < v_1, y\;\;P_2 > P_1$, es necesario que ambas presiones sean absolutas o manométricas pero es conveniente utilizar presiones manométricas pues parte del sistema del fluido expuestos a la atmósfera tendrá un valor de Presión cero. Como el peso específico es el mismo es válida únicamente para fluidos incompresibles. (Morimoto et al., 2022)

1.11.1 Ejercicio 1.5:

Una corriente de agua está fluyendo por un tubo de 3 pulg de diámetro con una velocidad de $500\,\frac{Lt}{min}$, bajo una presión de $1000\,\frac{Kg}{cm^2}$. Calcular la nueva presión si el diámetro se reduce a 2 pulg.

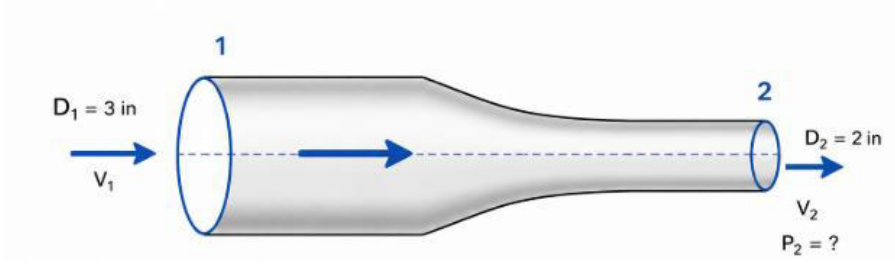


Figura 6. Corriente de agua está fluyendo por un tubo de 3 pulg de diámetro.

Solución:

$$Q = 500\frac{Lt}{min}\frac{1000cm^3}{Lt}\frac{min}{60seg} = 8333\frac{cm^3}{seg}$$

$$A_1 = \frac{\pi}{4}\left(3\,pulg \times \frac{2.54cm}{pulg}\right)^2 = 45.6cm^2$$

$$A_2 = \frac{\pi}{4}\left(2\,pulg \times \frac{2.54cm}{pulg}\right)^2 = 20.2cm^2$$

$$Velocidad\ en\ (1)$$

$$Q = v_1 A_1$$

$$v_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{8333\ {cm^3}/{seg}}{45.6cm^2} = 182.7\frac{cm}{seg}$$

$$Velocidad\ en\ (2)$$

$$v_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{8333}{20.2} = 412.52\frac{cm}{seg}$$

$Aplicando\ Bernoullientre\ \ 1\ y\ 2$:

$$\frac{P_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2gc} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 \qquad \rho_1 = \rho_2 = \rho$$

$$P_2 = P_1 + \frac{\rho}{2gc}(v_1^2 - v_2^2)$$

$$\rho = \frac{1gr}{cm^3} \times \frac{Kg}{10^3 gr} = 10^{-3}\frac{Kg}{cm^3}$$

$$P_2 = 1000\frac{Kg}{cm^2} + \frac{10^{-3}\,Kg/cm^3}{2 \times 9.81\frac{cm}{seg^2}}(182.7^2 - 412.52^2)\frac{cm^2}{seg^2}P_2$$

$$= 1000\frac{Kg}{cm^2} + \frac{10^{-3}}{2 \times 9.81}(3374.29 - 170172.75)\frac{Kg}{cm^2}$$

$$P_2 = 1000 + \frac{10^{-3}}{2 \times 9.81}(-136793.46)$$

$$P_2 = 1000 - 0.0672$$

$$P_2 = 999.93\frac{Kg}{cm^2}$$

1.11.2 Ejercicio 1.6:

Por un tubo de 2 cm de diámetro está circulando aceite de oliva de peso específico 0.92. Calcular la velocidad de flujo si el tubo se estrecha a 1.2 cm de diámetro con una diferencia de presión de 8 cm^2 de agua.

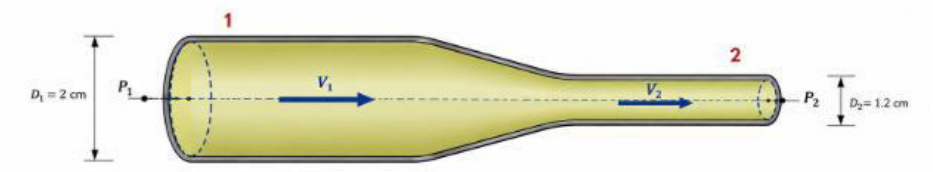


Figura 7. Tubo de 2 cm de diámetro.

Desarrollo original (sustituido por la solución técnica corregida anterior):

$$ge = 0.92$$

$$\rho_{sus} = 0.92 \times \rho\ agua \qquad \Delta P = 8cm\ H2O \times 0.92\frac{gr}{cm^3} = 7.36\frac{gr}{cm^2}$$

$$\rho_{sus} = 0.92 \times 1\frac{gr}{cm^3} = 0.92\frac{gr}{cm^3}$$

$$v_1 A_1 = v_2 A_2$$

$$v_1 \frac{\pi}{4} {D_1}^2 = v_2 \frac{\pi}{4} D_2^2$$

$$\left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 = \frac{v_2}{v_1}$$

$$\left(\frac{2}{1.2}\right)^2 = \frac{v_2}{v_1} 2.77 = \frac{v_2}{v_1}$$

$$v_2 = 2.77 \times v_1$$

Aplicando la Ecuación de energía entre 1 y 2

$$Z_1 + \frac{v_1^2}{2gc} + \frac{P_1}{\rho} = Z_2 + \frac{v_2^2}{2gc} + \frac{P_2}{\rho} \qquad \rho_1 = \rho_2$$

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{P_2}{\rho} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2gc}$$

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho} = \frac{v_1^2 (2.77)^2 - v_1^2}{2gc}$$

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho} = \frac{v_1^2}{2gc}(2.77^2 - 1)$$

$$v_1^2 = 2gc\frac{(P_1 - P_2)}{\rho} \times \frac{1}{(7.76 - 1)}$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{2gc}{6.67}\frac{(P_1 - P_2)}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \times 980\, {}^{cm}/_{seg^2}}{6.67} \times \frac{7.36\, {}^{gr}/_{cm^2}}{0.92\, {}^{gr}/_{cm^3}}}$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{2 \times 980}{6.67} \times \frac{7.36}{0.92}\frac{cm}{seg^2}} = \sqrt{2350.82}\,\frac{cm}{seg}$$

$$v_1 = 48.5\,\frac{cm}{seg}\, remplazando\ tenemos$$

$$v_2 = 487.5\,\frac{cm}{seg} \times\ 2.97 = 134.3\,{}^{cm}/_{seg}$$

1.11.3 Ejercicio 1.7:

En una tubería de 2 in de diámetro fluye un jugo de fruta de una densidad relativa 1.032 a razón de 100 Lts/min y una presión de 0.7 Kg/cm^2, si la tubería se reduce a 1.5 in ¿Cuál será la nueva presión, no existen pérdidas por fricción?

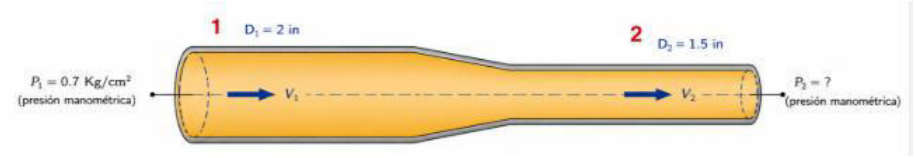


Figura 8. Tubería de 2 in de diámetro.

$$Q = 100\,\frac{Lts}{min_2}$$

$$P_1 = 0.7\,\frac{Kg}{cm^2} \qquad A_2 = \frac{\pi}{4}\left(1.5 \times \frac{2.5}{100}\right)^2 = 0.0011m^2$$

$$A_1 = \frac{\pi}{4}\left(2\,pulg \times \frac{2.54cm}{pulg} \times \frac{m}{100cm}\right) = 0.0019cm^2$$

$Solucion$:

$$\rho jugo = \rho_R + \rho H_2O = 1.032 \times 1000\,\frac{Kg}{m^3} = 1032\,\frac{Kg}{m^3}$$

$$G = Q\rho = 100\frac{Lts}{min\frac{Kg}{m^3}\frac{min}{60seg\frac{m^2}{Lft\times 10^3}\frac{Kg}{seg}}}$$

$$Bernoulli\ entre\ 1\ y\ 2$$

$$\frac{P_1}{\rho}+\frac{v_1^2}{2gc}+Z_1+hp-hf=\frac{P_2}{\rho}+\frac{v_2^2}{2gc}+Z_2$$

$$\frac{P_2}{\rho}=\frac{P_1}{\rho}+\frac{v_1^2}{2gc}-\frac{v_2^2}{2gc}$$

$$G=A_1\rho_1 v_1=A_2\rho_2 v_2$$

$$v_2=\frac{G}{A_1\rho_1}=\frac{1.72\,{}^{Kg}/_{se}}{0.0011m^2\times 1032\,{}^{Kg}/_{m^3}}=0.87\frac{m}{seg}$$

$$v_2=\frac{G}{A_2\rho_2}=\frac{1.72}{0.0011\times 1032}=1.51\frac{m}{seg}$$

$$\frac{P_1}{\rho}=\frac{0.7\,{}^{kg}/_{cm^2}}{1032\,{}^{Kg}/_{m^3}}\times\ \frac{10^4cm^2}{m^2}=6.7m$$

$$\frac{v_1^2}{2gc}=\frac{(0.87)^2\,{}^{m^2}/_{se^2}}{2\times 9.8\,{}^{m}/_{se^2}}=0.038m$$

$$\frac{v_2^2}{2gc}=\frac{(1.51)^2}{2\times 9.8}=0.11m$$

$$\frac{\rho_2}{\rho}=6.7+0.038-0.11=6.6\ m$$

$$P_2 = 6.6M \times \rho = 6.6M \times 1032\frac{Kg}{m^3}$$

$$= 6840\frac{Kg}{m^2} 6840\frac{Kg}{m^2} \times \frac{m}{10^4 cm^2} = 0.68\frac{Kg}{m^2}$$

$$P_2 = 0.68\frac{Kg}{m^2}$$

1.11.4 Ejercicio 1.8:

A través de una tubería de 2 de diámetro fluye leche con un gasto de 150 L/min. Determinar se energía cinética, si su densidad es $\rho = 999\,{}^{Kg}/_{m^3}$.

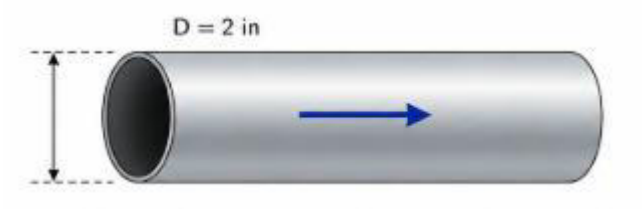


Figura 9. Tubería de 2 de diámetro.

$$Ec = \frac{1}{2} m\, v^2$$

$$A = \left(\frac{\pi}{4}\right)\left(2\,pulg \times \frac{ft}{12\,in}\right)^2$$

$$A = 0.021\,ft^2 \times \left(\frac{1m^2}{(3.27\,ft)^2}\right) = 0.002\,m^2$$

$$Q = 150\frac{L}{\min} \times \frac{1\,min}{60\,seg} \times \frac{1\,m^3}{1000\,L} = 0.0025\frac{m^3}{seg}$$

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{0.0025}{0.002} = 1.25\frac{m}{seg}$$

$$\dot{m} = Q\,\rho = 0.0025\frac{m^3}{seg} \times 999\frac{kg}{m^3} = 2.49\frac{kg}{seg}$$

$$E_c = \frac{1}{2} \times 2.49\ \frac{kg}{seg} \times \left(1.25\ \frac{m}{seg}\right)^2 = 1.95\ \frac{kg}{s}\left(\frac{m}{seg}\right)^2$$

$$E_c = 1.95\ \frac{kg}{seg}\left(\frac{m}{seg}\right)^2$$

$$E_c = 1.95\ W$$

1.12 Aplicaciones de la ley de Energía, Sifón

1.12.1 Ejercicio 1.9:

En la figura se extrae agua de una alberca, si no hay pérdida en el sistema de energía. Calcular el caudal (Flujo volumétrico) a través del Sifón y la presión de los puntos B, C, D, E.

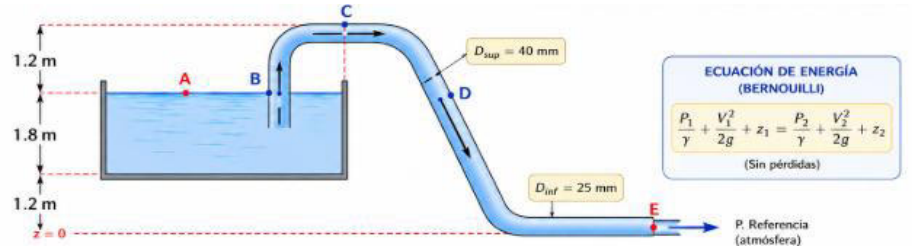


Figura 10. Agua de una alberca.

Solucion:

Bernoulli entre A y F

$PA = 0 \qquad P_F = 0$

$$v_A = 0 \qquad Z_F = 3 \quad m\ debajo\ de\ A$$

$$\frac{PA}{\gamma} + Z_A + \frac{{v_A}^2}{2g} = \frac{Pf}{\gamma} + Z_F + \frac{{v_F}^2}{2g}$$

$${v_F}^2 = 2g\ (zA)$$

$$v_F = \sqrt{2g\ ZA} = \sqrt{2 \times 9.81 \times 3}ç = 7.76\frac{m}{seg}$$

Flujo Volumetrico

$$Q\ =\ v_F\ A_F$$

$$Q = 7.76\frac{m}{seg}\ \times\ \frac{\pi}{4}\left(25mm\ \times\ \frac{1m}{10^3 mm}\right) = 3.77 \times 10^{-3}\frac{m^3}{seg}$$

$$Q = 3.77 \times 10^{-3}\frac{m^3}{seg}$$

$$Pr\,e\,sion\ en\ B \qquad Bernoulli\ entre\ A\ y\ B$$

$$\frac{PA}{\gamma} + Z_A + \frac{{v_A}^2}{2g} = \frac{P_B}{\gamma} + Z_B + \frac{{v_B}^2}{2g}$$

$$\frac{P_B}{\gamma} = Z_A - Z_B - \frac{{v_B}^2}{2g}$$

$$v_B = \frac{Q}{A_B}$$

$$A_B = \frac{\pi}{4}\left(40mm \times \frac{m}{10^3 mm}\right)^2$$

$$A_B = \frac{\pi}{4}\left(\frac{1600}{100}\right) = 4\pi \times 10^{-4} m^2$$

$$A_B = 12.56 \times 10^{-4} m^2$$

$$v_B = \frac{3.77 \times 10^{-3}}{12.56 \times 10^{-4}} \frac{m}{seg} = 3\frac{m}{seg}$$

$$Pr\,e\,sion\ en\ B$$

$$P_B = \gamma\ \left(Z_A - Z_B - \frac{{v_A}^2}{2g}\right)$$

$$P_B = 9.81K\frac{N}{m^3}\left(0 \quad -\frac{9\frac{m}{se^2}}{2 \times 9.81\frac{m}{se^2}}\right)$$

$$P_B = 9.81K\frac{N}{m^3}(-0.45m)$$

$$P_B = -\ 0.45K\frac{N}{m^2} \qquad P_B = -0.45Kpascal$$

El signo negativo nos indica que la presión en B está por debajo de la presión Atmosférica.

$$Pr\,e\,sion\ en\ C \qquad Bernoulli\ entre\ A\ y\ C$$

$$\frac{P_A}{\gamma} + Z_A + \frac{{v_A}^2}{2g} = \frac{P_C}{\gamma} + Z_C + \frac{{v_C}^2}{2g}$$

$$P_C = \gamma\left(-Z_C - \frac{{v_C}^2}{2g}\right)$$

$$Z_C > Z_A\ es\ negativo$$

$$v_C = v_B = 3\,{}^{m}/_{S}$$

$$P_C = 9.81K\frac{N}{m^3}\left[-(1.2m) - \frac{9m}{2 \times 9.81}\right]$$

$$P_C = 9.81\ \ (-1.2 - 0.45)\ \ K\frac{N}{m^3}$$

$$P_C = -16.2\ Kpascal$$

Presión en D. La elevación y la velocidad son iguales que en el punto B.

$$\frac{P_B}{\gamma} + Z_B + \frac{{v_B}^2}{2g} = \frac{P_D}{\gamma} + Z_D + \frac{{v_D}^2}{2g}$$

$$\frac{P_B}{\gamma} = \ \ \frac{P_D}{\gamma} \Rightarrow P_D = 0.45\ \ K\frac{N}{m^2}$$

Presión en E. Bernoulli entre A y E.

$$\frac{P_A}{\gamma} + Z_A + \frac{{v_A}^2}{2g} = \frac{P_E}{\gamma} + Z_E + \frac{{v_E}^2}{2g}$$

$$v_E = v_B = 3.0\frac{m}{seg}$$

$$\frac{{v_E}^2}{2g} = 0.459m$$

$$\frac{Pe}{\gamma} = \gamma\left(Za - \frac{ve^2}{2g}\right)$$

$$P_E = 9.81K\frac{N}{m^3}(3.0 - 0.459)m$$

$$P_E = 24.92 \;\; K\frac{N}{m^2} \Rightarrow (Kilo\ Pascal)$$

1.13 Teorema de Torricelli

Flujo en un tanque que fluye por una boquilla lisa y redonda. Aplicando la ecuación de la energía entre (1) y (2).

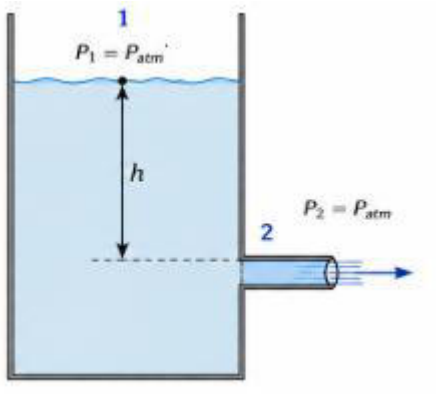


Figura 11. Flujo en un tanque.

$$P_1 = P_2 = 0$$

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

$$Z_1 = Z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

$$v_2 = \sqrt{(Z_1 - Z_2)2g} \qquad Z_1 - Z_2 = h$$

$$v_2 = \sqrt{2gh}$$

Ecuaciòn conocida como Teorema de Torricelli

1.13.1 Ejercicio 1.10:

Calcular la velocidad de flujo que sale por la boquilla y la rapidez de flujo de volumen, para un intervalo de profundidad comprendido entre 3.0 m y 0.5 m en espacio de 0.5 m, el diámetro del chorro en la boquilla es de 50 mm, y graficar v con h y v con Q.

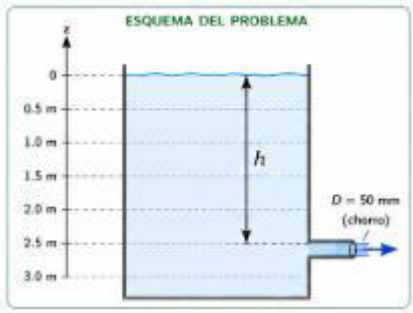


Figura 12. Flujo que sale por la boquilla.

Solución

$$A = \frac{\pi}{4}\left(50mm \quad \frac{1\ m}{10^3 mm}\right) = \frac{\pi}{4}\left(\frac{5}{10^2}\right)^2 = 1.963\ x\ 10^{-3} m^2$$

Tabla 2. Solución ejercicio 1.10

	h*m	$V = \sqrt{2\ gh\ m/seg}$	**A**	**Q= VxA**
1	3.0	7.67	1.963 x 10-3	1.51 x 10^{-2}
2	2.5	7.00		1.38x 10^{-2}
3	2.0	6.26		1.23x 10^{-2}

4	1.5	5.42	$1.07* 10^{-2}$
5	1.0	4.43	$0.87* 10^{-2}$
6	0.5	3.13	$0.61* 10^{-2}$

$V_1 = \sqrt{2gh}$=$\sqrt{2 * 9.8 * 3} = 7.67m/seg$

$$V_2 = \sqrt{19.6x2.5} = 7.m/seg$$

$$V_3 = \sqrt{19.6x2} = 6.26m/seg$$

$$V_4 = \sqrt{19.6x1.5} = 5.42m/seg$$

$V_5 = \sqrt{19.6x1.0}$ =4.43m/ seg

$V_6 = \sqrt{19.6x0.5}$ =3.13m/ seg

$Q_1 = V_1 * A_1 = 7.67 *1.963*10\text{-}3 = 1.51* 10^{-2}$m^3/seg

$Q_2 = V_2 * A_2 = 7.0 *1.963*10\text{-}3 = 1.37* 10^{-2}$m^3/seg

$Q_3 = V_{32} * A_3 = 6.26 *1.963*10\text{-}3 = 1.23* 10^{-2}$m^3/seg

$Q_4 = V_4 * A_4 = 5.42 *1.963*10\text{-}3 = 1.07* 10^{-2}$m^3/seg

$Q_5 = V_5 * A_5 = 4.43 *1.963*10\text{-}3 = 0.87* 10^{-2}$m^3/seg

$Q_6 = V_6 * A_6 = 3.13 *1.963*10\text{-}3 = 0.61* 10^{-2}$m^3/seg

Gráfica

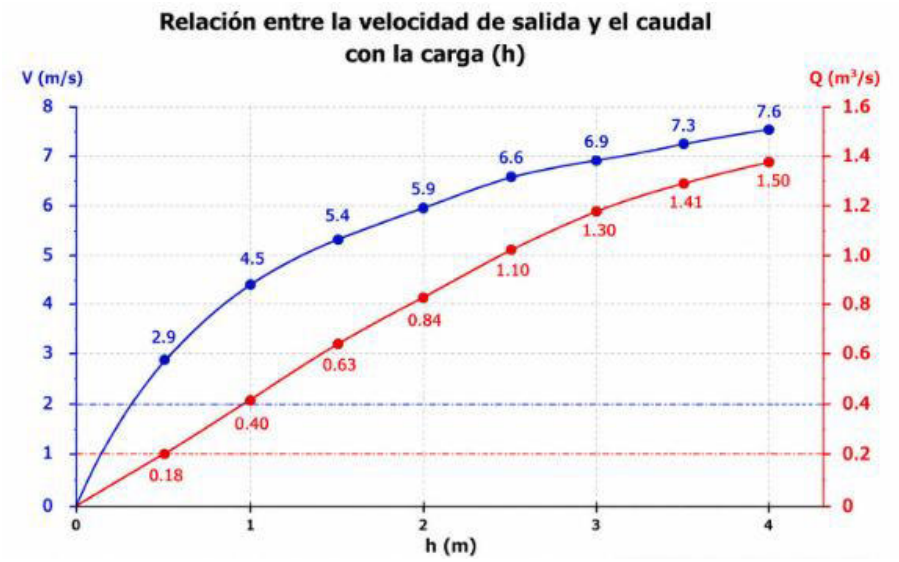


Figura 13. Relación entre la velocidad de salida y el caudal con la carga (h).

Chorro vertical

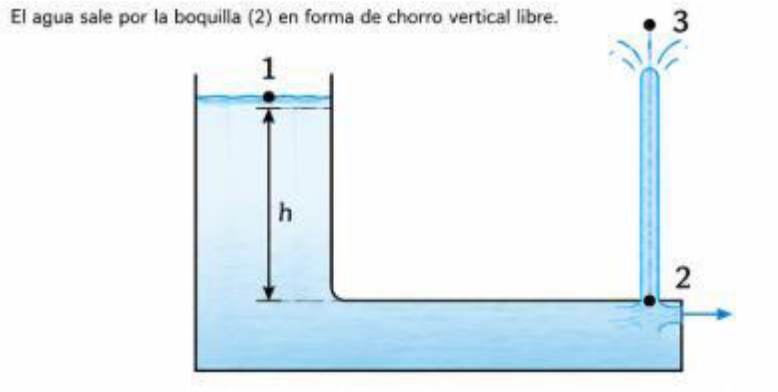


Figura 14. Chorro vertical.

$$\frac{p_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{{v_1}^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{{v_2}^2}{2g}$$

$$V_2 = 2gh$$

$$Bernoulli\ entre\ 2-3$$

$$\frac{p_2}{\gamma}+Z_2+\frac{{v_2}^2}{2g}=\frac{p_3}{\gamma}+Z_3+\frac{{v_3}^2}{2g}$$

$$p_2=p_3\ =0$$

$$v_3=\sqrt{{v_2}^2+2g(Z_2-Z_3)}$$

$$Z_2-Z_3=\ h$$

$$v_3=\sqrt{{v_2}^2-2gh}$$

$$pero\ {v_2}^2=2gh$$

$$v_3=\sqrt{{v_2}^2-{v_2}^2}$$

$$v_3=0$$

1.13.2 Ejercicio 1.11:

Considere una bomba cuya carga de presión es de 15ft de agua, bajo las siguientes condiciones.

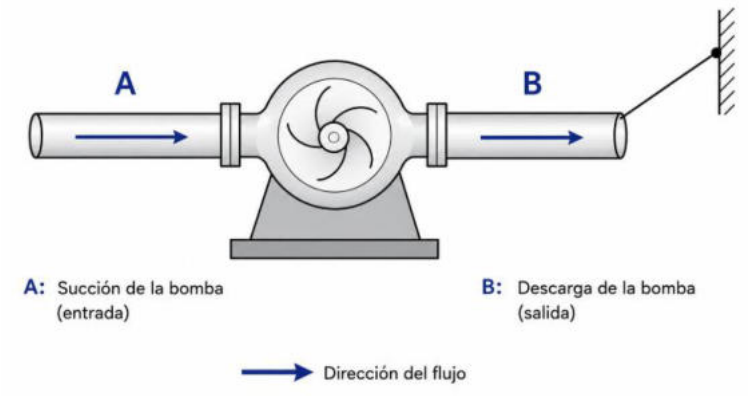


Figura 15. Bomba con carga de presión.

Aplicamos el balance de energía entre A y B

$$\frac{p_a}{\gamma} + Z_a + \frac{{v_a}^2}{2g} + h_p - h_f = \frac{p_b}{\gamma} + Z_b + \frac{{v_b}^2}{2g}$$

$p_A = 0$(gage)

$hp = \frac{P_B}{\gamma}$

Toda la energía suplida por la bomba se ha convertido en energía de presión

$$\frac{p_B}{\gamma} = 15ft$$

$$P_B = 15ft * \gamma$$

$$P_B = 62.4\frac{lbm}{ft^3} * 15ft = 435\frac{lb}{ft^2} * \frac{ft^2}{144pulg^2} = 6.5$$

$$P_B = 6.5Psia\left(\frac{lbf}{in^2}\right), \qquad lectura\ manometrica$$

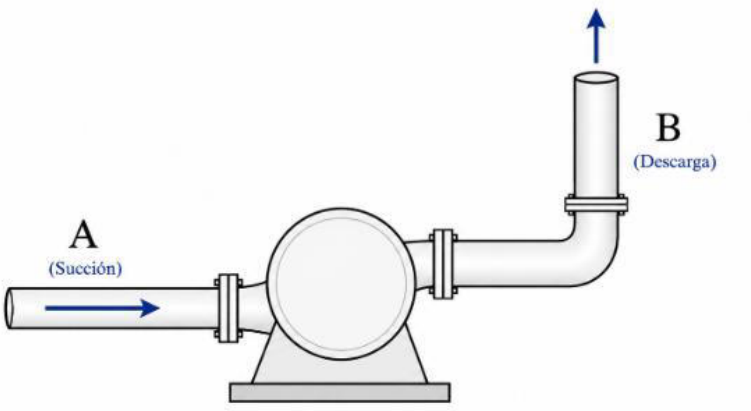


Figura 16. Energía suplida por la bomba.

$$Z_B = 15ft, \quad Z_A = 0$$

$$v_B = 0\ , \quad P_B = 0$$

$$P_A = 0\ , \quad v_A = 0$$

$$\frac{p_a}{\gamma} + Z_a + \frac{{v_a}^2}{2g} + h_p - h_f = \frac{p_b}{\gamma} + Z_b + \frac{{v_b}^2}{2g}$$

$$hp = Z_B = 15ft$$

Toda la energía suplida por la bomba se convierte en energía potencial para elevar al líquido a una altura 15ft.

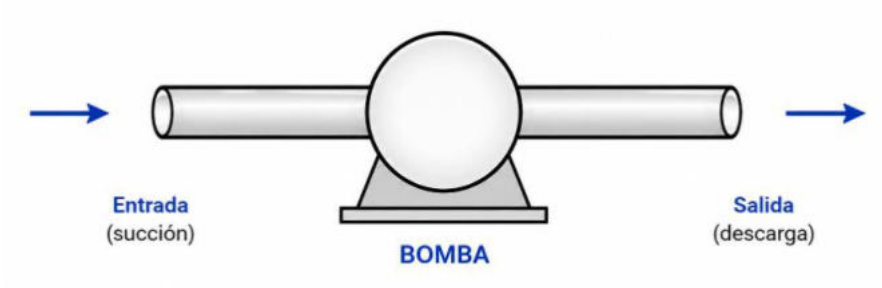


Figura 17. Energía suplida por la bomba se convierte en energía potencial.

$$\boldsymbol{Z_B = Z_A = 0}$$

$$\boldsymbol{P_B = 0}$$

$$\boldsymbol{v_A = 0}$$

$$\frac{p_a}{\gamma} + Z_a + \frac{v2}{2g} + h_p - h_f = \frac{p_b}{\gamma} + Z_b + \frac{{v_b}^2}{2g}$$

$$hp = \frac{{v_B}^2}{2g}$$

La energía suplida por la bomba se convierte en energía cinética

$$h_p = \frac{{v_B}^2}{2g} = 15ft$$

$${v_B}^2 = 2g\ hp$$

$$v_B{}^2 = 2x32.2\frac{ft}{s^2} \quad 15ft$$

$$v_B = 31.05\frac{ft}{s}$$

1.14 Flujo en Descenso

Vamos a calcular el tiempo requerido para vaciar un tanque en la gráfica.

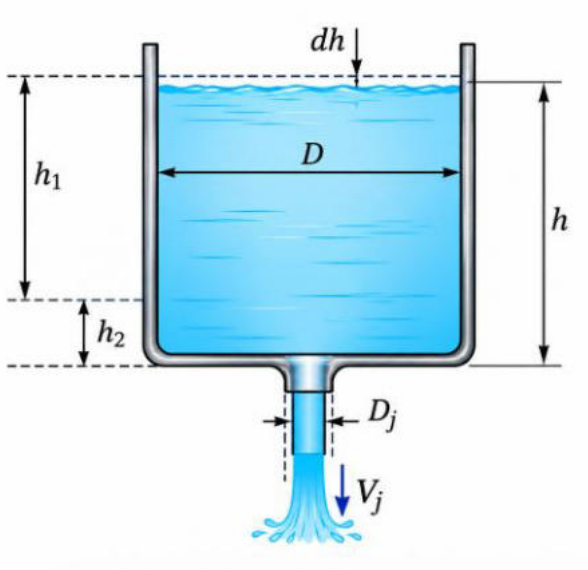


Figura 18. Tiempo requerido para vaciar un tanque.

Según Torricelli $v_J = \sqrt{2gh}$

$$Q = A_J v_J \; En\ una\ cantidad\ pequeña\ de\ tiempo\ dt$$

$$Volumen\ que\ fluye\ = QdT = A_J V_J(dl)$$

dh, cantidad de altura que disminuye en dt

Volumen removido= - A_1dhque sale del tanque.

$$A_J V_J dt = -A_t dh$$

$$dt = \frac{(-\frac{A_t}{A_J})}{vj} dh$$

$$dt = \frac{-\frac{A_t}{A_J}}{\sqrt{2gh}} dh$$

$$dt = \frac{-\frac{A_t}{A_J}}{2g} dh \; x \; h^{-1/2} \; Integrando$$

$$\int_{t_1}^{t_2} dt = \frac{-\frac{A_t}{A_J}}{2g} \int_{h_1}^{h_2} h^{-1/2} \, dh$$

$$t_2 - t_1 = \frac{-\frac{A_t}{A_J}}{\sqrt{2g}} 2 \left({h_2}^{1/2} - {h_1}^{1/2} \right)$$

$$t_2 - t_1 = \frac{2\frac{A_t}{A_J}}{\sqrt{2g}} x \left({h_1}^{1/2} - {h_2}^{1/2} \right)$$

$$t_2 - t_1 = \frac{2\frac{A_t}{A_J}}{\sqrt{2g}} \; x \; \left({h_1}^{1/2} - {h_2}^{1/2} \right)$$

Ecuación para calcular el tiempo requerido para vaciar un tanque desde h_1 hasta h_2.

1.14.1 Ejercicio 1.12:

En el tanque de la figura anterior se quiere conocer el tiempo requerido para vaciarlo desde un nivel de 3.0 y 0.50 m. el tanque tiene un diámetro de 1.5 m y la boquilla 50 mm.

Corrección: el área de la boquilla de 50 mm es 0,001963 m². Resultado verificado: t ≈ 416,5 s ≈ 6 min 57 s.

Solución:

$$A_T = \frac{\pi}{4}(1.50)^2 = 1.767m^2$$

$$A_j = \frac{\pi}{4}(0.05)^2 = 0.001963m^2$$

$$\frac{A_T}{A_j} = \frac{1.767}{0.001463} = 900$$

$$t_2 - t_1 = \frac{2\ x\ 900}{\sqrt{2\ \ x\ \ 9.8\frac{m}{s^2}}}\left[(3.0m)^2 - (0.5m)^{1/2}\right]$$

$$t_2 - t_1 = 4.17seg$$

$$t_2 - t_1 = 6\,min\,y\ \ 57\ seg$$

1.15 Número de Reynolds

Determinación de flujo laminar y Turbulento en cañerías, El comportamiento de un fluido particularmente con respecto a las pérdidas de energía depende básicamente da la clase de flujo si es laminar o turbulento, por esta razón es necesario predecir el tipo de flujo sin

necesidad de observarlo. Reynolds demostró la existencia de dos tipos de flujo bien diferenciados. (Himmelblau, 1971)

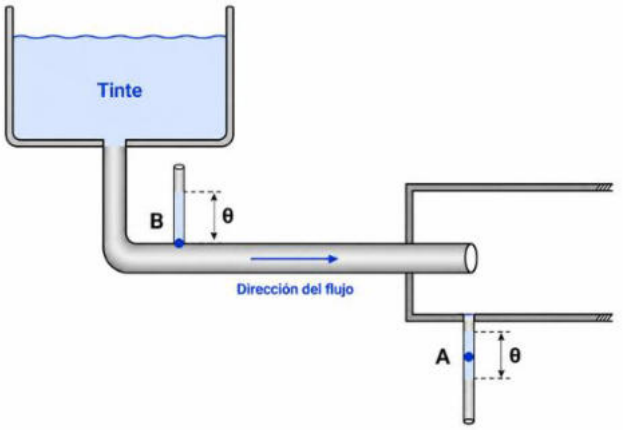


Figura 19. Número de Reynolds.

Al abrir la válvula A gradualmente el filamento de colorante permanecerá perfectamente definido y recto hasta cierta velocidad promedio las partículas del fluido se mueven en trayectorias rectilíneas bien definidas a este tipo de flujo se llama LAMINAR si la llave A se sigue abriendo la velocidad del flujo aumenta, el colorante empieza a ondularse, para luego romperse y el colorante se difunde por todo el líquido de una manera desordenada, este tipo de flujo se llama TURBULENTO. La velocidad promedio a la cual el flujo cambia de laminar a turbulento se llama velocidad cinética inferior. Osborne Reynolds fue el primero en demostrar que un flujo laminar o turbulento, depende de 4 variables, la densidad ρ, la viscosidadμ, el diámetro del conducto D, y la velocidad promedio del flujo v y puede ser precedido el flujo si se conoce la magnitud de un numero adimensional conocido como el número de Reynolds N_R, (N_{RE}) (Re). (Cheng & Zhang, 2021)

$$N_R = \frac{vD\rho}{\mu} = \frac{vD}{\gamma} \qquad siendo\ \gamma\ la\ viscocidad\ cinematica$$

$$N_R = \frac{m}{seg} \quad m \quad \frac{Kg}{m^3} \quad \frac{m - seg}{Kg} = \quad a\,dim\,ensional$$

Tabla 3. Número de Reynolds.

Sistema	**Velocidad v**	**Diámetro D**	**Densidad ρ**	**Viscosidad μ**	**Viscosidad cinemáticaγ**
Británico	Ft/seg.	Ft	Slug/ft^3	Lb seg/ft^2	ft^2/seg
S.I.	m/seg.	M	Kg/m^3	Kg/m*seg	m^2/seg

Los fluidos que tienen un N_R grande con una alta velocidad tienden a ser turbulentos, y aquellos que poseen una alta viscosidad y se mueven a bajas velocidades tendrán un $N_{R\ pequeño}$ y será un flujo laminar.

El número de Reynolds es la relación entre las fuerzas de inercia de fluido y las fuerzas de viscosidad, para un flujo N_R grande predominan las fuerzas de inercia, si $_{NR}$ es pequeña predominan las fuerzas de viscosidad. Existe un criterio analítico para determinar el tipo de flujo. (Raissi et al., 2020)

Reynolds concluyo que el valor analítico del grupo adimensional $\frac{vD\rho}{\mu}$, determina el tipo de flujo.

$$N_R \prec 2100 \quad el\ flujo\ es\ la\,min\,a\,r$$
$$2100 \prec N_R \prec 4000\ Zona\ de\ transicion\ region\ critica$$

$$N_R \prec 4000\ el\ flujo\ es\ turbulento$$

En la zona de transición es laminar si no hay movimientos extraños que alteran la velocidad de fluido, caso contrario se hace turbulento, lo que hace imposible predecir qué tipo de flujo existe en la región crítica. Para salir de esta región crítica en la práctica se debe cambiar la rapidez de flujo o el diámetro del conducto para hacer que el flujo quede claramente definido laminar o turbulento.

1.15.1 Ejercicio 1.13:

Determinar el tipo de flujo cuando agua 70 °C a fluye en un tubo de cobre de 1 pulgada de diámetro con una rapidez de flujo de 285 lts/min.

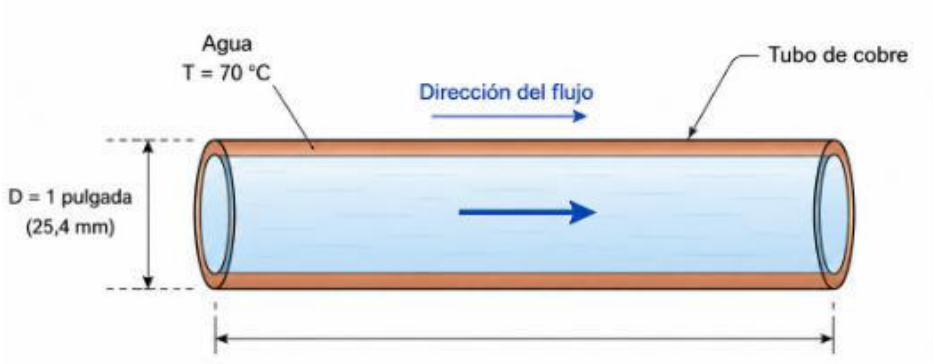


Figura 20. Flujo de agua.

Solución

$$\gamma = 4.11 \quad x \quad 10^{-7}\, m^2/_{seg}$$

$$D \;=\; 1\, in \cdot \left(\frac{2.54\, cm}{1\, pulg}\right) \cdot \left(\frac{1\, m}{100\, cm}\right)$$

$$D \;=\; 0.0254\, m$$

$$A = \left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot (0.0254\, m)^2$$

$$A = 5.06 \times 10^{-4}\, m^2$$

$$Q = 285 \frac{L}{\min} \cdot \left(\frac{1\, m^3}{1000\, L}\right) \cdot \left(\frac{1 \min}{60\, seg}\right)$$

$$Q = 4.75 \times 10^{-3}\, m^3/seg$$

$$v = Q \,/\, A$$

$$v = \frac{(4.75 \times 10^{-3})}{(5.06 \times 10^{-4})}$$

$$v = 9.39\, m/seg$$

$$Re = \frac{(v \cdot D)}{\gamma}$$

$$Re = \frac{\left(9.39 \frac{m}{seg} \cdot 0.0254\, m\right)}{4.11 \times 10^{-7} \frac{m^2}{seg}}$$

$$Re = 5.80 \times 10^5$$

El flujo es turbulento (Re > 4000).

1.15.2 Ejercicio 1.14:

Determine el intervalo de velocidad promedio del flujo en la región crítica, si aceite comestible a $60°F$ fluye en un conducto de acero de 2 pulg. Cédula 40 tiene una gravedad específica de 0.89.

$$\mu = \quad 2.10 * 10^{-3} \quad \frac{lb*seg}{pie^2}, \qquad \rho_{H_2O} = 1.94 \frac{slug}{pie^3}$$

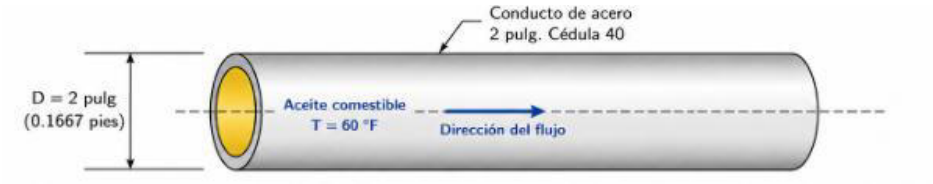


Figura 21. Intervalo de velocidad promedio del flujo.

Solución:

$$N_R = \frac{vD\rho}{\mu} \rightarrow v = \frac{N_R \mu}{D\rho}$$

$$\rho = ge * \rho_{H_2O} = 0.89 * 1.94 \frac{slug}{pie^3} = 1.73 \frac{slug}{pie^3}$$

$$V = \frac{N_R * 2.10 * 10^{-3}}{(0.1423)(1.73)} = 7.05 * 10^{-3}\ N_R$$

$Para$

$N_R = 2000$

$v = 7.05 * 10^{-3} * 2000 = \quad 14.1 pie/seg$

$Para$

$N_R = 4000$

$$v = 7.05 * 10^{-3} * 4000 = 28.2 pie/seg$$

$$14.1 < v < 28.2 \quad pie$$

$$/seg \quad El\ flujo \quad estarà\ en\ la\ region \quad crìtica$$

1.15.3 Ejercicio 1.15:

Aceite comestible de g.e. 0.92 y viscosidad $6 * 10^{-3} \frac{lbf-seg}{ft^2}$ fluye por una cañería de 2 pulg. De diámetro de acero cédula 40 a razón de 0.5 ft^3/seg. Calcular N_R.

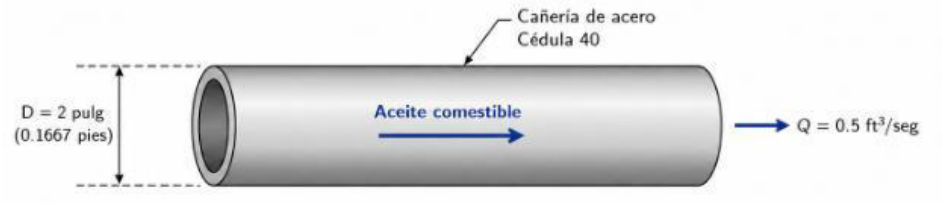


Figura 22. Aceite comestible.

$$D = 2\ pulg * \frac{1ft}{12\ pulg} = 0.172ft$$

$$A = \frac{\pi}{4}(0.172)^2 = 0.023ft^2 v = \frac{Q}{A} = \frac{0.5ft^3/seg}{0.023ft^2} = 21.5ft/seg$$

$$\rho = ge * \rho_{H_2O} = 0.92 * 62.4 \frac{lbm}{pie^3} * \frac{slug}{32.2lbm}$$

$$\rho = 1.78 \frac{slug}{ft^3}$$

$$\mu = 6 * 10^{-3} \frac{lbf - seg}{ft^3} = 6 * 10^{-3} \frac{slug}{ft^3 - seg}$$

$$N_R = \frac{D * v * \rho}{\mu} = \frac{(0.172ft) * (21.5ft/seg) * (1.78slug/ft^3)}{6 * 10^{-3} \frac{slug}{ft^3 - seg}}$$

$$N_R = 1100$$

Corresponde a un flujo Laminar

1.15.4 Ejercicio 3.16:

Por un tubo de 1 pulg. De diámetro fluye 1000 lts de leche por minuto, si la temperatura de la leche es de 20 °C**.** Determinar la clase de flujo.

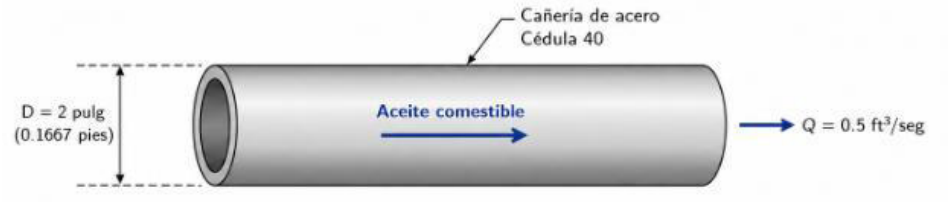


Figura 23. Tubo de 1 pulg.

Solución

$$a\ 20°C \quad \mu = 2.12 * 10^{-2}\ Poise$$

$$\rho = 1.03 \frac{gr}{cm^3}$$

$$\text{D} = 1\text{pulg} * \frac{2.54\ cm}{pulg} = 2.54\ \text{cm}$$

$$Área\ de\ la\ sección\ transversal:$$

$$A\ =\ (\pi\ /\ 4)\ \cdot\ (2.54\ cm)^2$$

$$A\ =\ 5.07\ cm^2$$

$$Caudal:$$

$$Q = 1000\frac{L}{min}\cdot\left(\frac{1000\ cm^3}{1\ L}\right)\cdot\left(\frac{1\text{min}}{60\ seg}\right)$$

$$Q = 1.67 \times 10^4\ cm^3/seg$$

$$Velocidad\ del\ fluido:$$

$$v = Q\ /\ A$$

$$v = \frac{\left(1.67 \times 10^4\frac{cm^3}{seg}\right)}{(5.07\ cm^2)}$$

$$v = 3.29 \times 10^3\ cm/seg$$

$$Número\ de\ Reynolds:$$

$$Re = \frac{(D\ \cdot\ v\ \cdot\ \rho)}{\mu}$$

$$Re = \frac{\left(2.54\ cm\ \cdot\ 3.29 \times 10^3\frac{cm}{seg}\cdot\ 1.03\frac{g}{cm^3}\right)}{\left(2.12 \times 10^{-2}\frac{g}{cm\cdot seg}\right)}$$

$$Re = 4.05 \times 10^5$$

$$Conclusión:$$

$$El\ flujo\ es\ turbulento\ (Re > 4000).$$

1.15.5 Ejercicio 1.17:

Agua fluye por una cañería de 6 pulg. De diámetro nominal de acero con una razón de 300 lts/min. Determine el tipo de flujo sabiendo que

$$\mu = 0.9254\ Cpoise \quad : \qquad \rho = 997.2\frac{Kg}{m^3}$$



Figura 24. Agua que fluye por una cañería de 6 pulg.

Solución:

$$\text{D = 6 pulg} * \frac{2.54cm}{pulg}$$

$$A = \frac{\pi}{4}\left(6pulg * \frac{2.54cm}{pulg} * \frac{m}{100cm}\right)^2$$

$$En\ el\ sistema\ internacional \qquad Pas - seg = \frac{Kg - m}{m * seg}$$

$$Q = \ 300\ \frac{lts}{min} * \frac{1000cm^3}{lts} * \frac{m^3}{(100)^3 cm^3} = 0.5 * \frac{10^{-2}\ m^3}{seg}$$

$$N_R = \frac{D * v * \rho}{\mu}$$

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{0.5 * 10^{-2}\ \frac{m^3}{seg}}{0.0176\ \frac{}{m^2}} = \frac{0.28m}{seg}$$

$$\mu = \ 0.9254 \ Cpoise \ * \frac{10^{-3} pas - seg}{1 \ Cpoise} * \frac{\frac{Kgm}{m} - seg}{pas - seg}$$

$$\mu = \ 0.9254 * 10^{-3} \ \frac{Kgm}{m - seg}$$

$$N_R = \frac{D * v * \rho}{\mu} = \frac{(0.1524m) * (0.27m/seg) * (997.2Kg/m^3)}{0.9254 * 10^{-3} \frac{Kgm}{m - seg}}$$

$$N_R = 44864.3 \ Flujo \ Turbulento$$

1.15.6 Ejercicio 1.18:

Determinar el régimen de flujo y la viscosidad cinemática de un alimento que tiene u= 12 Cpoise, y densidad 500 lb/pie^3, cuando fluye por una cañería de 6 pulga. De diámetro interno a una razón de 300 lb/seg.



Figura 25. Régimen de flujo y la viscosidad cinemática.

En el sistema Ingles

$$\mu = 12Cpoise * \frac{Poise}{10^2 \ Cpoise} * \frac{gr/cm - seg}{Poise} * \frac{1Kg}{10^3 gr} * \frac{2.2lb}{1Kg}$$
$$* \frac{100cm}{1m} * \frac{m}{3.28ft}$$

$$\mu = 8.049 * 10^{-3} \frac{lb}{ft - seg}$$

$$\rho = 500 \frac{lb}{ft^3} \quad , \; G = 300 \; \frac{lb}{seg}$$

D= 6pulg*$\frac{1pie}{12pulg} = 0{,}5\ ft$

$$A = \frac{\pi}{4}(0.5)^2 ft^2 = 0.196 ft^2$$

$$G = \quad Av\rho$$

$$v = \frac{G}{A\rho}$$

$$v = \frac{300}{0.196} \frac{lb/seg}{ft^2 * 500 \frac{lb}{ft^3}} = \quad 3.05 \quad pie/seg$$

$$N_R = \frac{D * V * \rho}{\mu} = \frac{(0.5) * (3.05) * (500)}{8.049 * 10^{-3}} = 44930.69$$

$$N_R = 44930.69 \quad Flujo\ Turbulento$$

$$Vis\,cos\,i\,dad\ cinematica$$

$$\gamma = \frac{\mu}{\rho} = \frac{8.049 * 10^{-3} \frac{lb}{ft - seg}}{500 \frac{lb}{ft^3}} = 1.6098 * 10^{-3} \quad \frac{pie^2}{seg}$$

1.15.7 Ejercicio 1.19:

Agua a una temperatura de $68°F$ fluye por un tubo de cobre cuyo diámetro interno es de 0.373 pulg., ¿qué peso de fluido puede permitirse en 4 minutos sin que se produzca flujo turbulento

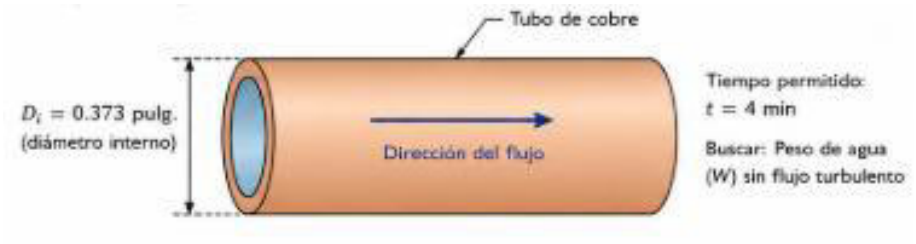


Figura 26. Tubo de cobre.

Solución:

$$Datos\ a\ 68\ °F:$$

$$Número\ de\ Reynolds: Re\ =\ 2100$$

$$Gravedad\ específica: g.e.=\ 0.998$$

$$Densidad\ del\ agua: \rho_{H2O}\ =\ 62.4\frac{lbm}{ft^3}$$

$$Viscosidad\ dinámica: \mu\ =\ 1.05\ cP$$

$$Densidad\ del\ fluido:$$

$$\rho\ =\ g.e.\cdot\ \rho_H2O$$

$$\rho\ =\ 0.998\ \cdot\ 62.4\ =\ 62.27\frac{lbm}{ft^3}$$

$$Conversión\ de\ viscosidad:$$

$$\mu\ =\ 1.05\ cP\ \cdot\ \left(\frac{2.42\ \frac{lbm}{ft\cdot hr}}{1\ cP}\right)\cdot\ \left(\frac{1\ hr}{3600\ s}\right)$$

$$\mu = 7.07 \times 10^{-4} \frac{lbm}{ft \cdot s}$$

Diámetro de la tubería:

$$D = 0.373\, pulg \cdot \left(\frac{1\, ft}{12\, pulg}\right)$$

$$D = 0.0311\, ft$$

Velocidad del fluido:

$$v = \frac{(Re \cdot \mu)}{(D \cdot \rho)}$$

$$v = \frac{(2100 \cdot 7.07 \times 10^{-4})}{(0.0311 \cdot 62.27)}$$

$$v = 0.769\, ft/seg$$

Caudal volumétrico:

$$A = (\pi / 4) \cdot D^2$$

$$Q = v \cdot A$$

$$Q = 0.00058 \frac{ft^3}{seg}$$

Peso del fluido en 4 minutos:

$$W = Q \cdot \rho \cdot t$$

$$W = 0.00058 \frac{ft^3}{s} \cdot 62.27 \frac{lbm}{ft^3} \cdot (4 \cdot 60\, seg)$$

$$W = 8.7\, lbf$$

1.16 Factor de corrección de energía cinética para flujo turbulento

Este factor de corrección relaciona el N_R versus α, se nota que al aumentar N_R el valor de α tiende asintóticamente a 1, por consiguiente, la ecuación de Bernoulli queda:

$$\alpha_1 \frac{v_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + gZ_1 = \alpha_2 \frac{v_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + gZ_2$$

$$\alpha_1 \frac{{v_1}^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + Z_1 = \alpha_2 \frac{{v_2}^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + Z_2$$

1.16.1 Ejercicio 1.20:

En una tubería de diámetro interno de 52.2 mm en la sección (1) y un diámetro interno de 26.6mm en la sección (2) fluye agua a 27 °C a razón de 1.08 lts/seg. En la sección (1) la presión de fluido es de $1.5*10^5$ N/m^2, Z_1=3m, en la sección (2) Z_2=0.25m. Calcular los valores de las diferentes cargas en ambas secciones, suponiendo que es aplicable la ecuación de Bernoulli.

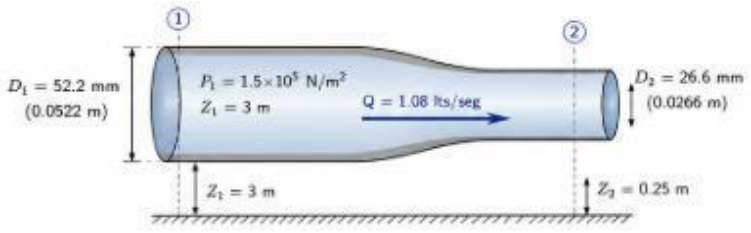


Figura 27. Tubería de diámetro interno de 52.2 mm.

$$D_1 = 52.2mm * \frac{m}{1000mm} = 52.2 * 10^{-3}$$

$$A_1 = \frac{\pi}{4} {D_1}^2$$

$$A_1 = \frac{\pi}{4} (52.2 * 10^{-3})^{\ 2}$$

$$A_1 = 2.138 * 10^{-3}\ m^2$$

$$P_1 = 1.5 * 10^5 N/m^2$$

$$Z_1 = 3m$$

$$D_2 = 26.6mm * \frac{m}{1000mm} = 26.6 * 10^{-3}$$

$$A_2 = \frac{\pi}{4} {D_2}^2$$

$$A_2 = \frac{\pi}{4} (26.6 * 10^{-3}\ )^{\ 2}$$

$$A_2 = 0.555 * 10^{-3}\ m^2$$

$$Z_2 = 0.25m$$

$$Q = 1.08 \frac{lts}{seg} * \frac{m^3}{lts * 10^3}$$

$$Q = 1.08 * 10^{-3} m^3/seg$$

Desarrollo original (sustituido por la solución técnica corregida anterior):

$$v_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{1.08 * 10^{-3}}{2.138 * 10^{-3}} = 0.5m/seg$$

$$\frac{{v_1}^2}{2g} = \frac{(0.5)^2}{2 * 9.8} = 0.127m$$

$$v_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{1.08 * 10^{-3}}{0.55 * 10^{-3}} = 01.96m/seg$$

$$\frac{{v_2}^2}{2g} = \frac{(01.96)^2}{2 * 9.8} = 0.19m$$

En tabla a 27 C ^{0}

$$\mu = 0.863 * 10^{-3} \quad Pa.seg$$
$$\rho = 996.5 \quad Kg/m^3$$

$$N_{R1} = \frac{D_1 * V_1 * \rho}{\mu_1}$$

$$N_{R1} = \frac{(52.2*10^{-3})(0.5)(996.5)}{0.863*10^{-3}} = 30137.4$$

$$N_{R2} = \frac{D_2 * v_2 * \rho}{\mu_2}$$

$$N_{R2} = \frac{(26.6 * 10^{-3})(1.96)(996.5)}{0.863 * 10^{-3}} = 60201.07$$

Por la figura

$\alpha_1 = 1.085$ $\alpha_2 = 1.072$

$$\alpha_1 \frac{{v_1}^2}{2g} = 1.085 * 0.0127 = 0.0138m$$

$$\alpha_2 \frac{{v_2}^2}{2g} = 1.072 * 0.19 = 0.2039m$$

$$\frac{p_1}{\gamma} = \frac{1.5 * 105}{996.5 * 9.81} = 15.34m$$

Aplicando la ecuación

$$\alpha_1 \frac{{v_1}^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + Z_1 = \alpha_2 \frac{{v_2}^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + Z_2$$

$$0.0138 + \quad 15.34 + \quad 3 \quad = \quad 0.2039 + \quad \frac{p_2}{\gamma} + \quad 0.5$$

$$\frac{p_2}{\gamma} = \quad 0.138 + \quad 15.34 + \quad 3 - \quad 0.2039 - \quad 0.5$$

$$\frac{p_2}{\gamma} = 17.8\ m$$

$$\gamma = \rho * g$$

$$p_2 = 17.8 * \rho * g = 17.8m * (996Kg/m^3) * 9.8m/seg^2$$

$$p_2 = 173665.4 \quad \frac{kg}{m \quad seg^2}$$

$$p_2 = 173665.4 \quad \frac{N}{m^2}$$

$$p_2 = 173665.4 \quad Pas$$

En el caso de fluidos reales esta ecuación no es aplicable ya que no se considera el rozamiento.

1.17 Pérdidas por Fricción

Un fluido que fluye a través de una tubería experimenta una pérdida de presión debido a la fricción que depende de la longitud, del diámetro de la tubería, de la velocidad de fluido, de la rugosidad de la cañería. Las pérdidas por fricción representan una de las principales fuentes de pérdida de energía en sistemas de tuberías y canales, afectando la eficiencia en el transporte de fluidos. Estas pérdidas se deben a la resistencia que ofrece la pared de la tubería al paso del fluido y son fundamentales en el diseño y operación de redes hidráulicas e industriales. (Gul et al., 2020)

La diferencia de presión en un tubo horizontal de sección constante se debe a la presencia de la viscosidad, esta genera esfuerzos cortantes en el fluido que se manifiestan como esfuerzos de rozamiento o fricción, esto significa que parte de la energía inicial se pierde en forma de calor irreversiblemente y no puede ser recuperada. Se presenta **hf** a la pérdida de carga del fluido a través del sistema, por lo que es necesario hacer una corrección en la ecuación de Bernoulli que consiste en adicionar el termino **hf** en la derecha de la ecuación o restar a la izquierda de la ecuación. (Anbarlooei et al., 2025)

$$\alpha_1 \frac{{V_1}^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + Z_1 - hf = \alpha_2 \frac{{V_2}^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + Z_2$$

hf estará en términos de carga de fluido.

La ecuación criterio podemos transformar mediante operadores.

$$0 = \alpha_2 \frac{{v_2}^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + Z_2 - \alpha_1 \frac{{v_1}^2}{2g} - \frac{p_1}{\rho g} - Z_1 + hf$$

$$donde$$

$$\alpha_2 \frac{{V_2}^2}{2g} - \alpha_1 \frac{{V_1}^2}{2g} = \Delta\left(\alpha \frac{V^2}{2g}\right)$$

$$\frac{p_2}{\rho g} - \frac{p_1}{\rho g} = \Delta\left(\frac{p}{\rho g}\right)$$

$$Z_2 - Z_1 = \Delta Z$$

$$0 = \Delta\left(\alpha \frac{V^2}{2g}\right) + \Delta\left(\frac{p}{\rho g}\right) + \Delta Z + hf$$

Esta ecuación está en términos de carga de fluido m o ft, si queremos que la ecuación este en términos de engría por unidad de masa Joule/Kg., multiplicamos la ecuación anterior por g.

$$\Delta\left(\alpha\frac{V^2}{2}\right)+\Delta\left(\frac{p}{\rho}\right)+(g)\Delta Z+(g)\ hf=0$$

$$Siendo\sum F\ \ hf=g*hf$$

$$\Delta\left(\alpha\frac{V^2}{2g}\right)+\Delta\left(\frac{p}{\rho}\right)+(g)\Delta Z+\sum F\ \ hf=0$$

$$donde\ hf=perdidas\ de\ carga\quad\sum F\ \ hf$$

$$=Perdidas\ de\ energia$$

1.17.1 Ejemplo 1.21:

En el sistema representado por la figura, se tienen las siguientes condiciones para el flujo de agua a 27°C a razón de 1.08 ft/seg., D_1=0.052 m, Z_1=3m, P_1 = 1.5*10^{-5}N/m^2, D_2 = 0.0266m, Z_2 = 0.25m, P_2 = 0.810*10^{5}N/m^2 abs.

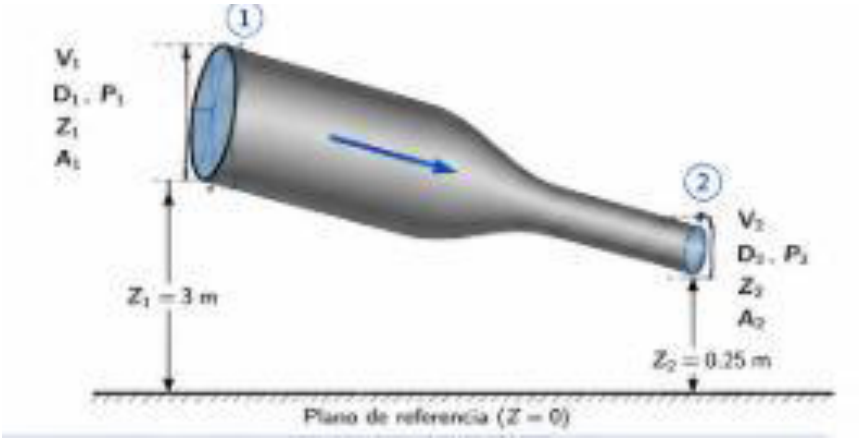


Figura 28. Plano de referencia.

$$\alpha_1\frac{{v_1}^2}{2g}=\ \ 0.0138\ \ m$$

$$\frac{p_1}{\rho g} = 15.34 \ \ m$$

$$Z_1 = 3 \ \ m$$

$$\alpha_2 \frac{{V_2}^2}{2g} = \ 0.205 \ \ m$$

$$\frac{p_2}{\rho g} \ = \ \ 0.25 \ \ m$$

$$Z_2 = 8.18 \ m$$

Aplicando la ecuación correspondiente:

$$\alpha_1 \frac{{v_1}^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + Z_1 - hf = \alpha_2 \frac{{v_2}^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + Z_2$$

$$0.0138 + 15.4 + 3 - hf = 0.205 + 8.184 + 0.25$$

$$hf = 9.715 \ m$$

$$\sum F \ \ hf = hf * g = 9.715m * 9.8m/seg^2 = 95.3m^2/seg^2$$

$$= 95.3 \frac{Joul}{Kg}$$

El mismo resultado se obtiene aplicando operadores

$$\Delta\left(\alpha \frac{V^2}{2}\right) + \Delta\left(\frac{p}{g\rho}\right) + \Delta Z + hf = 0$$

$$hf = -\left[\Delta\left(\alpha \frac{V^2}{2}\right) + \Delta\left(\frac{p}{g\rho}\right) + \Delta Z\right]$$

$$hf = -[(0.205 - 0.0138) + (8.18 - 15.34) + (0.25 - 3)]$$

$$hf = 9.71 \ m$$

La ecuación de Bernoulli puede aplicarse para sistemas de ingeniería (m, F, L, t) para esto la diferencia de presiones debe multiplicarse por gc, que es un factor de conversión.

$$\Delta\left(\alpha\,\frac{V^2}{2}\right) + \Delta\left(\frac{p}{g\rho}\right) + \Delta Z + hf = 0$$

Las presiones por g_c

$$\Delta\left(\alpha\,\frac{V^2}{2}\right) + g_c\Delta\left(\frac{p}{g\rho}\right) + \Delta Z + hf = 0$$

$$\Delta\left(\alpha\,\frac{V^2}{2g_c}\right) + \Delta\left(\frac{p}{g}\right) + \left(\frac{g}{g_c}\right)\Delta Z + hf' = 0$$

Pero

$$\sum F'hf = \frac{g}{g_c}\,hf = \frac{\sum F'hf}{g_c}$$

Reemplazando

$$\Delta\left(\alpha\,\frac{V^2}{2g_c}\right) + \Delta\left(\frac{p}{g}\right) + \left(\frac{g}{g_c}\right)\Delta Z + hf' + \sum F'hf = 0$$

Donde$\sum F'\ \ hf$ = en termino de unidades energéticas.

El valor de g y g_c en ingeniería tienen valores iguales numéricamente.

$$g_c = 9.81\,\frac{Joul}{Kgf.m} = 9.81\,\frac{Kg*m}{Kgf*seg^2} = 9.81\,\frac{N}{Kgf} = 9.81\,\frac{erg}{grf-cm}$$

$$g_c = 9.81 \frac{gr - cm}{grf - seg^2} = 9.81 \frac{Din}{grf}$$

$$g_c = 32.17 \frac{lb - ft}{lbf - seg^2}$$

$$g_c = 4.18 * 10^8 \frac{lb - ft}{lbf - h^2}$$

1.17.2 Ejemplo 1.22:

En el esquema de la figura se bombea 0.021ft^3/seg. De agua a 30 C ^{0}, a través de una tubería de 0.622 pulg de diámetro interno, en el punto (1) la presión es de 55lb f/in^2 (mano), el tanque está abierto a la atmósfera y es de gran diámetro Z_2 es 25 ft. Determinar las pérdidas por fricción entre los puntos (1) y (2).

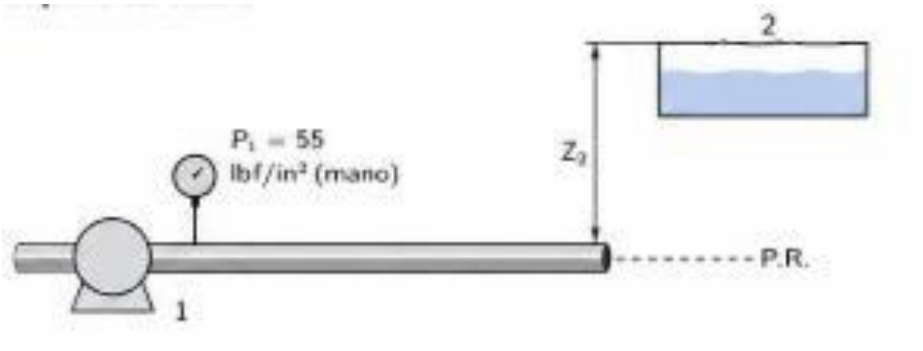


Figura 29. Esquema de la figura de bombeo.

Solución: Para el sistema ingles

$$\Delta\left(\alpha \frac{V^2}{2gc}\right) + \Delta\left(\frac{p}{g}\right) + \frac{g}{g_c}\Delta Z + \sum F`hf = 0$$

v_2 = Se trabajan con presiones manométricas

P_2 = Atmosférica = 0 expresada como presión manométrica es siempre 0.

$$P_1 = 55\frac{Lbf}{in^2} * \frac{144pulg^2}{ft^2} = 7920lb/pulg^2$$

$$Zr = 0$$

$$Z_2 = 25Ft$$

$$Con \quad 30°C$$

$$\mu = 0.8Cpoise * \frac{6.72 * 10^{-4}}{cpoise}\frac{lb}{ft - seg} = 5.376 * 10^{-4}\frac{lb}{ft - seg}$$

$$\rho = 995.7\frac{Kg}{m^3} * \frac{2.2lb}{Kg} * \frac{(0.304m)^3}{ft^3} = 62\frac{lb}{ft^3}$$

$$D = 0.622in * \frac{ft}{12in} = 0.0518ft$$

$$= \frac{\pi}{4}(0.0518)^2 = 2.11 * 10^{-3}ft^2$$

$$Q = 0.21\frac{ft^3}{seg} \rightarrow v \quad = \frac{Q}{A} = \frac{0.21\frac{ft^3}{seg}}{2.11 * 10^{-3}ft^2} = 9.95ft/seg$$

$$En \rightleftarrows \ el\ punto\ (1)$$

$N_{R1} = \frac{D*v*\rho}{\mu}$

$N_{R1} = \frac{(0.0518)(9.95)(62)}{5.376*10^{-4}} = 59633\ Flujo\ turbulent$

$$En\ la\ figura \qquad \alpha_1 = 1.073$$

$$Por\ \ tan\, to$$

$\frac{g}{gc}\Delta Z = Z_2 - Z_1 = 25 - 0 = 25Ft$

$$\Delta\left(\frac{\alpha\ v^2}{2gc}\right) = \quad \frac{\alpha_2\ {v_2}^2 - \alpha_1\ {v_1}^2}{2gc} = \quad \frac{0 - 1.073(9.95)^2}{2 * 32.7} = -1.65ft$$

$$\sum F\ 'hf = -\left[\Delta\left(\frac{\alpha\ v^2}{2gc}\right) + \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{g}{gc}\Delta Z\right]$$

$$= -\ [\ -1.65 - 127.3 + 25]ft$$

$$= (1.65 + 127.3 - 25)ft$$

$$\sum F\ 'hf = 103.95ft$$

$$pero\ \sum F\ 'hf = \frac{hf * g}{gc}$$

$$hf = \frac{\sum F\ '\ h * gc}{g}$$

$$hf = 103.95\ ft$$

Casi siempre se justifica que para un régimen turbulento tomar $\alpha = 1$

1.18 Factor de Fricción

Los trabajos fundamentales modernos en el campo experimental sobre la relación del factor de fricción con la rugosidad relativa y el número de Reynolds pertenecen a Nuk úrdase y han sido perfeccionados posteriormente, en la actualidad se cuentan con gráficos altamente confiables que relacionan el factor de fricción f con el número de Re Para segmentos largos de tubería $\left(\frac{L}{D}\right)$ grande. (Peixoto et al., 2022)

La figura, es el resultado más moderno en este campo,$f = f(e, Re)$ y se conoce como Diagrama de Moody, que se presenta f contra Nre cada uno en escalas logarítmicas. A Continuación el Diagrama de Coeficiente de Fricción Vs Número de Reynolds y Rugosidad Relativa.

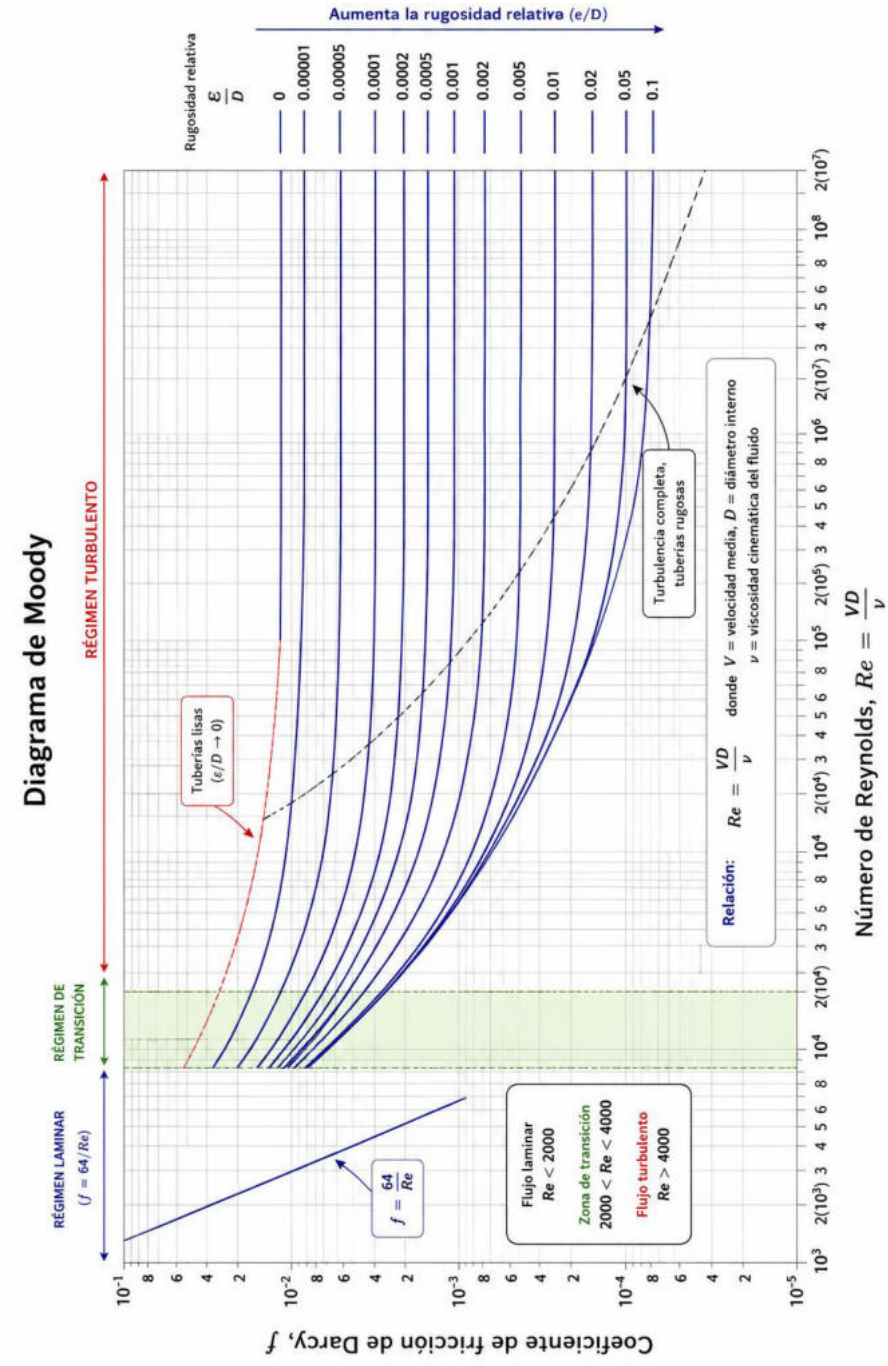


Figura 30. Diagrama de Coeficiente de Fricción Vs Número de Reynolds y Rugosidad Relativa.

1.19 Diagrama de Moody

La línea recta muestra $F = \frac{64}{Re}$ para flujo únicamente laminar, si $2100 \prec N\,Re \prec 4000$ esta representa la zona crítica, entre flujo laminar y turbulento donde no es posible predecir el tipo de flujo.

Más arriba de Re =4000 se gráfican la familia de curvas para diferentes valores de ε/D

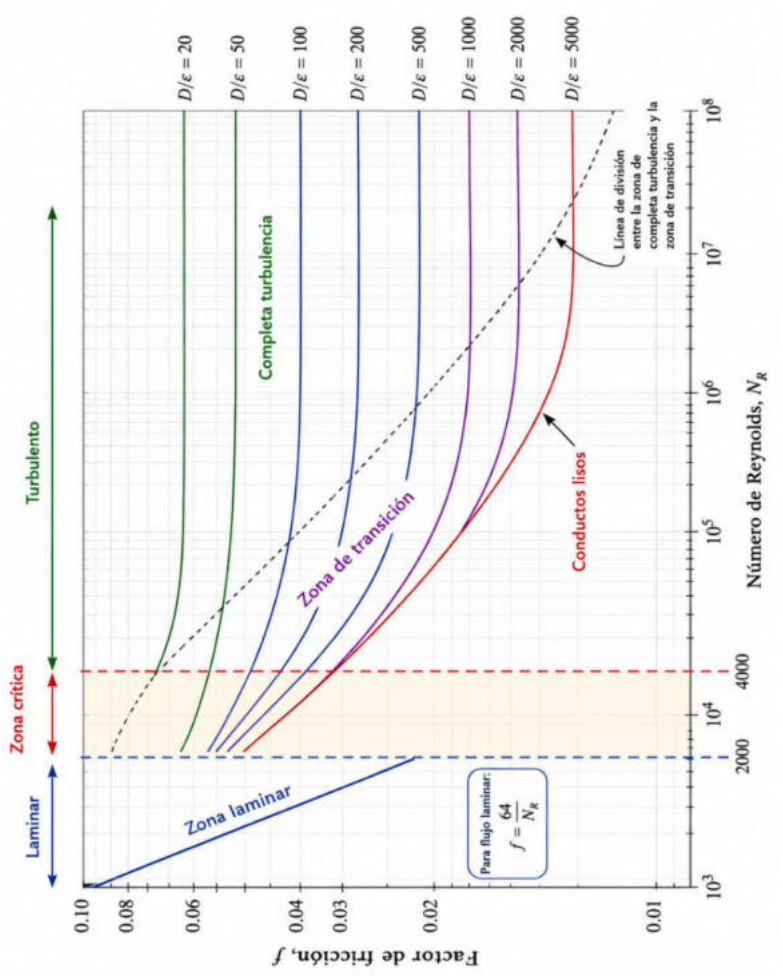


Figura 31. Diagrama de Moody.

Se pueden hacer varias observaciones importantes

1) Dentro de la zona de turbulencia completa Re no tiene efecto alguno sobre f. La zona laminar en la parte izquierda, en la parte derecha de la zona punteada tenemos turbulencia completa el factor de fricción más pequeño para flujo turbulento se encuentra en tubos lisos.
2) Deben conocerse como dato básico el diámetro del conducto, material del conducto, velocidad del flujo, tipo de fluido, temperatura de fluido para encontrar la densidad y viscosidad.

Para encontrar el valor del factor de fricción f en el **diagrama de Moody** se puede seguir los siguientes pasos:

1. Encontrar el $N_{R1} = \frac{D*V*\rho}{\mu} \quad = \quad \frac{v\ D}{\gamma}$, para la abscisa.

2. Proyecte verticalmente el valor de Re hasta alcanzar la curva e $=\frac{\varepsilon}{D}$

3. El valor de e se determina conociendo D y el material del conductor para leer en la gráfica; o en la tabla.

4. Proyecte horizontalmente hacia la izquierda y lea el valor de f.

La zona rayada indica que el flujo es inestable, donde puede ser laminar o turbulento, y está localizada entre Re de 2000 a 4000 aproximadamente y se caracteriza por grandes oscilaciones de los valores de la presión y la velocidad local del flujo.

La zona situada entre un valor de Re de 4000 y la línea de puertos se caracteriza por una fuerte influencia de Re y de rugosidad relativa e $=\frac{\varepsilon}{D}$, y se denomina zona cuadrática o de transición, al lado derecho se caracteriza por la ausencia de influencia de Re sobre f el que solo depende de e, En esta zona el valor de Re puede calcularse por:

$$Re\ c\ r_2 = 550\varepsilon^{-9/8}$$

El valor de f puede calcularse por la siguiente relación en las zonas de turbulencia:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\ log\left[\frac{\in}{3.7} + \left(\frac{6.81}{Re}\right)^{0,9}\right]$$

Para tubos lisos como vidrio, cobre, aluminio:

$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8\ log\left(\frac{6.81}{Re}\right)$.

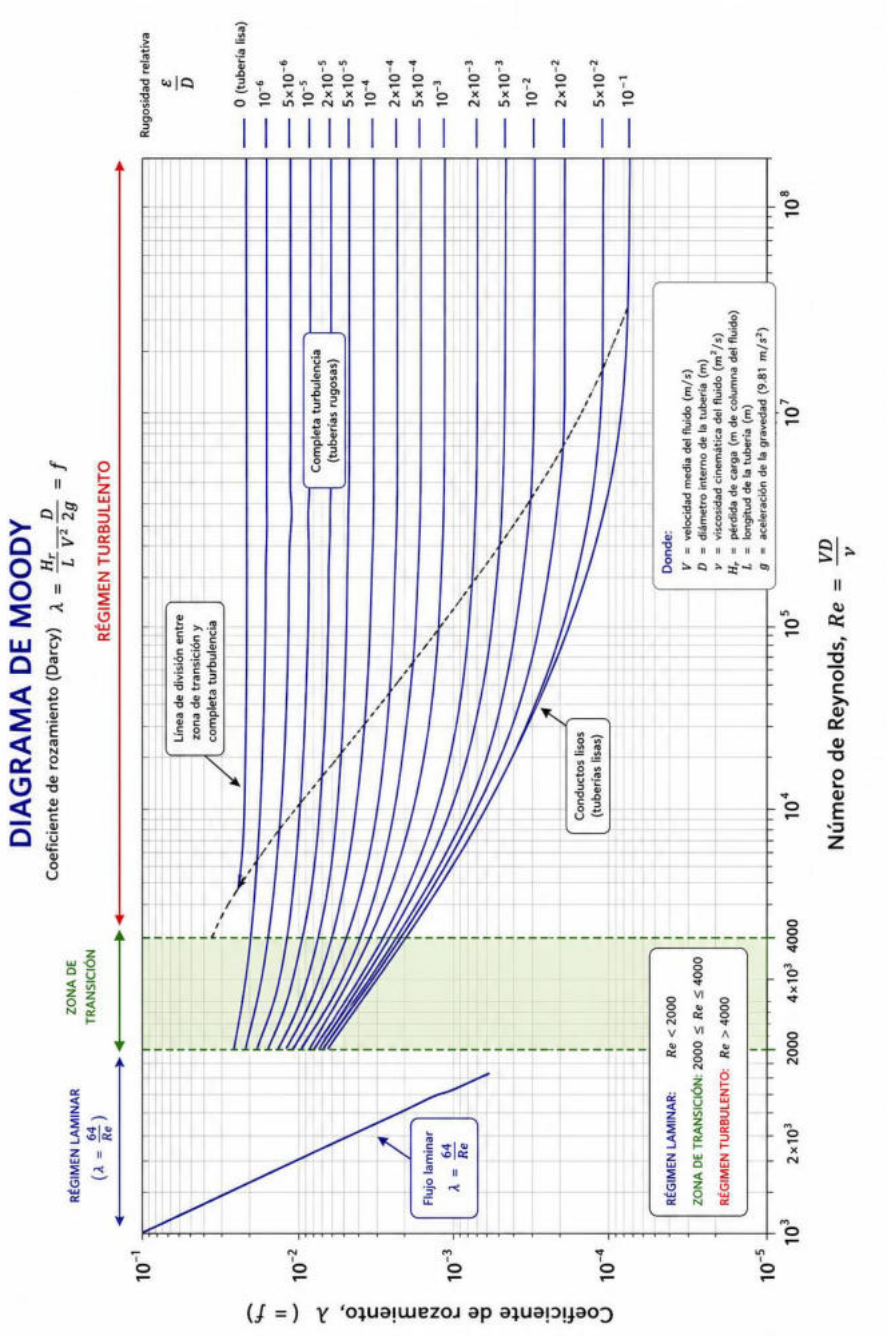


Figura 32. Diagrama de Moody.

1.20 Rugosidad relativa

La rugosidad se puede expresar en forma de una relación como el cociente entre la altura medida de la protuberancia y el diámetro del tubo $e = \frac{\epsilon}{D}$

En la siguiente tabla se encuentra el factor de rugosidad para diferentes clases de tubos, según los trabajos de Moody en 1944.

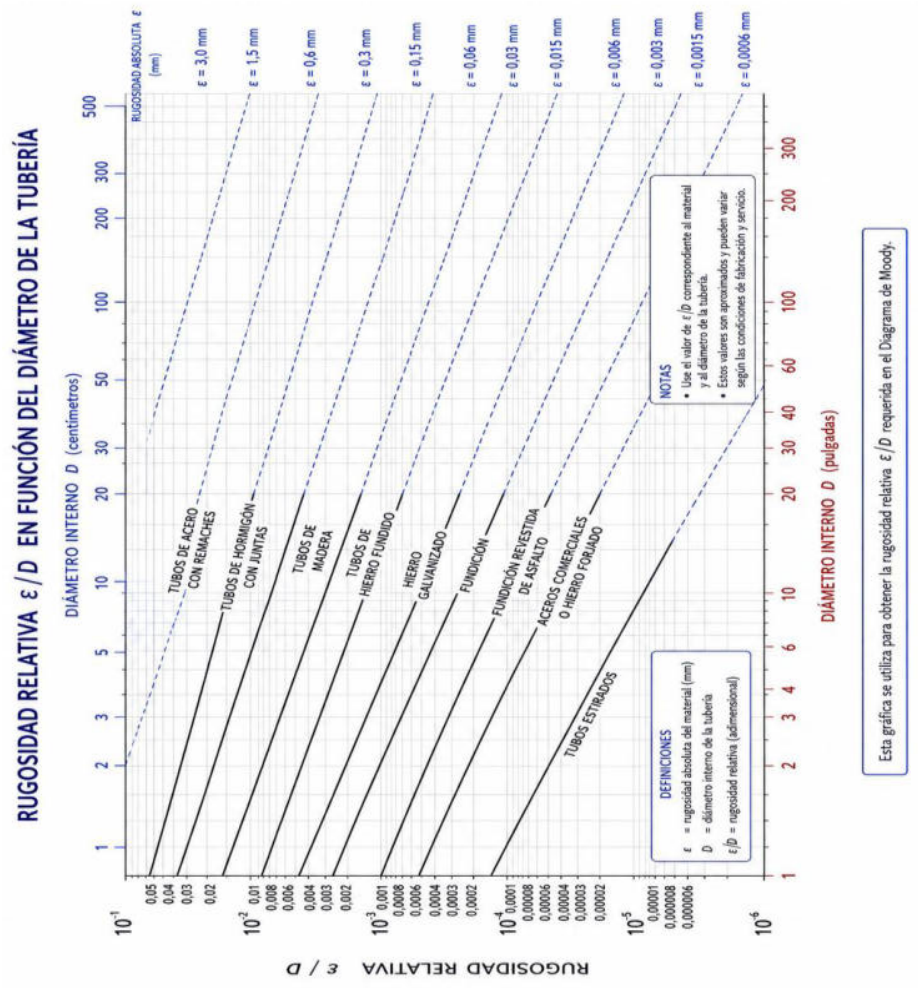


Figura 33. Rugosidad relativa.

1.21 Caída de Presión en el Flujo Laminar

La energía que se pierde del fluido por acción de vencer a la fricción, en el flujo laminar es regular y ordenada, podemos encontrar una relación entre las pérdidas de fricción y sus parámetros, esta relación se llama ecuación de Hagen Poiseuille. (X. Li et al., 2023)

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

Donde γes el peso específico, μes la viscosidad, esta ecuación es válida únicamente para flujo laminar, Re <2100.

La ecuación de Darcy (Fanning) es también válida para flujo laminar y turbulento sirve para calcular pérdidas de energía en secciones largas y rectas de conductos redondos, igualando las dos expresiones Poiseuille y Darcy.

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

Ecuación de las Darcy Fanning.

El valor de $f = \frac{64}{Re}$ para el flujo laminar.En el flujo laminar la velocidad del fluido es máximo en el centro del tubo y máxima casi cero en las paredes

$$r = 0 \quad velocidad\ max\, ima$$
$$r = \frac{D}{2} \quad velocidad\ nula$$

1.22 Obtención de la Ecuación de Poiseuille

Conocemos que $\tau = \frac{F}{A} = -\mu \frac{dv}{dr}$

Siendo el signo negativo debido que la velocidad y el radio cambian en direcciones contrarias.

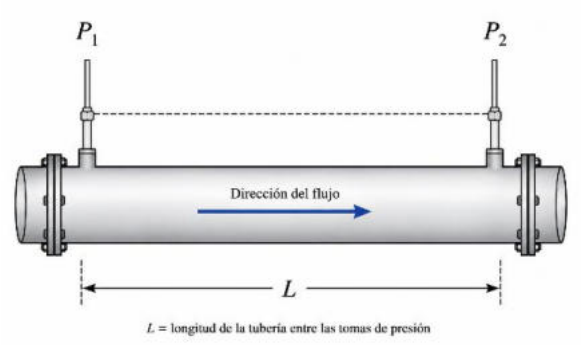


Figura 34. Obtención de la Ecuación de Poiseuille.

$$\sum F = m * a$$

$$P_1 A = P_2 A - (-\tau\ A') = m * a\ \ =\ \ 0$$

$$A' = Area\ lateral\ del\ cilindro = 2\pi rL$$

$$A = Area\ de\ la\ base\ \pi\ r^2 = \frac{\pi}{4} D^2$$

$$\tau\ A' = A(P_1 - P_2)$$

$$\tau = \frac{A(P_1 - P_2)}{A'}$$

$$Pf = (P_1 - P_2) \quad caida\ de\ presion$$

$$\tau = \frac{\pi\ r^2}{2\pi rL} Pf$$

$$\tau = \frac{rPf}{2L}$$

$$\tau = \frac{rPf}{2L} = -\mu \frac{dv}{dr} \quad resolviendo\ esta\ igualdad$$

$$\frac{1}{2}\frac{Pf}{L} r \frac{dr}{D/2} = -\mu\ dv$$

$$\frac{1}{2}\frac{Pf}{L} \int_r^{D/2} r dr = -\mu \int_v^0 dv$$

$$\frac{1}{2}\frac{Pf}{L}\left[\frac{r^2}{2}\right] = -\mu\ [v]$$

$$\frac{1}{2}\frac{Pf}{L}\left[\frac{D^2}{8} - \frac{r^2}{2}\right] = -\mu\ [-v]_v^0$$

$$\frac{1}{2}\frac{Pf}{L}\left[\frac{D^2}{8} - \frac{r^2}{2}\right] = \mu\ [v]$$

$$v = \frac{1}{2}\frac{Pf}{\mu L}\left[\frac{D^2}{8} - \frac{r^2}{2}\right]$$

Esta ecuación sirve para obtener la velocidad del fluido a cualquier distancia del centro.

Pero

$$Q = vA \qquad Flujo\ volumetrico$$

$$dQ = vdA \qquad Area\ lateral$$

$$dA = 2\pi r dr$$

$$dQ = v\ 2\pi\ dr \qquad remplazando\ la\ ecuacion\ de\ la\ velocidad$$

$$dQ = \frac{1}{2}\frac{Pf}{L\mu}\ \left[\frac{D^2}{8} - \frac{r^2}{2}\right]\ 2\pi r dr$$

$$dQ = \pi \frac{Pf}{L\mu}\left[\frac{rD^2}{8} - \frac{r^3}{2}\right]dr$$

$$\int_0^q dQ = \pi \frac{Pf}{L\mu}\int_0^{D/2}\left[\frac{rD^2}{8} - \frac{r^3}{2}\right]dr$$

$$Q = \frac{\pi Pf}{L\mu}\left[\frac{r^2D^2}{8} - \frac{r^4}{2}\right]$$

$$Q = \frac{\pi Pf}{L\mu}\left[\frac{D^4}{32} - \frac{D^4}{128}\right]$$

$$Q = \frac{\pi Pf}{L\mu} * \frac{D^4}{128} \qquad Pero\ Pf = W\ hf = \rho\ g\ hf$$

$$Q = \frac{\pi(\rho\ g\ hf)}{L\mu} * \frac{D^4}{128} \quad \rightleftarrows \quad Q = v * A\ = v\frac{\pi}{4}D^2$$

$$v\frac{\pi}{4}D^2 = \frac{\pi\ (\rho\ g\ hf)}{L\mu} * \frac{D^4}{128}$$

$$hf = \frac{vL\ \mu(128)}{4\rho\ gD^2}$$

$$hf = 32\frac{vL\ \mu}{\rho\ gD^2} \times \frac{2v}{2V}$$

$$hf = \frac{64\ v^2L\ \mu}{(D\rho v) \times (2gD)} = \frac{64\ v^2L}{\left(\frac{D\rho v}{\mu}\right) \times (2gD)} = \frac{64v^2L}{Re\ 2\ gD}$$

$$hf = \frac{64}{Re\frac{Lv^2}{2gD}}$$

1.23 Ecuación de Poiseuille

Vamos a considerar un fluido que fluye a través de un tubo como se muestra en la figura.

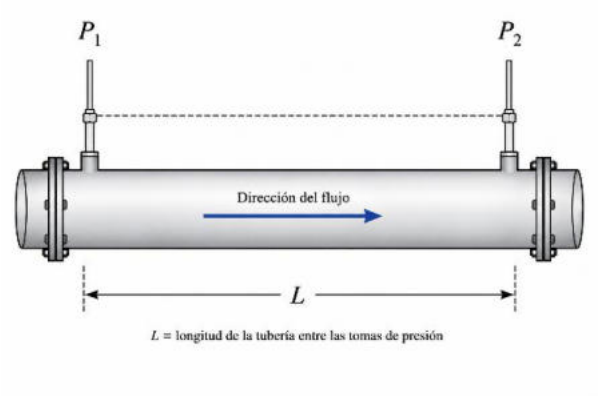


Figura 35. Elemento de área de un tubo conductor.

Elemento de área de un tubo conductor

F= PA La fuerza aplicada sobre el fluido causa una diferencia presión P1 - P 2

Junto con el área transversal $F = (P_1 - P_2)\pi\ r^2$

Pero τ = deformación de corte $\tau = \frac{F}{2\pi rL}$ fuerza dividida por el área lateral del cilindro de radio r y longitud L.

$$\tau = (P_1 - P_2)\frac{\pi\ r^2}{2\pi\ rL}$$

$$\tau = (P_1 - P_2)\frac{r}{2L}$$

La velocidad es siempre positiva y va decreciendo al aproximarse a la pared del tubo $\frac{dv}{dr}$ y es una cantidad negativa, por la ley de la viscosidad de Newton $\tau = -\mu\frac{dv}{dr}$. Igualando las dos ecuaciones tenemos:

$$(P_1 - P_2)\frac{r}{2L} = -\mu\frac{dv}{dr}$$

$$dv = \frac{-(P_1 - P_2)\, r\, dr}{2L\mu}$$

$$\int_0^v dv = \frac{-(P_1 - P_2)}{2L\mu}\int_R^r r\, dr$$

$$v = \frac{-(P_1 - P_2)}{2L\mu}\left[\frac{r^2}{2}\right]_R^r$$

Por las condiciones de los alrededores

$$r = R$$
$$v = 0, Integrando$$

$$v = \frac{-(P_1 - P_2)}{2L\mu}\frac{1}{2}\{r^2 - R^2\}$$
$$v = \frac{(P_1 - P_2)}{2L\mu}\frac{1}{2}\{R^2 - r^2\}$$

$$v = \frac{(P_1 - P_2)}{4L\mu}\{R^2 - r^2\}$$

La velocidad promedio puede ser determinada por las condiciones de volumen que fluye a través de un cilindro de radio dr entonces, el área del cascaron es:

$$\text{área del cascaron} = \pi(r + dr)^2 - \pi r^2$$
$$= \pi(r^2 + 2rdr + dr^2) - \pi r^2$$
$$= \pi r^2 + 2\pi rdr + rdr^2 - \pi r^2$$

$$\text{area del cascaron} = 2\pi rdr + rdr^2 \qquad pero\ dr\ es\ muy\ pequeño$$

$$y\ puede\ ser\ despreciado:$$

$$\text{area del cascaron} = 2\pi rdr$$

$$El\ volumen\ que\ correa\ traves\ del\ cascaron\ es:$$

$$dQ = v\ 2\pi rdr$$

$$Q = v\ 2\pi \int_0^R rdr$$

$$Q = 2\pi \int_0^R v\ rdr$$

Q también es igual a la velocidad promedio, multiplicada por el área transversal.

$$Q = \ddot{V}\pi R^2$$

$$\ddot{V}\pi R^2 = 2\pi \int_0^R V\ rdr \qquad Igualando\ las\ ecuaciones$$

$$Sustituyendo\ el\ valor\ de\ v$$

$$\ddot{V} = \frac{2}{R^2}\int_0^R \frac{(P_1 - P_2)}{4L\mu}\{R^2 - r^2\}\, rdr$$

$$\ddot{V} = \frac{2}{R^2}\frac{(P_1 - P_2)}{4L\mu}\int_0^R \{R^2 r - r^3\}\, dr$$

$$\ddot{V} = \frac{(P_1 - P_2)}{2L\mu R^2}\left[R^2\frac{r^2}{2} - \frac{r^4}{4}\right]$$

$$\ddot{V} = \frac{(P_1 - P_2)}{2L\mu R^2}\left[\frac{R^4}{2} - \frac{R^4}{4}\right]$$

$$\ddot{V} = \frac{\Delta P}{2L\mu R^2}\left[\left(\frac{R^4}{2}\right)\left(1 - \frac{1}{2}\right)\right]$$

$$\ddot{V} = \frac{\Delta P\ R^4}{4L\mu R^2}\frac{1}{2}$$

$$\ddot{V} = \frac{\Delta P\ R^2}{8L\mu} \qquad \Delta P = \frac{8L\mu\ \ddot{V}}{R^2}$$

Esta ecuación es también llamada ecuación de Poiseuille y es básica para viscosímetros capilares, donde se puede calcular ΔP.

Si el valor de la viscosidad está expresada en unidades de ingeniería.

$$\mu = \frac{lbm}{ft - se}$$

$$v = \frac{\Delta P\ R^2}{8L\mu} \times gc$$

$$Pero \quad Q = v * A$$

$$Q = v\pi R^2$$

$$v = \frac{Q}{\pi R^2} \quad Igualando\ la\ ecuacion\ \ anterior$$

$$\frac{Q}{\pi R^2} = \frac{\Delta P\ R^2}{8L\mu}$$

$$\mu = \frac{\Delta P\ R^2\pi R^2}{8LQ}$$

$$\mu = \frac{\Delta P\ R^4 \pi}{8LQ} \qquad o\ tambien$$

$$\mu = \frac{\Delta P\ R^4 \pi}{8LQ} * gc \quad en\ el\ sistema\ \ de\ \ ingenieria$$

1.24 Pérdidas Menores

Para calcular las pérdidas de energía debido a la fricción, se utiliza la ecuación de Darcy, el valor de f está en función de Re y de la rugosidad relativa del conductor siendo $e = \frac{\varepsilon}{D}$ e = rugosidad relativa, ε =rugosidad promedio

Y se usa el diagrama de Moody, en las siguientes tablas se muestran la rugosidad promedio de algunos materiales.

Tabla 4. Rugosidad promedio de algunos materiales.

Material	**Rugosidad ε m**	**Rugosidad ε pie**
Vidrio plástico	suavidad	Suavidad
Cobre latón plomo	$1.5 * 10^{-6}$	$5 * 10^{-6}$
Hierro fundido sin revestir	$2.4 * 10^{-4}$	$8 * 10^{-4}$
Hierro fundido con revestimiento	$1.2 * 10^{-4}$	$4 * 10^{-4}$
Acero comercial	$4.6 * 10^{-5}$	$1.5 * 10^{-4}$
Hierro forjado	$4.6 * 10^{-5}$	$1.5 * 10^{-4}$

Acero remachado	$1.8 * 10^{-3}$	$6 * 10^{-3}$
concreto	$1.2 * 10^{-3}$	$4 * 10^{-3}$

1.24.1 Ejercicio 1.23:

Determinar el factor f de fricción, si está fluyendo alcohol etílico a 25 ^{0}C a 5.3 m/seg en un conducto de acero estándar de 1 ½ pulgada y 50m de longitud calibre 80. Calcular hf.

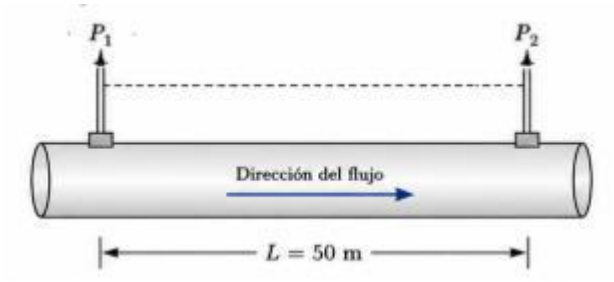


Figura 36. Factor f de fricción.

A 25°C en tablas

$$\rho = 787 \frac{Kg}{m^3}$$
$$\mu = 1 * 10^{-3} Pa - seg$$
$$D = 0.0381\ m$$

Tipo de flujo

$$Re = \frac{vD\rho}{\mu} = \frac{5(.3) * (0.0381) * (787)}{(1 * 10^{-3})}$$
$$Re = 1.59 * 10^5 \quad Flujo\ Turbulento$$
$$El\ valor\ de\ \varepsilon = 4.6 * 10^{-5} m$$

que se obtiene en tabla o con el gráfico D vs ε conociendo el materi al

$$e = \frac{\varepsilon}{D} = \frac{4.6 * 10^{-5}}{0.0381} = 1.2 * 10{-3} = 0.0012$$

$Utilizando\ el\ diagrama\ de\ Moody$

$f = 0.0022$

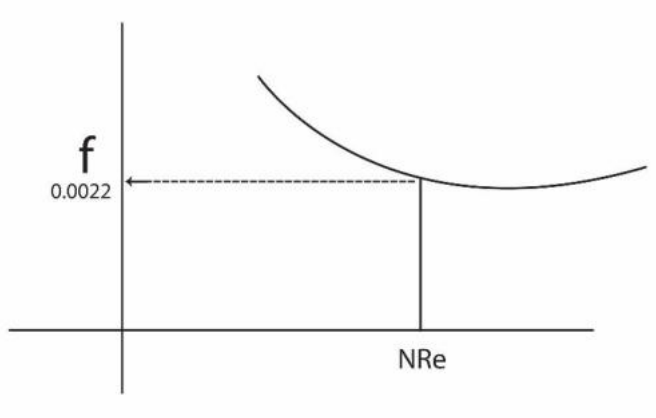


Figura 37. Ejercicio usando el diagrama moody

$Para\ calcular\ hf$

$$hf = f\frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g}$$

$$hf = 0.002 * \frac{50}{0.0381} * \frac{(5.3)^2}{2 * 9.8}$$

$$hf = \ 3.77\ m$$

1.24.2 Ejercicio 1.24:

En una planta de alimentos se traslada benceno a $50°C$ y cuyo s.g. es de 0.86, del punto A al punto B, con una presión de 550 kPa en el punto A,

una bomba que impulsa se coloca a 21m por debajo del punto B, y los 2 puntos están conectados `por 240 m del conducto de plásticos cuyo diámetro interno es de 50 mm. Siendo el flujo volumétrico de 110 L/min.

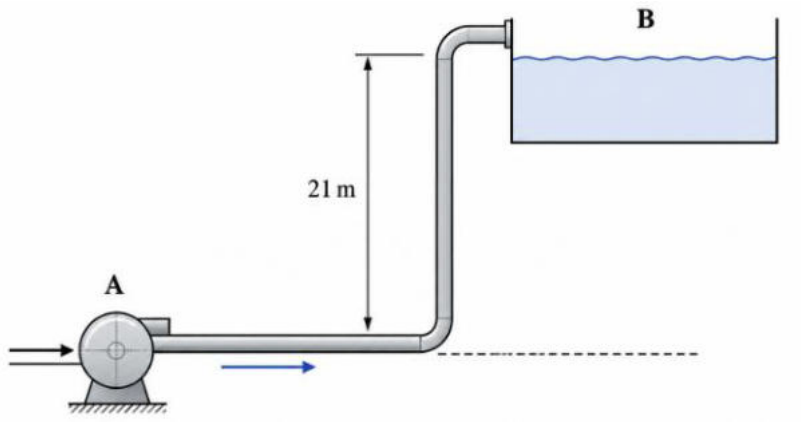


Figura 38. Flujo volumétrico de 110 L/min.

Solución: Bernoulli entre el punto A y B

$$\frac{p_A}{\gamma} + Z_A + \frac{{v_A}^2}{2g} - hf = \frac{p_B}{\gamma} + Z_B + \frac{{v_B}^2}{2g}$$

$$v_A = v_B$$

$$\frac{p_A}{\gamma} = \frac{p_B}{\gamma} + Z_B + hf$$

$$p_A = p_B + \gamma(Z_B + hf)$$

$$p_A = p_B + \gamma(21 + hf) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 1$$

$$Calculo\ de\ Q$$

$$110\frac{lts}{Min} * \frac{Min}{60\ seg} * \frac{1000cm^3}{lts} * \frac{m^3}{(100)^2 cm^3} = 1.8 * 10^3 \frac{m^3}{seg}$$

$Calculo\ \ de\ \ la\ \ velocidad$

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{1.8 * 10^3 \frac{m^3}{seg}}{1.96 * 10^3 m^2} = 0.963 m/seg$$

$Para\ benceno\ a\ 50°C \qquad s.g. = 0.86$

$\rho_{sust} = 0.86 * \rho_{agua}$

$\rho_{sust} = 0.86 * 1000 = 860\frac{Kg}{m^3}$

$\mu = 4.2 * 10^{-4} pas - seg$

$Calculo\ de\ Re$

$$Re = \frac{VD\rho}{\mu} = \frac{0.963 * 0.05 * 860}{4.2 * 10^{-4}}$$

$= 9.54 * 10^4 \quad El\ flujo\ es\ turbulento$

$Ecuacion\ de\ Darcy$

$$hf = f\frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g}$$

$Calculo\ de\ f$

$$e = \frac{\varepsilon}{D} \quad conducto\ liso\ plastico$$

$En\ grafica\ de\ Moody\ la\ \ curva\ de\ conducto\ liso\ con\ \ Re = 9.54 * 10^4$

$el\ flujo\ es\ turbulento$

$$f = 0.018$$

$$hf = 0.018 * \frac{240}{0.05} * \frac{0.932}{2(9.81)}$$

$$hf = 3.83m$$

$$Calculo\ de\ la\ presion\ en\ A \quad En\ ecuacion\ 1$$

$$p_A = p_B + \gamma(21 + hf)$$

$$\gamma = 0.86 \frac{9.81\ kN}{m^3} = 8.436 \frac{kN}{m^3}$$

$$p_A = 550KPa + (21 + 3.83)m + 8.436 \frac{kN}{m^3}$$

$$p_A = (550 + 209.31)KPas$$

$$p_A = 759KPas$$

1.24.3 Ejercicio 1.25:

Determinar la energía necesaria para pasar 50lts/min de leche a través de 200m de una tubería de acero inoxidable horizontal con 3.50 cm de diámetro interno, la temperatura de la leche es de 20°C.

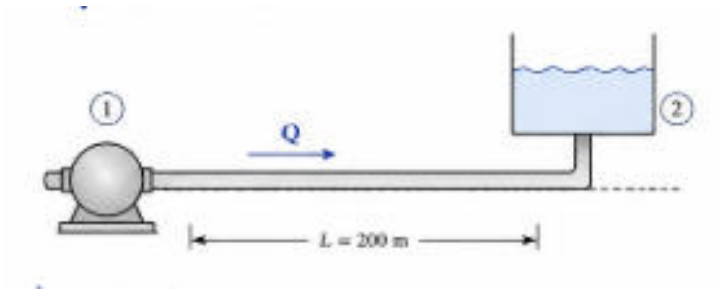


Figura 39. Tubería de acero inoxidable horizontal.

Solución, Área, Velocidad del fluido

$$A = \frac{\pi}{4}(3.5)^2 \frac{cm^2 m^2}{10^4 cm^2} = 9.6 * 10^{-4} m^2$$

$$v = \frac{Q}{A} = 50\ \frac{L}{min} \times \frac{1000\ cm^3}{L} \times \frac{m^3}{(100\ cm)^3} \times \frac{min}{60\ s} \times \frac{1}{9.6 * 10^{-4}\ m^2} = 0.868\ m/s$$

Con 20 °C, en apéndice:

$$\mu = 4.12 \times 10^{-3}\ \frac{kg}{m \cdot s}$$

$$\rho = 1028\ \frac{kg}{m^3}$$

Número de Reynolds:

$$Re = \frac{vD\rho}{\mu} = \frac{(1028\ kg/m^3)(0.035\ m)(0.868\ m/s)}{4.12 \times 10^{-3}\ kg/(m \cdot s)}$$

$$Re = 1.47 \times 10^4 \quad Flujo\ turbulento$$

En tabla $\varepsilon = 0.000152$

$$e = \frac{\varepsilon}{D} = \frac{0.000152cm}{3.5cm} = 0.000043$$

Utilizando el diagrama de Moody:

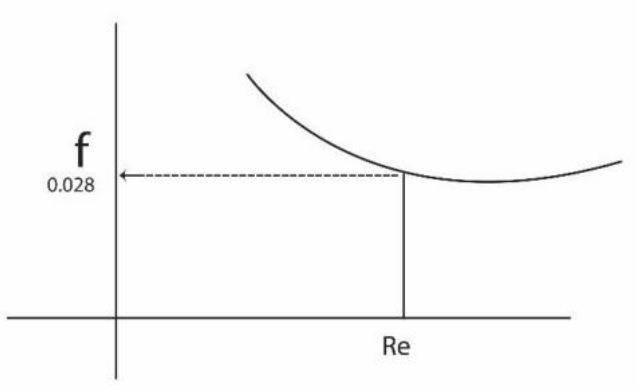


Figura 40. Ejercicio 1.25 con el diagrama de Moody.

Cálculo de la caída de presión utilizando la ecuación de Darcy

$$hf = f\frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g}$$

$$hf = 0.028 * \frac{200}{0.035} * \frac{(0.868)^2}{2 * 9.8}$$

$$hf = 6.15m\ de\ fluido$$

1.24.4 Ejercicio 1.26:

Cuál será la viscosidad de un fluido que tiene una presión de 2lbf/pulg^2 mientras fluye a una razón de 0.6 gal/min, a través de un tubo de 10 ft teniendo un diámetro interno de 0.5 pulg expresar la viscosidad en lbm/lbf-seg.



Figura 41. Viscosidad de un fluido.

$$\mu = \frac{\Delta P\ \pi\ R^4\ gc}{8\ L\ Q} = \frac{(lbf/ft^2)(ft)^4(ft \cdot lbm)/(lbf \cdot s^2)}{ft \cdot ft^3/s}$$

$$\mu = \frac{lbm}{ft \cdot s}$$

$$\Delta P = 2\ \frac{lbf}{in^2} \times \frac{144\ in^2}{ft^2} = 288\ \frac{lbf}{ft^2}$$

$$R = 0.5\ in \times \frac{ft}{12\ in} = \frac{0.5}{12}\ ft$$

$$Q = 0.6\ \frac{gal}{min} \times \frac{ft^3}{7.48\ gal} \times \frac{1\ min}{60\ s} = \frac{0.6}{7.48\ \times\ 60}\ ft^3/s$$

$$L = 10\ ft$$

$$\mu = \frac{(288\ lbf/ft^2)\ \pi\ (0.5/12)^4\ ft^4\ \times\ 32.2\ (ft \cdot lbm)/(lbf \cdot s^2)}{8\ \times\ 10\ ft\ \times\ [(0.6/(7.48\ \times\ 60))\ ft^3/s]}$$

$$\mu = 0.0513\ \frac{lbm}{ft \cdot s}$$

1.25 Método de Kármán

Kármán arreglo los grupos de la gráfica de Moody de tal manera que la velocidad apareciera en tan solo uno de los nuevos grupos.

$$Re = \frac{Dv\rho}{\mu}, \quad f = \frac{2gD}{v^2L}, \quad e = \frac{\varepsilon}{D}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{1}{\sqrt{[(2ghf)/(Lv^2)]}} = \frac{v}{\sqrt{[(2gD\ hf)/L]}}$$

$$Re\sqrt{f} = \frac{Dv\rho}{\mu} \times \frac{\sqrt{[(2gD\ hf)/L]}}{v} = \frac{\rho}{\mu}\sqrt{\frac{2gD^3\ hf}{L}} = N\ Kármán$$

Entonces considerando los grupos $Re\sqrt{f}$,$\frac{1}{\sqrt{f}}$, y obtener un nuevo gráfico, y se gráfica $\frac{1}{\sqrt{f}}$ contra $Re\sqrt{f}$ y a valores constantes de e, obtuvo la llamada gráfica de Kármán.

PASOS:

1. De la figura (1) obtener $e = \frac{\varepsilon}{D}$

2. Calcular $Re\sqrt{f} = \frac{\rho}{\mu}\sqrt{\frac{2g\ D^3\ hf}{L}}$

3. Del gráfico de Kármán para valores de e y $Re\sqrt{f}$ obtener $\frac{1}{\sqrt{f}}$

4. Calcular $v = \frac{1}{\sqrt{f}} * \sqrt{\frac{2g\ D^3\ hf}{L}}$

5. Calcular Q = v*A

Tabla 5. Dimensiones de cañerías de acero.

Diámetro Nominal in	**Diámetro externo in**	**Cédula**	**Grosor metálico in**	**Diámetro interior in**	**Área metálica in^2**	**Área de flujo ft^2**	**Peso por pie de cañería lbf**
1/8	0.405	40	0.058	0.269	0.072	0.00040	0.25
		80	0.95	215	0.093	0.00025	0.32
¼	0.540	40	0.88	364	0.125	0.00072	0.43
		80	119	302	0.157	0.00050	0.54
3/8	0.675	40	0.91	493	0.167	0.00133	0.57
		80	126	423	0.217	0.0098	0.74
½	0.840	40	109	622	0.250	0.0211	0.85
		80	147	546	0.320	0.0163	1.09
¾	1.050	40	113	824	0.333	0.00371	1.13
		80	154	742	0.433	0.0300	1.48

1	1.315	40	133	1.049	0.494	0.0600	1.68
		80	179	0.957	0.639	0.00499	2.17
11/4	1.660	40	140	1.380	0.669	0.1040	2.28
		80	191	1.278	0.881	0.00891	3.00
11/2	1.900	40	145	1.610	0.799	0.01414	2.72
		80	200	1.500	1.068	0.1225	3.64
2	2.365	40	154	2.067	1.075	0.2330	3.66
		80	218	1.939	1.477	0.2050	5.03
21/2	2.875	40	203	2.469	1.704	0.3322	5.80
		80	276	2.323	2.254	0.02942	7.67
3	3.500	40	216	3.068	2.228	0.5130	7.58
		80	300	2.900	3.016	0.4587	10.30
31/2	4.00	40	226	3.548	2.680	0.6870	9.11
		80	318	3.364	3.678	0.6170	12.50

4	4.500	40	237	4.026	3.173	0.8840	10.80
		80	337	3.826	4.407	0.7286	15.00
5	5.563	40	258	5.047	4.304	0.1390	14.70
		80	375	5.813	6.112	0.1263	20.80
6	6.625	40	280	6.065	5.584	0.2006	19.00
		80	432	5.761	8.405	0.1810	28.6
8	8.625	40	322	7.981	8.396	0.3474	28.6
		80	500	7.625	12.76	0.3171	43.4
10	10.75	40	365	10.020	11.90	0.5475	40.5
		80	593	9.564	18.92	0.4989	64.4
12	12.75	40	406	11.938	15.77	0.7773	53.6
		80	0.687	11.376	26.3	0.7058	88.6

1.25.1 Ejemplo 1.27:

Determinar la razón de flujo de gas natural metano en una cañería de acero de 12'' y 3 millas de largo a $70°F$ si la presión decrece de 75 a 60 PSIA, hf=15 PSIA

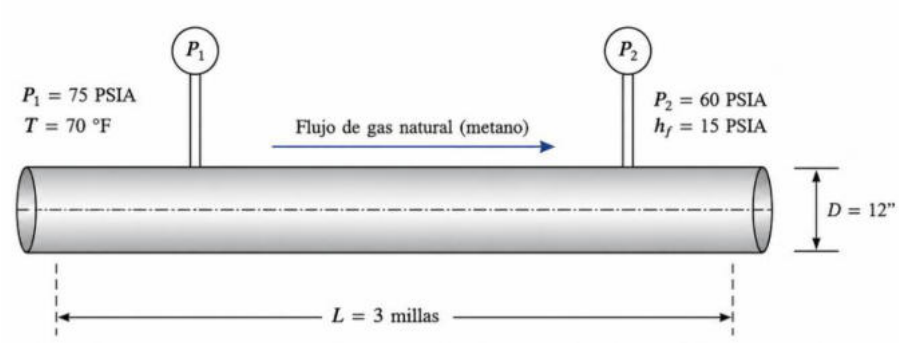


Figura 42. Flujo de gas natural metano.

Solución:

$$\rho = 0.232\frac{lbm}{ft^3}\ ,\ A = 0.773ft^2 \quad En\ tablas$$

$$\mu_{CH_4}: \quad x = 9.9\ ,\ y = 15.5\ a\ 70°F\ ,\ \mu = 0.0108Cpoise$$

$$\mu = 0.0108Cpoise * 2.4\frac{\frac{lbm}{ft-hr}}{cpoise} * \frac{hr}{3600seg} = 7.25 * 10^{-6}\frac{lbm}{ft-seg}$$

PASOS:

1. De la figura 1, para cañería de acero de 12'' e=0.15*10$^{-3,}$ (e puede ser igual a r.)

2.

$$Re\sqrt{f} = \frac{\rho}{\mu}D^{3/2}\sqrt{\frac{2g\ hf}{L}}$$

$$D = \frac{11.938}{12} = 0.998ft\ ;\ D^{3/2} = (0.998)^{3/2} = 0.99$$

$$hf = 15\frac{lbf}{in^2} * \frac{144\frac{in^2}{ft^2}}{0.232\frac{lbf}{ft^3}} = 9340ft\ metano$$

$$Re\sqrt{f} = \frac{0.232\frac{lbm}{ft^3} * 0.997ft^{3/2}}{7.25 * 10^{-6}\frac{lbm}{ft-seg}} * \sqrt{\frac{2 * 32.2\frac{ft}{seg^2} * 9340ft}{3millas * 528\frac{ft}{millas}}}$$

$$Re\sqrt{f} = 1.96 * 10^5$$

3. Del gráfico de Kármán $\frac{1}{\sqrt{f}}$= 8.53

Luego

$$v = \frac{1}{\sqrt{f}} \times \sqrt{\frac{2ghfD}{L}} = 8.53\sqrt{\frac{9340\ ft \times 64.4\ ft/s^2 \times 0.998\ ft}{3 \times 5280\ ft}}$$

$$v = 52.5\ \frac{ft}{s}$$

4 La descarga Q = v*A

$$Q = 52.5\frac{ft}{seg} * 0.773ft^2$$

$$Q = 40.7\frac{ft^3}{seg}$$

1.25.2 Ejercicio 1.28:

Se descarga agua a 30C desde un tanque de gran diámetro, cuyo nivel puede considerarse constante a través de una tubería d acero estándar de 10m de longitud y diámetro nominal de 1 pulg. Presenta con los

accesorios y válvulas. Calcular el valor del gasto a través de la tubería de descarga

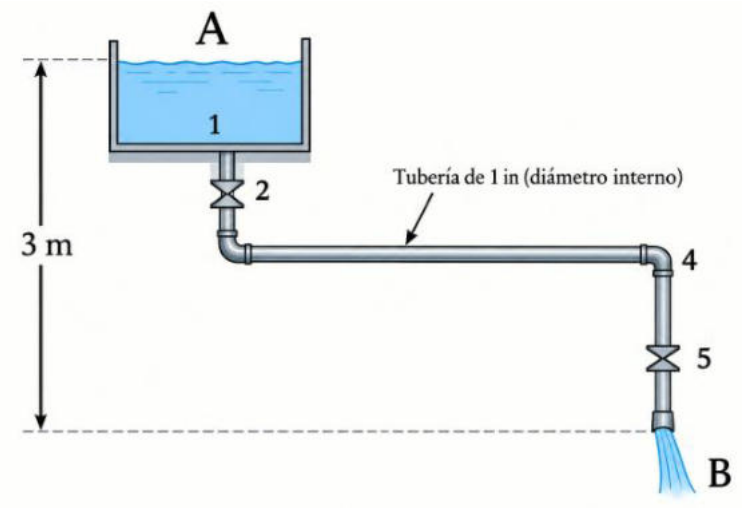


Figura 43. Tanque de gran diámetro.

4. Entrada al tubo

5. válvula de compuerta abierta

6. 4. codos estándar 90

2. válvula de asiento ½ abierto

Solución:

Bernoulli entre A y B

$$\alpha_A \frac{{V_A}^2}{2} + \frac{P_A}{\rho} + gZ_A = \alpha_B \frac{{V_B}^2}{2} + \frac{P_B}{\rho} + gZ_B + \sum Fp$$

$$\sum Fp = gZ_A - \alpha_B \frac{{V_B}^2}{2}$$

$$\sum Fp = (3 - 9.8) - \alpha_B \frac{{V_B}^2}{2} = 29.43 - \alpha_B \frac{{V_B}^2}{2}$$

Utilizando las longitudes equivalentes para calcular hf

$$\sum F\ hf = \frac{f\ Le\ V^2}{2\ D} = \left(29.43 - \alpha_B \frac{{V_B}^2}{2}\right) {Joul}/{Kg}$$

El término $\alpha_B \frac{{V_B}^2}{2}$ es muy pequeño, cerca de cero.

$$\sum Fhf = 29.43 {Joul}/{Kg}$$

Con la siguiente ecuación para calcular la velocidad:

$$Re\sqrt{f} = \frac{D\ \rho}{\mu}\sqrt{\frac{2D\sum F\ h\grave{f}}{Le}}$$

$$\sum Fhf\ total$$

$$Le = L + \sum Leg$$

$$\rho = 995 \frac{Kg}{m^3}$$

$$\mu = 0.8\ cpoiese$$

$$e = 0.2mm$$

$$D = 26.6mm$$

$$Por\ tanto$$

$$\varepsilon = \frac{e}{D} = \frac{0.2}{26.6} = 7.519 * 10^{-3}$$

Tabla 6. Cálculo de la longitud equivalente.

Accesorio	1	2	3	4	5
Turbulento	0.5	0.17	0.75	0.75	9

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

$$f = \frac{1}{4\left(log\frac{3.7}{\varepsilon}\right)^2} = \frac{1}{4\left(log\frac{3.7 * 10^3}{7.519}\right)^2} = 0.0345$$

$$\frac{\sum Le_1}{D} = \frac{\sum K_{1_{TURB}}}{f}$$

$$\sum Le_1 = \frac{\sum K_{1_{TURB}}}{f} D = \frac{11.17}{0.0345} * 0.0266 = 8.61m$$

$$Le_{total} = L + \sum Le = 10 + 8.61 = 18.61m$$

$$Re\sqrt{f} = \frac{D\ \rho}{\mu}\sqrt{\frac{2D\sum F\ h\grave{f}}{Le_{total}}}$$

$$Re\sqrt{f} = \frac{0.0266 * 995.7}{0.8 * 10^{-3}}\sqrt{\frac{2(0.0266)(29.43)}{18.61}} = 9602$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{V}{\sqrt{2\left(\frac{D}{Le}\right)\sum F\ h\grave{f}}}$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\,log\left[\frac{\varepsilon}{3.4} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}}\right]$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\,log\left[\frac{7.519 * 10^{-3}}{3.4} + \frac{2.51}{9602}\right]$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 5.28$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 5.28 = \frac{V_B}{\sqrt{\frac{2 * 0.0266 * 29.43}{18.61}}}$$

$$V_B = 1.53 m/seg$$

$$Caudal$$

$$Q = V_B * A = (1.5 m/seg) * \frac{\pi}{4}(0.0266)^2 = 8.34 * 10^{-4} m^3/seg$$

1.26 BANCO DE PREGUNTAS

Parte I: Preguntas Teóricas

1. ¿Cuál de las siguientes opciones describe mejor a un fluido newtoniano?

a) Su viscosidad cambia con la velocidad de corte.

b) No fluye ante esfuerzos cortantes pequeños.

c) Presenta una relación lineal entre esfuerzo cortante y velocidad de deformación.

d) Es siempre compresible.

2. El flujo laminar se caracteriza por:

a) Trayectorias irregulares y remolinos.

b) Capas de fluido que se deslizan suavemente unas sobre otras.

c) Un número de Reynolds mayor a 4000.

d) Mezcla caótica de partículas.

3. El número de Reynolds se utiliza para:

a) Determinar la densidad del fluido.

b) Calcular la pérdida de energía por fricción.

c) Clasificar el régimen de flujo.

d) Medir la presión en tuberías.

4. ¿Qué principio físico fundamenta la ecuación de continuidad?

a) Conservación de la energía.

b) Conservación de la masa.

c) Conservación del momento.

d) Segunda ley de la termodinámica.

5. En la ecuación de Bernoulli, el término ($v^2/2g$) representa:

a) Energía térmica.

b) Energía potencial.

c) Energía cinética por unidad de peso.

d) Energía disipada por fricción.

6. En un flujo incompresible y estacionario, la ecuación de Bernoulli se cumple solo si:

a) Existen pérdidas por fricción.

b) Se añade energía térmica.

c) No hay pérdidas de energía mecánica.

d) La temperatura varía con la posición.

7. ¿Cuál de los siguientes factores NO influye en el régimen de flujo?

a) Diámetro del tubo.
b) Viscosidad del fluido.
c) Color del fluido.
d) Velocidad promedio.

8. ¿Qué relación describe la ecuación de Poiseuille?

a) Pérdidas menores por accesorios.
b) Flujo laminar en un tubo circular.
c) Flujo turbulento en canales abiertos.
d) Expansión isotérmica del gas.

9. ¿Qué muestra el diagrama de Moody?

a) La eficiencia de las bombas centrífugas.
b) El coeficiente de descarga de un Venturi.
c) La relación entre el factor de fricción, Re y la rugosidad relativa.
d) La variación de la viscosidad con la temperatura.

10. ¿Qué representa físicamente la pérdida de carga (hf) en una tubería?

a) La energía ganada por el fluido.
b) La energía pérdida por fricción.
c) La energía interna del fluido.
d) La potencia suministrada por una bomba.

Parte II: Ejercicios Aplicados

11. Por una manguera de 10 cm de diámetro se llena un recipiente de 20 L en 1 minuto. ¿Cuál es la velocidad del flujo?

a) 0.0043 m/s
b) 0.043 m/s
c) 0.43 m/s
d) 4.3 m/s

12. En una tubería de 2 pulgadas de diámetro fluye agua con 3 m/s, y luego se reduce a 1 pulgada. ¿Cuál será la nueva velocidad?

a) 6 m/s
b) 9 m/s
c) 12 m/s
d) 3 m/s

13. Si el número de Reynolds calculado para un fluido es 1800, el régimen de flujo será:

a) Turbulento
b) Transicional
c) Laminar
d) Inestable

14. En una tubería de 20 m de longitud y 40 mm de diámetro fluye agua con v = 2 m/s y f = 0.02. La pérdida de carga (hf) será aproximadamente:

a) 0.5 m

b) 1.0 m

c) 2.0 m

d) 4.0 m

15. En una tubería circular de 0.025 m de diámetro, fluye aceite ($\rho = 850$ kg/m³, $\mu = 0.12$ Pa·s) a 2 m/s. El número de Reynolds es:

a) 354 (laminar)

b) 1250 (transicional)

c) 4000 (turbulento)

d) 8750 (turbulento)

CAPÍTULO II

2 MANOMETRÍA Y MEDICIÓN DE PRESIÓN

El segundo capítulo se centra en la medición de presión, una variable clave en la operación segura y eficiente de los sistemas de transporte de fluidos. Se presentan los distintos tipos de manómetros y columnas de líquido, así como los principios físicos que permiten su funcionamiento. Se incluyen diagramas y ejercicios prácticos que fortalecen la comprensión del estudiante.

Objetivo general

Explicar los principios de la manometría y aplicar los métodos más comunes para la medición de presión en sistemas hidráulicos.

Objetivos específicos

1. Definir los conceptos de presión absoluta, manométrica y atmosférica.
2. Describir el funcionamiento de manómetros de tubo en U, manómetros diferenciales y de Bourdon.
3. Analizar sistemas de medición con columnas de líquido.
4. Aplicar ecuaciones manométricas para determinar presiones en diferentes configuraciones.
5. Interpretar instrumentos de medición en diagramas y esquemas de proceso.

2.1 Manometría

Es la rama de la mecánica que estudia el efecto de las fuerzas en la forma y movimiento de los fluidos. Se divide en Estática que estudia a los fluidos en reposo y en Dinámica que estudia a los fluidos en movimiento. Principio Fundamental de la manometría dos puntos dentro de un mismo fluido en reposo y a la misma altura tienen la misma presión. (Peixoto et al., 2023)

2.2 Tipos de Manómetros

Los manómetros industriales son esenciales para monitorizar y controlar la presión en una amplia gama de procesos industriales. Investigaciones recientes destacan avances significativos tanto en tecnologías tradicionales como innovadoras de detección de presión, centrándose en mejorar la precisión, la durabilidad y la integración con sistemas digitales. La intensidad de la presión se conoce mediante instrumentos llamados manómetros, esto indica una diferencia de presión, entre la presión del fluido y la presión de la atmósfera que se utiliza como referencia o comparación. (Wang et al., 2025)

El tipo más sencillo de manómetro es el tubo en U, un extremo del tubo está conectado a la presión que se va a medir, mientras que el otro está abierto a la atmósfera, el tubo contiene un líquido conocido y se denomina fluido Newtoniano que no se mezcla con el fluido cuya presión se va a determinar, así el mercurio y los aceites ligeros.

Tabla 7. Tipos de Manómetros.

LÍQUIDO	ge (20/20)
Mercurio	13.6
Tolueno	0.86
Alcohol Etílico	0.78
Tetracloruro de Acetileno	2.96
Tetracloruro de Carbono	1.59

Hay dos clases de manómetros los mecánicos y los líquidos de mercurio, dentro de ellos los más definidos son los mecánicos Bourdon.

Manómetros líquidos Se basan en el principio de los vasos comunicantes y en el principio fundamental de la manométrica.

2.2.1 Tubo Piezométrico

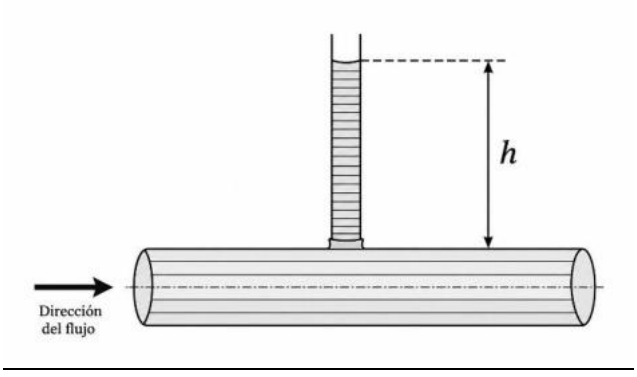


Figura 44. Tubo Piezométrico.

En la gráfica la altura h representa la diferencia de presión entre el líquido y la presión atmosférica, se utiliza la presión manométrica, y se lo expresa en pies, pulgadas. Cm, m de fluido.

2.2.2 Tubo en U Abierto

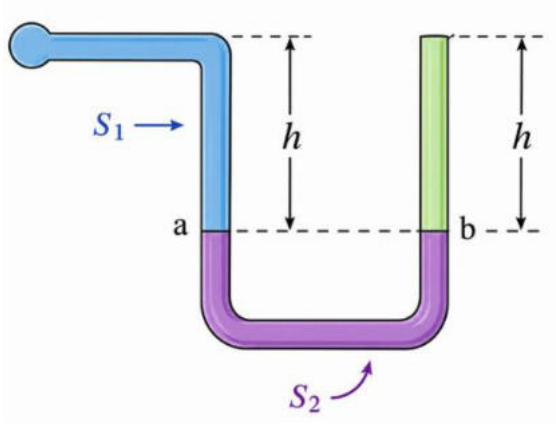


Figura 45. Tubo en U Abierto.

$$S = gravedadespecifica \quad = ge \quad = sg$$

$$\gamma = pesoespecifico$$

$$PA, Pa, Pbs\ en\ presiones\ gage\ en\ PSI, Psf$$

$$\frac{Kg}{cm^2}\ ,\ \frac{Kg}{m^2}\ ,\ \frac{N}{m^2}$$

Utilizando el principio fundamental de la manometría conociendo S, γ_{H20}

$$Pa = Pb$$

$$PA + h_1 S_1 \gamma_{H2o} = h_2 S_2 \gamma_{H2O} + Pa$$

$$PA = h_2 S_2 \gamma_{H2o} - h_1 S_1 \gamma_{H2O}$$
$$PA = \gamma_{H2O}(h_2 S_2 - h_1 S_1)$$

2.2.3 Manómetro Diferencial

Es aquel que no está abierto a la atmósfera y nos da la lectura de la diferencia de presiones entre dos puntos de presión conocida, utilizando la gravedad específica del fluido y el peso específico del agua.

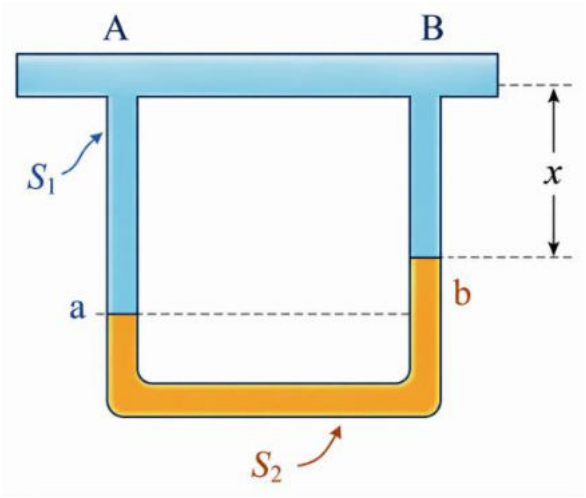


Figura 46. Manómetro Diferencial.

$$Pa = Pb$$

$$PA + xS\gamma_{H2O} + hS_1\gamma_{H2O} = PB + xS_1\gamma_{H2O} + hS_2\gamma_{H2O}$$

$$PA - PB = h\ S_2\gamma_{H2O} - hS_1\gamma_{H2O}$$

$$\frac{PA - PB}{\gamma_{H2O}} = h(S_2 - S_1) \quad en\ ft\ de\ agua$$

2.2.4 Tubo en U de dos fluidos

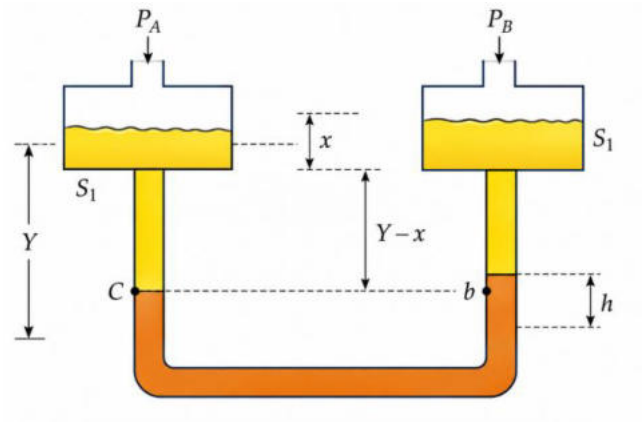


Figura 47. Tubo en U de dos fluidos.

En el siguiente gráfico determinar

$$\frac{\text{PA-PB}}{\gamma_{\text{H2O}}}$$

2.2.5 Manómetros mecánicos

Tipo Bourdon Constan de una parte hueca que tiene un resorte en forma de C hueco y en cuyo interior actúa la presión, la lectura se mide al expandirse el resorte unida a una pluma que mide en unidades de presión, estos instrumentos miden la presión relativa (manométrica, gage)

2.2.6 Ejercicio 2.1:

La presión del aire en un tanque es suficiente para sostener una columna de 500 mm Hg Encontrar la presión absoluta en el tanque en pascales, si la presión atmosférica es de 95 kilopascales y la densidad del mercurio

es de 13600 kg/m3 suponer que la presión en el punto es igual a la presión del tanque.

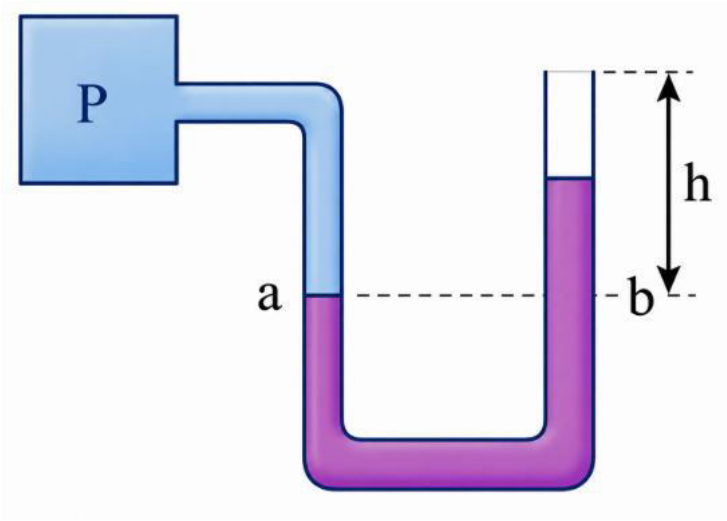


Figura 48. Presión del aire en un tanque.

$$P_{\mathrm{a}} = P_{\beta}$$

$$P_{\mathrm{a}} = P_{\mathrm{a}} = Ptanque$$

$$P_{\beta} = \rho h = 13.6 \times 10^{3}\,\frac{kg}{m^{3}} \times 0.5\,m = 6.8 \times 10^{3}\,\frac{kg}{m^{2}}$$

$$P_{\beta} = 6.8 \times 10^{3}\,\frac{kg}{m^{2}} \times \frac{9.8\,N}{kgf} = 6664\,\frac{N}{m^{2}} = 6664\,pascal$$

$$Ptanque = Patmosf + Phidrostática$$

$$Ptanque = (95 + 6.4)\,kPa$$

$$Ptanque = 1.0164 \times 10^{5}\,pascal$$

En atmósferas:

$$1.0164 \times 10^5 \frac{N}{m^2} \times \frac{kgf}{9.8\ N} \times \frac{atm \cdot in^2}{4.7\ lb} \times \frac{2.2\ lb}{kg} \times \frac{m^2}{39.37^2\ in^2}$$

$$P = 0.6269\ atm$$

2.2.7 Ejercicio 2.2:

En la figura siguiente calcular la presión A.

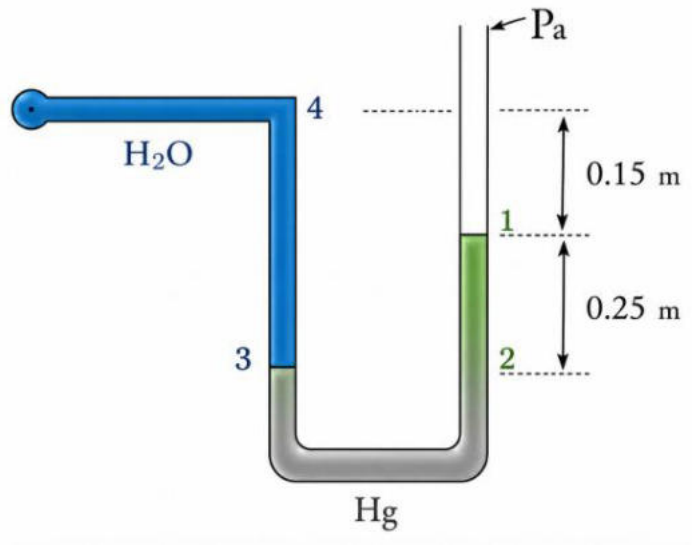


Figura 49. Ejercicio de presión.

Utilizando Peso Específico $\gamma_{H2O} = 9.8k \frac{N}{m^3}$

$$P2 = P3 \qquad P = \gamma h$$

$$0.25m\gamma_{Hg} + P = PA + 0.4m\gamma_{H2O}$$

$$PA = 0.25m\gamma_{H2O} - 0.4m\gamma_{H2O}$$

$$\gamma_{Hg} = S_{Hg} \times \gamma_{H2O} = 13.6 \times 9.81k\frac{N}{m^3} = 132.8k\frac{N}{m^3}$$

$$\gamma_{H2O} = 5 \times \gamma_{H2O} = 1 \times 9.81k\frac{N}{m^3} = 9.81k\frac{N}{m^3}$$

$$PA = 0.25m \times 132.8k\frac{N}{m^3} - 0.4m \times 9.81k\frac{N}{m^3}$$

$$PA = (33.2 - 3.92)k\frac{N}{m^2}$$

$$PA = 29.28k\frac{N}{m^2} = 29.28kPascal$$

2.2.8 Ejercicio 2.3:

En el siguiente gráfico calcular la presión en el punto B si $PA = 22.4\frac{Lbf}{in^2}$ manométrica.

Utilizar $\Delta P = \gamma h$

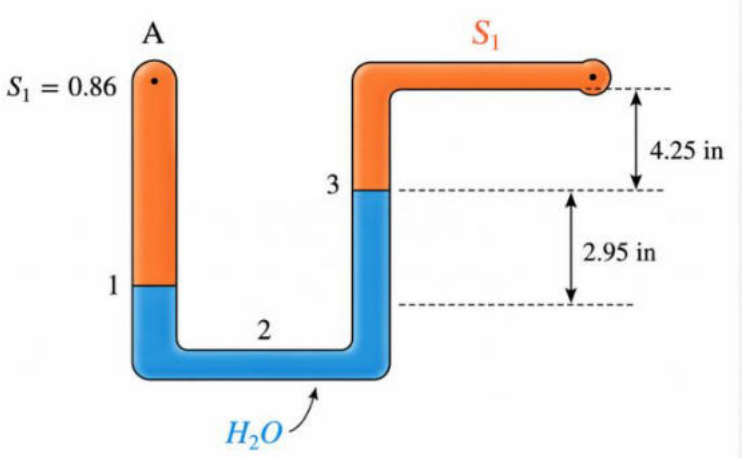


Figura 50. Presión en el punto B.

$$\gamma aceite = S_1\gamma_{H2O} \qquad \gamma_{H2O} = 62.4\frac{Lbf}{ft^3}$$

$$\gamma aceita = 0.86 \times 62.4\frac{Lbf}{ft^3} \times \frac{ft^3}{12^3 in^3} = 0.036\frac{Lbf}{in^3}$$

$$P1 = P2$$

$$22.4\frac{Lbf}{in^2} + 33.75in \times 0.031\frac{Lb}{in^3}$$

$$= Pb + 29.5in \times 0.036\frac{Lb}{in^3} + 2.25in \times 0.031\frac{Lb}{in^3}$$

$$23.44\frac{Lbf}{in^2} = Pb + 1.1196PSI$$

$$Pb = (23.44 - 1.1196)PSI$$

$$Pb = 22.24PSI$$

2.2.9 Ejercicio 2.4:

En la figura calcular la altura h

Usar $P = \rho\ h$

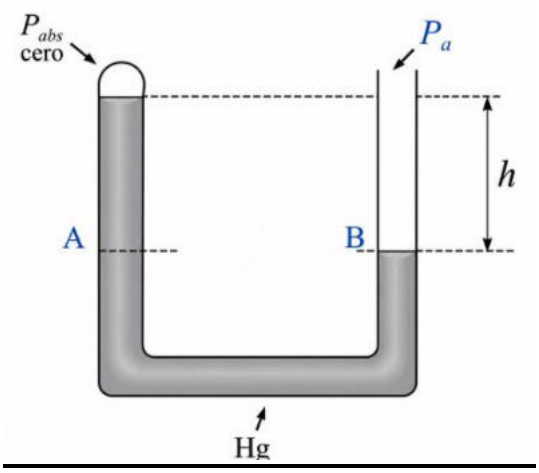


Figura 51. Altura h.

$$PA = PB$$

$$\rho_{Hg}\ h_{Hg}\left({}^{g}/_{gc}\right) = haire \times \rho aire\left({}^{g}/_{gc}\right)$$

$$h_{Hg} = \frac{haire \times \rho aire}{\rho hg} = \frac{PB}{\rho hg} = \frac{Patmosf}{\rho hg}$$

$$h_{Hg} = \frac{1.033\ {}^{Kgf}/_{cm^2}}{13.6\ {}^{Kgf}/_{dcm^3}} \times \frac{10^3 cm^3}{1\ dcm^3}$$

$$h_{Hg} = 76\ cmHg$$

2.2.10 Ejercicio 2.5:

Sustituyendo en el ejercicio anterior el mercurio por el agua calcular la altura equivalente en m de agua correspondiente a la presión atmosférica a nivel del mar.

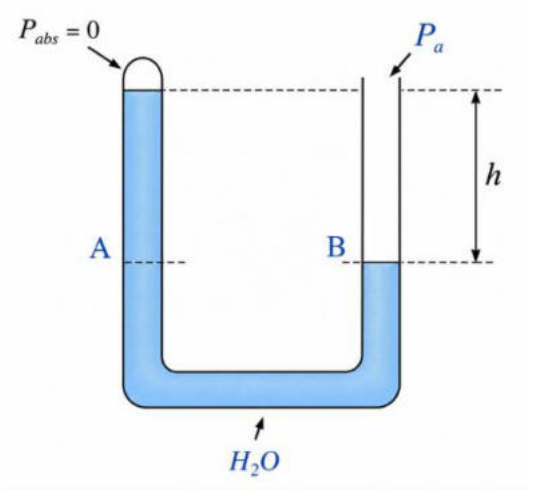


Figura 52. Altura equivalente en m de agua.

$$PA = PB$$

$$h_{Hg}\ \rho_{Hg} = h_{H2O} \times \rho_{H2O}$$

$$hH_{2O} = \frac{h_{Hg} \times \rho_{Hg}}{\rho_{Hg}} = \frac{760mmHg}{\frac{Kg}{m^3}} \times 13.6\frac{Kg}{m^3} \times \frac{m}{10^3 m}$$

$$h_{H2O} = 760 \times \frac{13.6}{10^3} mde\ H2O$$

2.2.11 Ejercicio 2.6:

Utilizando la densidad, la rama derecha está abierta a la atmósfera, encontrar PA en el interior del tubo Si:

$h1 = 60cm$

$$h2 = 120cm$$

$$Pat = 1.033\ {}^{kg}/_{cm^2}$$

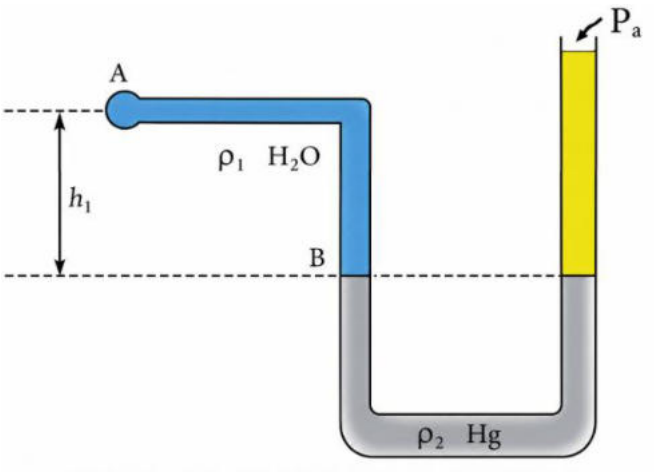


Figura 53. PA en el interior del tubo.

$$P = \rho h$$

$$PA + \rho_1 h_1 = Patm + \rho_2 h_2$$

$$PA = \rho_2 h_2 - \rho_1 h_1 + Patm$$

$$PA = 13.6 \frac{g}{cm^3} \times 120\, cm - \frac{g}{cm^3} \times 60\, cm + 1.033 \frac{kg}{cm^2}$$

$$PA = 1632 \frac{g}{cm^2} - 60 \frac{g}{cm^2} + 1.033 \frac{kg}{cm^2}$$

$$PA = 1572 \frac{g}{cm^2} \times \frac{kg}{1000\, g} + 1.033 \frac{kg}{cm^2}$$

$$PA = 2.605 \frac{kgf}{cm^2}$$

2.2.12 Ejercicio 2.7:

Manómetro diferencial, no está abierto a la atmósfera, encontrar $PA - PB = \Delta P$, utilizando la densidad.

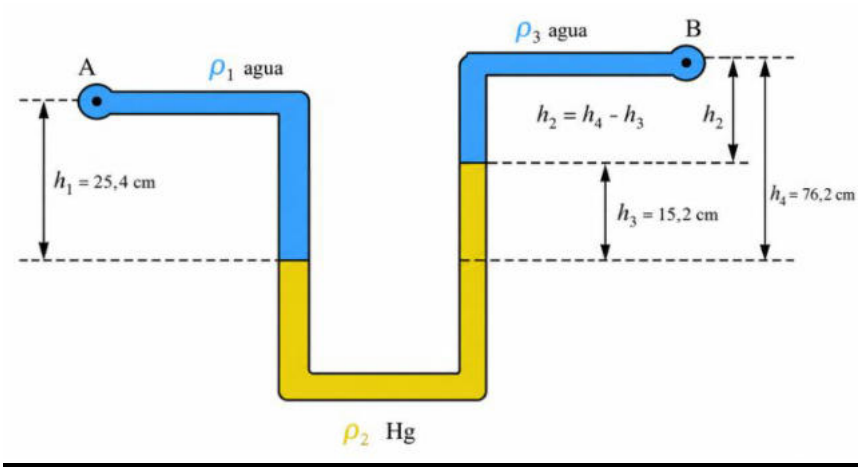


Figura 54. Manómetro diferencial.

ρ_2 *corresponde al mercurio* (Hg), ρ_1 *y* ρ_3 *corresponde al agua*

$$PC = PE$$

$$\rho\ h + PA = \rho_2 h_2 + \rho_3 (h_3 - h_2) + PB$$

$$PA - PB = \rho_2 h_2 + \rho_3 (h_3 - h_2) - \rho_1 h_1$$

$$PA - PB = 13.6 \frac{gr}{cm^3} \times 152cm + \frac{gr}{cm^3} \times (76.2 - 15.2)cm - \frac{gr}{cm^3} \times 25.4cm$$

$$PA - PB = (206.72 + 61 - 25.4) \frac{gr}{cm^2} = 242.3 \frac{grf}{cm^2}$$

$$\Delta P = 0.242 \frac{Kgf}{cm^2}$$

2.2.13 Ejercicio 2.8:

En el siguiente gráfico encontrar $PA - PB$ utilizando la densidad

$$\Delta P \quad = \quad \rho \; h.$$

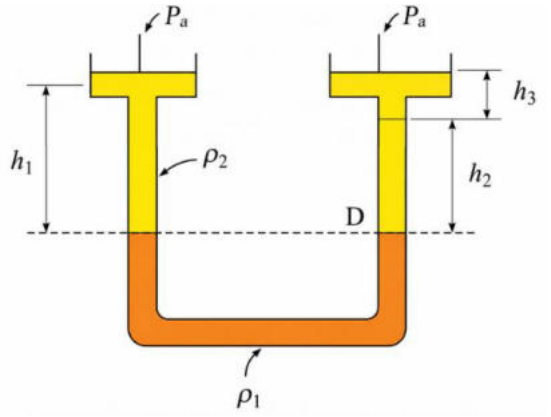


Figura 55. PA - PB

$$PC = PD$$

$$PA + \rho_2 h_1 = \rho_1 h_2 + \rho_2 h_3 + PB$$

$$PA - PB = \rho_1 h_2 - \rho_2 (h_1 - h_3)$$

$$PA - PB = \rho_1 h_2 - \rho_2 h_2$$

$$h_1 - h_3 = h_2$$

2.2.14 Ejercicio 2.9:

Un manómetro en U está en un recipiente de aire comprimido y la otra libre a la atmósfera, el líquido manométrico es mercurio y la lectura es de 10 cm. Calcular la presión absoluta dentro del tanque si la presión atmosférica es de 750 mmHg.

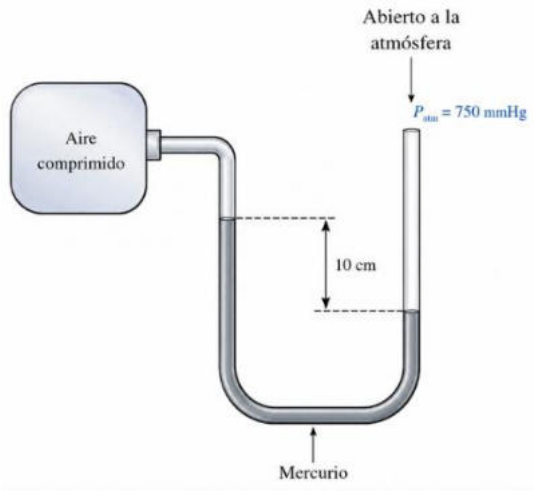


Figura 56. Manómetro en U.

$$\rho Hg = 13595 \frac{kg}{m^3}$$

$$En\ el\ SI$$

$$Pat = 750mmHg\ \times \frac{133.3Pa}{mmHg} = 99975 \frac{N}{m^2} (Pascal)$$

$$P2 = P1$$

$$PB + h_1 g \rho_1 = PA + h_2 g\ \rho_2$$

$$PB = PA + h_2\ g\ \rho_2 - h_1\ \ g\ \rho_1$$

$$PB = 99975Pas + 0.1 \times 9.8\frac{m}{sec^2} \times 13595\frac{kg}{m^3} - h_1 g\rho_1$$

$$PB = 99975\frac{N}{m^2} + 13336.69\frac{N}{m^2}$$

$$PB = 113312\frac{N}{m^2}$$

2.2.15 Ejercicio 2.10:

En el siguiente diagrama encontrar PA – PB

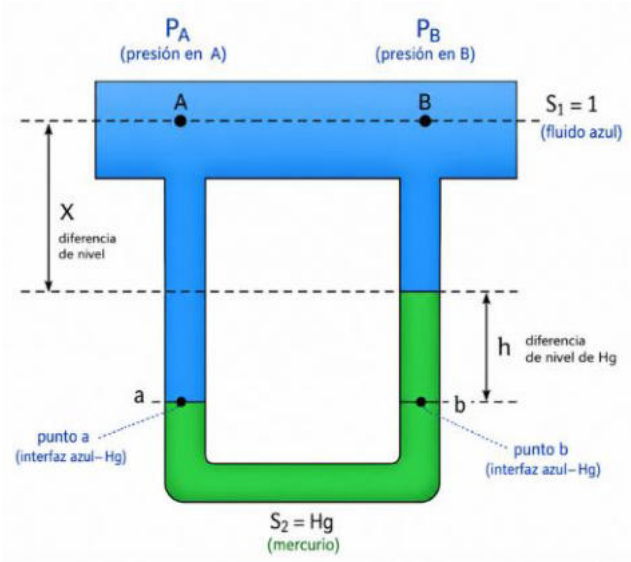


Figura 57. Diagrama para encontrar PA – PB.

Usar $\Delta P = Sh\gamma$

$$h = 3pie$$
$$S_2 = 13.6$$
$$S_1 = 1$$

$$\gamma_{H2O} = 62.4\frac{Lbf}{ft^2}$$

$$Pa = Pb$$

$$PA + S_1 x\gamma + S_1 h\ \gamma = PB + S_1\gamma x + S_2 h\gamma$$

$$PA - PB = S_1\gamma x + S_2\gamma h - S_1\gamma X - S_1\gamma h$$

$$PA - PB = S_2 h\gamma - S_1 h\gamma$$

$$PA - PB = h\gamma(S_2 - S_1)$$

$$PA - PB = 3ft\ \times\ 62.4\frac{Lbf}{ft^3}(13.6 - 1)$$

$$PA - PB = 2358\frac{Lbf}{in^2}\ \times\ \frac{ft^2}{144in^2}$$

$$PA - PB = 16.37\frac{Lbf}{in^2}$$

2.2.16 Ejercicio 2.11:

Se mide el flujo de una tubería utilizando un manómetro diferencial. Calcular P1 – P2 en pascales.

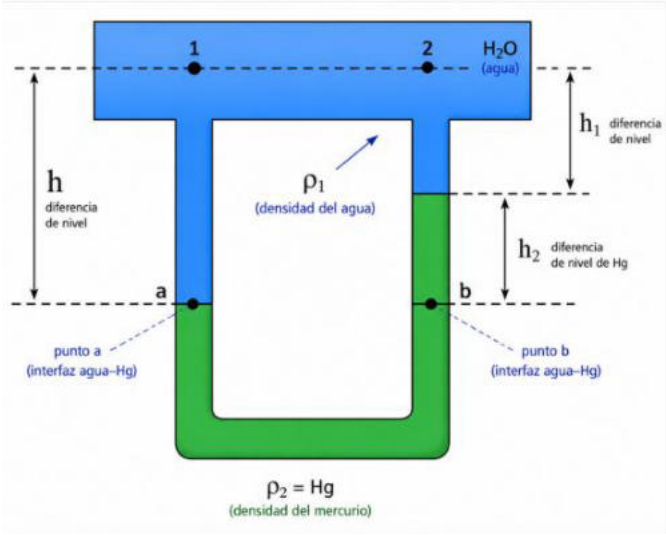


Figura 58. Flujo de una tubería.

$$Utilizar\ \Delta h = \rho g h$$

$$\rho \times g = \gamma \quad h_2 = 0.01m$$

$$\rho_{H2O} = 10^3 \frac{kg}{m^3}$$

$$\rho_2 = 10^4 \frac{kg}{m^3}$$

$$Pa = Pb$$

$$P_1 + \rho_1 g h = P_2 + \rho_1 g h_1 + \rho_2 g h_2$$

$$P_1 - P_2 = \rho_1 g h_1 + \rho_2 g h_2 - \rho_1 g h \quad ; \quad h = h_1 + h_2$$

$$P_1 - P_2 = \rho_1 g h_2 + \rho_2 g h_2 - \rho_1 g (h_1 + h_2)$$

$$P_1 - P_2 = \rho_1 g h_1 + \rho_2 g h_2 - \rho_1 g h_1 - \rho_1 g h_2$$

$$P_1 - P_2 = h_2 g(\rho_2 - \rho_1)$$

$$P_1 - P_2 = 0.01m \times 9.8\frac{m}{seg^2}(10^4 - 10^3)\frac{kg}{m^3}$$

$$P_1 - P_2 = 882\frac{kg}{m - se^2}$$

$$P_1 - P_2 = 882Pascal$$

2.2.17 Ejercicio 2.12:

En un tubo que contiene mercurio se añade 430 mm de agua al ramal izquierdo y en el derecho se agrega aceite $\rho = 0.7\frac{gr}{cm^3}$ hasta igualar a la columna de agua. Calcular el desnivel que se produce en el mercurio, (Se trabaja con presión manométrica)

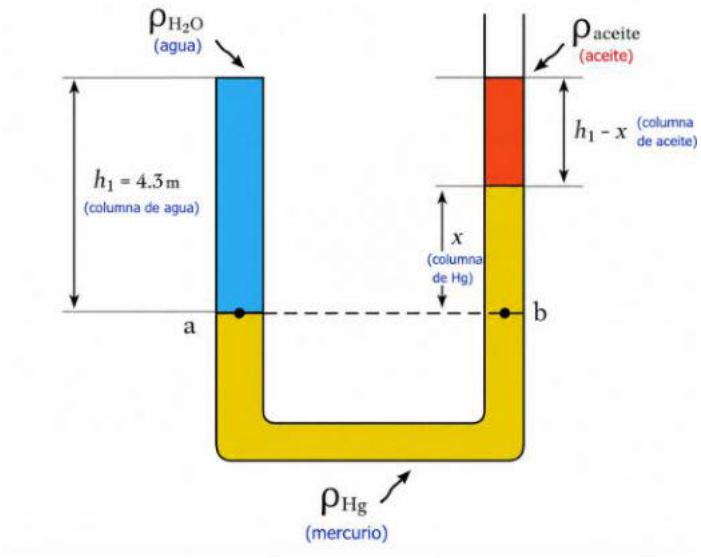


Figura 59. Tubo que contiene mercurio.

$$PA = PB$$

$$\rho agua \;\; gh_1 = \rho_{Hg} g x + \rho aceite \; g(h_1 - x)$$

$$\rho agua h_1 = \rho_{Hg} x + \rho aceite h_1 - \rho aceite x$$

$$\rho agua h_1 - \rho \; aceite h_1 = \;\; \rho_{Hg} x - \rho aceite x$$

$$x = \frac{\rho agua h_1 - \rho aceite h_1}{\rho_{Hg} - \rho aceite} = \frac{h_1(\rho agua - \rho aceite)}{\rho Hg - \rho aceite}$$

$$x = \frac{43cm(1 - 0.2)\, {}^{gr}/_{cm^3}}{(13.6 - 0.7)\, {}^{gr}/_{cm^3}} = \frac{12.9}{12.9} cm$$

$$x = 1cm$$

2.2.18 Ejercicio 2.13:

Un hombre cuya masa es de 75 kg se encuentra de pie sobre una plataforma de 400 cm² de área, colocada sobre un tubo con agua. Determine: a) la altura a la que subirá el agua en el tubo vertical; b) la altura si el área de la plataforma se reduce a la mitad (200 cm²).

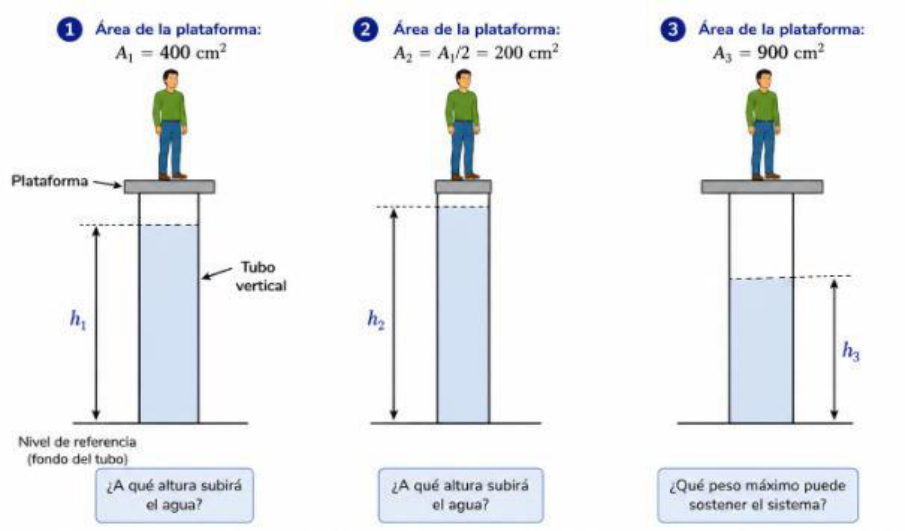


Figura 60. Ejercicio aplicado en altura con masa.

a) $P = \frac{F}{A} = \frac{W}{A} = \frac{mg}{A} \Rightarrow P = \frac{mg}{A}$

$$P = \rho g h$$

$$\frac{mg}{A} = \rho g h$$

$$h = \frac{m}{A\rho_{H2O}} = \frac{75kgm}{900cm^2 \times 1000\left(\frac{kg}{m^3}\right)} \times \frac{10^4 cm^2}{m^2}$$

$$h = 0.8333m$$

b) $A = 450cm^2$

$$h = \frac{75 \times 10^4}{10^3 \times 4.5 \times 10^2} m$$

$$h = 1.6m$$

b) $h = \frac{m}{A\rho_{H2O}} \quad \Rightarrow \quad m = hA\rho_{H2O}$

$$m = 0.83m \times 900cm^2 \times 1000\frac{kg}{m^3} \times \frac{m^2}{10^4 cm^2}$$

$$m = 74.97kgm$$

$$m = 169.9Lbm$$

$$P = m \times g = 74.97Kgm \times 9.8\frac{m}{seg^2} = 750Newtons$$

2.3 BANCO DE PREGUNTAS

Parte I: Preguntas Teóricas

1. ¿Qué mide un manómetro?

a) La velocidad del fluido.

b) La densidad del fluido.

c) La presión de un fluido respecto a una referencia.

d) El caudal volumétrico.

2. ¿Cuál es el principio físico que se aplica en los manómetros de tubo en U?

a) Ley de Bernoulli.

b) Ley de Pascal.

c) Ley de Boyle-Mariotte.

d) Principio de Arquímedes.

3. En un manómetro de tubo abierto, la lectura depende de:

a) La longitud del tubo.

b) La diferencia de alturas del fluido manométrico.

c) La presión atmosférica.

d) La temperatura del fluido.

4. ¿Qué relación básica se usa para determinar la presión en un manómetro?

a) $P = \rho gh$.

b) $P = v^2/2g$.

c) $P = \mu\, dv/dy$.

d) $P = Q/A$.

5. ¿Qué característica deben tener los líquidos manométricos?

a) Alta viscosidad y baja densidad.

b) Baja densidad y alta tensión superficial.

c) Densidad conocida y no miscibles con el fluido medido.

d) Ser compresibles y reactivos.

6. ¿Cuál es la función de un manómetro diferencial?

a) Medir la presión absoluta del aire.

b) Determinar la diferencia de presión entre dos puntos de un sistema.

c) Calcular la velocidad del flujo.

d) Medir temperatura y presión simultáneamente.

7. El mercurio se utiliza comúnmente como fluido manométrico porque:

a) Es más liviano que el agua.

b) Tiene alta densidad y no se evapora fácilmente.

c) Reacciona con la mayoría de gases.

d) Su densidad varía con facilidad.

8. En un tubo piezométrico se mide:

a) Presión absoluta.

b) Presión atmosférica.

c) Presión manométrica o de columna.

d) Diferencia de presión entre dos fluidos.

9. Si el fluido manométrico es más denso que el fluido medido, la lectura de altura será:

a) Menor.

b) Mayor.

c) Igual.

d) Nula.

10. En los sistemas industriales, los manómetros de Bourdon se utilizan porque:

a) Son más precisos que los de columna líquida.

b) Son portátiles, duraderos y miden altas presiones.

c) Solo miden vacío.

d) No requieren calibración.

Parte II: Ejercicios Aplicados

11. Un manómetro de tubo en U contiene mercurio (ρ = 13 600 kg/m³) y mide la presión de gas. Si la diferencia de alturas es de 20 cm, calcule la presión manométrica.

a) 1.86 kPa

b) 2.72 kPa

c) 26.7 kPa

d) 27.2 kPa

12. Un manómetro diferencial con agua (ρ = 1000 kg/m³) muestra una diferencia de 0.15 m entre columnas. Determine la diferencia de presión.

a) 0.981 kPa

b) 1.47 kPa

c) 1.25 kPa

d) 1.75 kPa

13. Si en un manómetro de tubo inclinado el ángulo de inclinación es 30° y la longitud medida sobre el tubo es 0.1 m, ¿cuál es la diferencia vertical real de alturas?

a) 0.05 m

b) 0.10 m

c) 0.15 m

d) 0.20 m

14. Un manómetro de Bourdon marca 2.5 bar. ¿Cuál es la presión en kPa?

a) 150 kPa

b) 200 kPa

c) 250 kPa

d) 300 kPa

15. Un tanque cerrado contiene aire a una presión manométrica de 150 kPa. Si la presión atmosférica es 101.3 kPa, determine la presión absoluta.

a) 48.7 kPa

b) 101.3 kPa

c) 150 kPa

d) 251.3 kPa

CAPÍTULO III

3 MEDIDORES DE FLUJO

Esta unidad estudia los principales instrumentos utilizados para medir velocidad y caudal en sistemas de transporte de fluidos. Se analizan el tubo de Pitot, el tubo Venturi, las placas de orificio, las boquillas de flujo y los rotámetros, relacionando su funcionamiento con las ecuaciones de continuidad y Bernoulli.

Objetivo general

Analizar el funcionamiento y la aplicación de los principales medidores de flujo empleados en sistemas hidráulicos e industriales.

Objetivos específicos

1. Explicar los principios físicos de la medición de caudal.
2. Aplicar las ecuaciones de continuidad y Bernoulli en medidores de flujo.
3. Describir el funcionamiento del tubo de Pitot, Venturi, placa de orificio, boquilla y rotámetro.
4. Resolver problemas de velocidad y caudal mediante diferencias de presión.

3.1 Medidores de Flujo

Los medidores de flujo, también llamados caudalímetros, son instrumentos utilizados para determinar cuánto fluido atraviesa una

tubería, conducto o canal durante un intervalo de tiempo. Dependiendo del principio de funcionamiento, pueden medir caudal volumétrico, caudal másico o velocidad local. Su selección no debe hacerse únicamente por el costo del equipo: también deben considerarse el tipo de fluido, la presión y temperatura de operación, el intervalo de caudal, la precisión requerida, la pérdida de carga admisible, el mantenimiento y las condiciones de instalación. En la práctica industrial existe una gran variedad de tecnologías; en esta unidad se estudian principalmente los medidores de presión diferencial y los medidores de área variable. (X. Li et al., 2023)

a) Instrumentos basados en la comparación entre la carga de presión y la carga de velocidad, así el tubo de Pitot.

b) Instrumentos basados en la disminución del área de flujo.

- Tubo de ventura
- Orificios
- Boquillas de flujo

c) Vertederos, usados para flujos en caudales abiertos.

d) Mediadores de desplazamiento ordinario, Rotámetros

3.2 Tubo de Pitot

El tubo de Pitot determina la velocidad local de un fluido a partir de la diferencia entre la presión de estancamiento (o total) y la presión estática. Su extremo frontal se orienta directamente contra la corriente; allí el fluido se desacelera idealmente hasta velocidad cero y transforma su energía cinética en presión. Las perforaciones laterales registran la

presión estática. La diferencia entre ambas presiones se relaciona con la velocidad mediante la ecuación de Bernoulli.(Geankoplis, 1967)

El tubo de Pitot es sencillo, robusto y produce una pérdida de carga muy pequeña. Es especialmente útil para medir velocidades en corrientes de aire y en tuberías de gran diámetro. Sin embargo, mide velocidad en un punto; para estimar el caudal total con mayor precisión conviene realizar un recorrido transversal de velocidades o aplicar un factor de corrección apropiado al perfil de flujo.

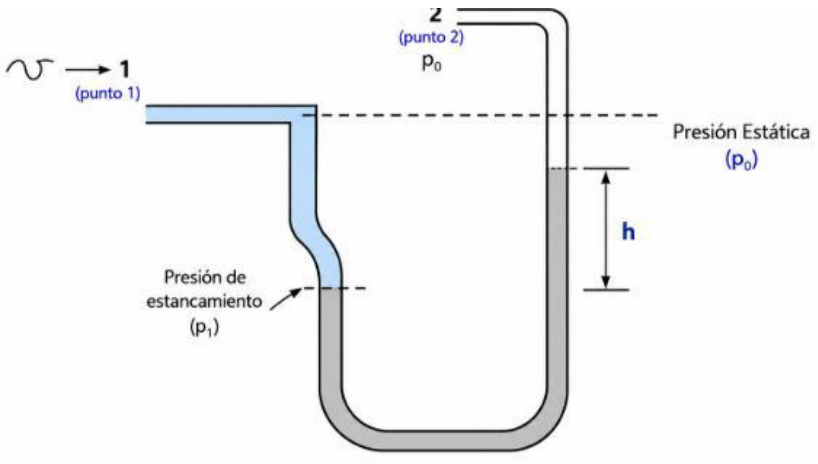


Figura 61. Tubo de Pitot.

Aplicando un balance de energía tendremos:

$$\frac{P_2}{\gamma} = \frac{P_1}{\gamma} + \frac{{v_1}^2}{2g}$$

P_2= Presión de impacto o total absoluta en el punto donde el líquido anula su velocidad

h =Longitud de la columna manométrica

P_1= Presión estática absoluta

γ = Peso específico del fluido

v = velocidad de flujo en el eje de impacto

$$v = \left[\frac{(P_2 - P_1)}{\gamma} \times 2g\right]^{1/2}$$

$$P_2 - P_1 = \gamma h$$

3.3. Tubo Venturi

El tubo Venturi es un medidor de presión diferencial formado por una sección convergente, una garganta y una sección divergente. La reducción gradual del área acelera el fluido y disminuye su presión estática. Midiendo la diferencia de presión entre la sección de entrada y la garganta, y aplicando continuidad y Bernoulli, puede calcularse el caudal.

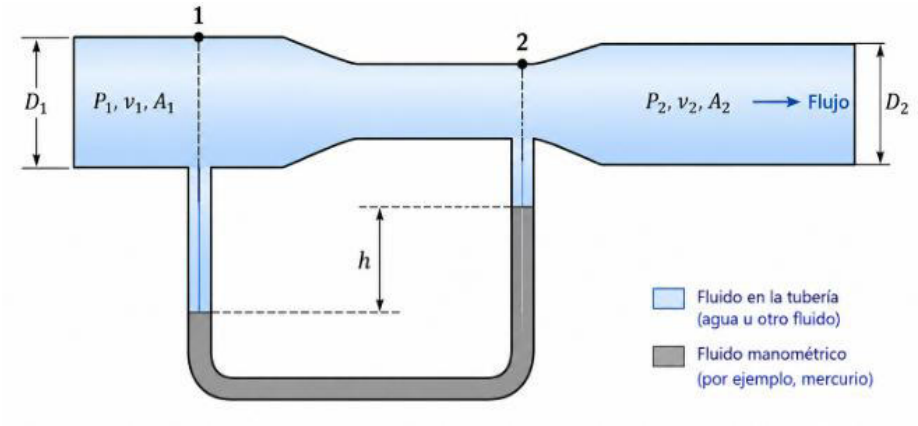


Figura 62. Tubo Venturi.

El flujo desde la tubería principal, sección (1) del gráfico se hace acelerar a través de la sección angosta llamada garganta sección (2) en donde disminuye la presión del fluido y aumenta la velocidad, después se expande el fluido al mismo diámetro que la tubería principal. En la garganta se encuentra unida a un manómetro diferencial de tal forma que la deflexión h es una indicación de la diferencia de presión $P_1 - P_2$. La ecuación de la energía (Bernoulli) y la ecuación de la continuidad pueden utilizarse para derivar la relación a través de la cual podemos calcular la velocidad del flujo utilizando como puntos de referencia las secciones (1) y (2) del gráfico.

$$\frac{P_0}{\gamma} + Z_1 + \frac{{v_1}^2}{2g} + hf = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{{v_2}^2}{2g}$$

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Vamos a encontrar la velocidad en la sección (2)

$$\frac{{v_2}^2 - {v_1}^2}{2g} = \frac{P_1 - P_2}{\gamma} + (Z_1 - Z_2) - hf$$

pero

$${v_1}^2 = {v_2}^2 (A_2/A_1)^2$$

$$\frac{{v_2}^2 - {v_2}^2(A_2/A_1)^2}{2g} = \frac{P_1 - P_2}{\gamma} + (Z_1 - Z_2) - hf$$

$$\frac{{v_2}^2}{2g}[1 - (A_2/A_1)^2] = \frac{P_1 - P_2}{\gamma} + (Z_1 - Z_2) - hf$$

$${v_2}^2 = \frac{2g}{1 - (A_2/A_1)^2}\left[\frac{P_1 - P_2}{\gamma} + (Z_1 - Z_2) - hf\right]$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{2g}{1 - (A_2/A_1)^2}\left[\frac{P_1 - P_2}{\gamma} + (Z_1 - Z_2) - hf\right]}$$

Pero $(Z_1 - Z_2)$ es muy pequeña, despreciando estos términos hf es la pérdida de energía del fluido, debe calcularse u obtenerlo en forma experimental, en lugar de hf se introduce el coeficiente C.

$$v_2 = C\sqrt{\frac{2g}{1 - (A_2/A_1)^2}\left[\frac{P_2 - P_1}{\gamma}\right]}$$

Esta ecuación sirve para calcular la velocidad en la garganta del medidor, si se desea calcular la velocidad del flujo volumétrico en el tubo tenemos:

$$Q = v_2 A_2$$

Tendremos, por lo tanto:

$$Q = C\,A_2 \sqrt{\frac{2g}{1 - (A_2/A_1)^2}\,\frac{P_2 - P_1}{\gamma}}$$

Donde γes el peso específico del fluido.

Valor del coeficiente C para tubo Venturi

En la figura, el coeficiente C, depende del número de Re y del flujo.

Un valor de C = 0.984 es recomendable siempre que:

$$100\ mm \quad D \leq\ 1200\ mm$$
$$4\ pu\,lg \quad D \leq\ 48\ pulg$$
$$0.3 \quad B < 0.75$$

$2 * 10^5 \leq Re \leq 6 * 10^6$ En la tubería principal

Siendo

$$\beta = \frac{Diámetro\ de\ la\ garganta}{Diámetro\ de\ la\ tubería} \quad \rightarrow \quad \beta = \frac{d}{D}$$

También se puede expresar en función de β el valor del caudal o de la velocidad.

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{(\pi/4)d^2}{(\pi/4)D^2} = (d/D)^2 = \beta^2$$

$$\frac{A_2}{A_1} = \beta^2$$

$$Q = C\,A_2\sqrt{\frac{2g}{1-(\beta^2)^2}\left[\frac{P_2-P_1}{\gamma}\right]}$$

$$Q = C\,A_2\sqrt{\frac{2g}{1-\beta^4}\left[\frac{P_2-P_1}{\gamma}\right]}$$

Expresión utilizada de algunos textos.

La ecuación

$$Q = C\,A_2\sqrt{\frac{2g\,\dfrac{P_2-P_1}{\gamma}}{1-(A_2/A_1)^2}}$$

$$;\, Q = C\;A_2\sqrt{\frac{2g}{1-\beta^4}\left[\frac{P_2-P_1}{\gamma}\right]}$$

Se utilizan para los cálculos de caudal o de velocidad en boquillas y en el orificio.

3.4. Placa de Orificio

La placa de orificio es un elemento primario de presión diferencial formado por una placa delgada con una abertura instalada transversalmente en la tubería. El paso por el orificio acelera el fluido y genera una caída de presión. El orificio puede ser concéntrico, excéntrico o segmental, según la aplicación. Su principal ventaja es la sencillez y el bajo costo; como contrapartida, produce una pérdida permanente de presión mayor que la de un Venturi y requiere una instalación cuidadosa para obtener mediciones confiables (Vemulapalli & Venkata, 2022)

El orificio provoca que el flujo se contraiga de repente, conforme se aproxima al orificio y después se expande al diámetro total de la tubería. La corriente que fluye a través del orificio forma una vena contracta, y la rápida velocidad del flujo resulta en una disminución de presión hacia abajo desde el orificio. (Pimenta & Campos, 2012)

Se utiliza la ecuación del tubo de ventura para calcular el flujo y la velocidad.

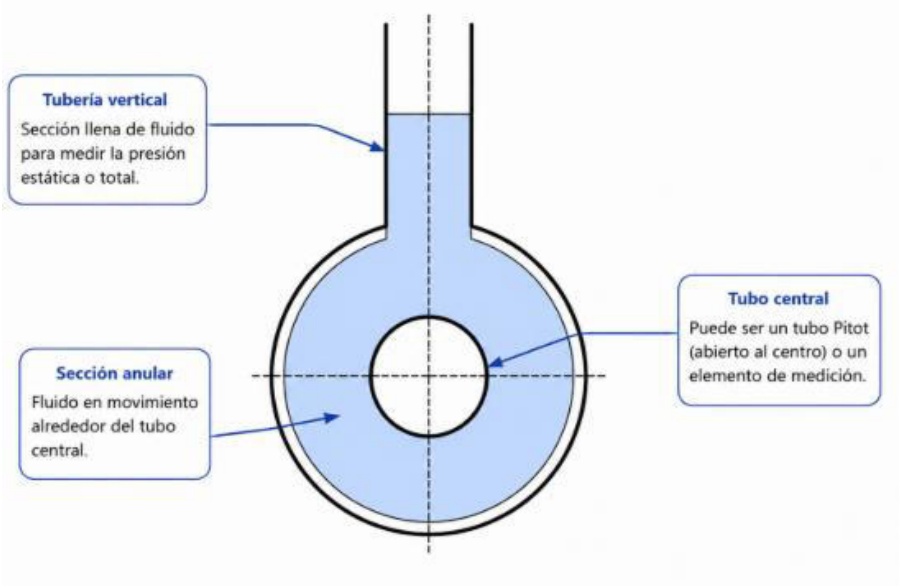


Figura 63. Placa de orificio.

La ecuación $Q = C\ A_2 \sqrt{\frac{2g\left[\frac{P_2 - P_1}{\gamma}\right]}{1-\left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}}$

$$Q = C\ A_2 \sqrt{\frac{2g}{1-\beta^4}\left[\frac{P_2 - P_1}{\gamma}\right]}$$

3.5. Boquilla de Flujo

La boquilla de flujo posee una entrada redondeada que produce una contracción gradual del chorro, seguida de una garganta corta. Su comportamiento se encuentra entre el Venturi y la placa de orificio: soporta velocidades elevadas y condiciones severas de operación, con una pérdida de presión generalmente menor que la de una placa de orificio.

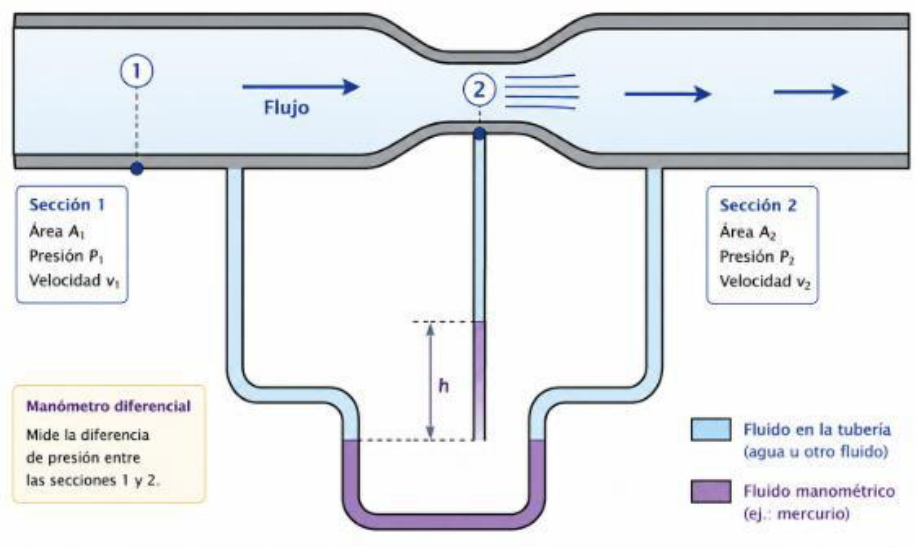


Figura 64. Boquilla de flujo.

Debido a la contracción pareja y gradual existe una pérdida muy pequeña entre los puntos (1) y (2) para la boquilla de flujo, una curva C versus Nre se muestra en figuras para Re grandes C=0.49, para valores pequeños de Re es más bajo.

Se emplea la ecuación:

$$Q = C\ A_2 \sqrt{\frac{2g\left[\frac{P_2 - P_1}{\gamma}\right]}{1-\left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}}\ ;\ Q = C\ A_2 \sqrt{\frac{2g}{1-\beta^4}\left[\frac{P_2 - P_1}{\gamma}\right]}$$

3.6. Rotámetros

El rotámetro consiste en un tubo generalmente de vidrio que contiene un flotador, el fluido cuyo caudal va a ser medido entra por el fondo del tubo de vidrio y fluye hacia arriba para salir finalmente por la parte superior, en su paso hacia arriba por el tubo eleva el flotador, desde el fondo hasta un punto en el tubo. El área variable A_2 es debido a la forma del tubo, y esto hace que el espacio anular por el cual el fluido debe pasar aumente de tamaño a medida que el flotador es elevado a un punto más alto que el tubo. (Ferretti et al., 2023)

El tubo del rotámetro puede tener paredes rectas o curvas y la razón de flujo puede ser leída o calculada a partir de la escala grabada en el tubo.

La ecuación para el flujo de un fluido en un Ventura puede ser aplicada a un rotámetro.

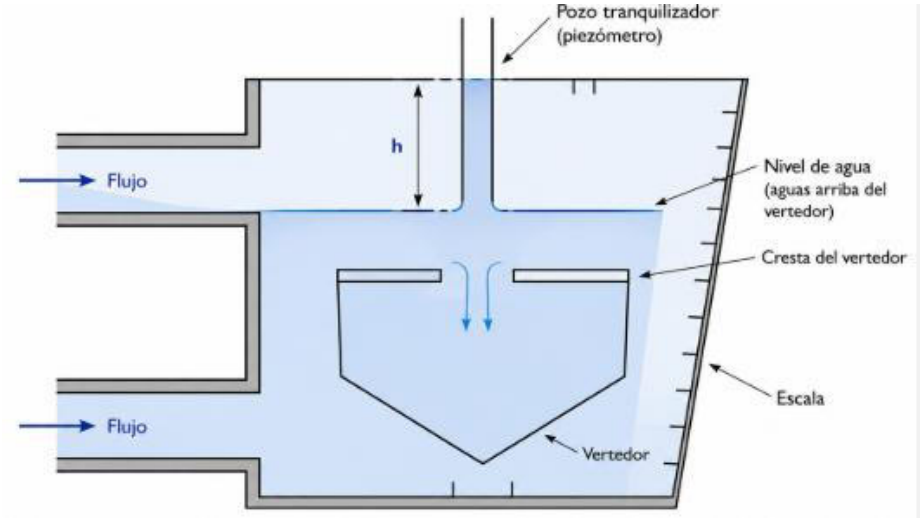


Figura 65. Rotámetro.

$$Q = C_R\ A_2 \sqrt{\frac{2g\left[\frac{P_2 - P_1}{\gamma}\right]}{1-\left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}}\ ;\ Q = C_R\ A_2 \sqrt{\frac{2g}{1-\beta^4}\left[\frac{P_2 - P_1}{\gamma}\right]}$$

$$\beta = \frac{D_1}{D_2}$$

$$\beta^4 = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^4 = \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^4 \qquad h = \frac{P_1 - P_2}{\gamma}$$

$$Q = C_R\ A_2 \sqrt{\frac{2g\ h}{1-\beta^4}}$$

Balance de fuerzas en el flotador

a) Hacia abajo

$$P_2 A_f\ ;\ \text{Lbf}$$

$$W_f V_f\ ;\ \text{Lbf}$$

A_f = Área máxima del flotador

W_f = Peso específico del flotador

V_f = Volumen del flotador

W =Peso específico del fluido

b) Hacia arriba

$$P_1 A_f$$

$$W V_f$$

$$P_2 A_f + \mathrm{W}_f V_f = P_1 A_f + W V_f$$

$$A_f(P_2 - P_1) = V_f(\mathrm{W}\text{-}\mathrm{W}_f) \qquad Pero\ h = \frac{P_1 - P_2}{W}$$

$$(P_2 - P_1) = \frac{V_f}{A_f}(\mathrm{W}\text{-}\mathrm{W}_f) \qquad Cambiando\ de\ signo$$

$$P_1 - P_2 = \frac{V_f}{A_f}(W_f\text{-}\mathrm{W})$$

Remplazando en Q

$$Q = C_R\ A_2 \sqrt{\frac{2g}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2} * \frac{V_f}{A_f}\frac{(W_f\text{-}\mathrm{W})}{W}} \quad ; \quad \gamma = W$$

$$Q = C_R\ A_2 \sqrt{\frac{2g}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2} * \frac{W_f}{A_f}\left(\frac{W_f}{W}\text{-}1\right)}$$

Normalmente el cociente $\left(\frac{A_2}{A_1}\right)$ es muy pequeño de tal manera:

$$\left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)\right] \approx 1$$

$$Q = C_R \; A_2 \sqrt{2g * \frac{W_f}{A_f}\left(\frac{W_f}{W}\text{-}1\right)}$$

El valor de CR es dado gráficamente como función de Re para diferentes tipos de flotadores.

3.6.1 Ejercicio 3.1:

El diámetro del cuello de un venturimetro colocado en una línea de agua es exactamente la mitad del diámetro de la línea, se observa una diferencia de presión de 30 cm de agua entre la línea y el cuello, estimar la velocidad media del agua de la línea, $\rho = 1000 \frac{Kg}{m^3}$

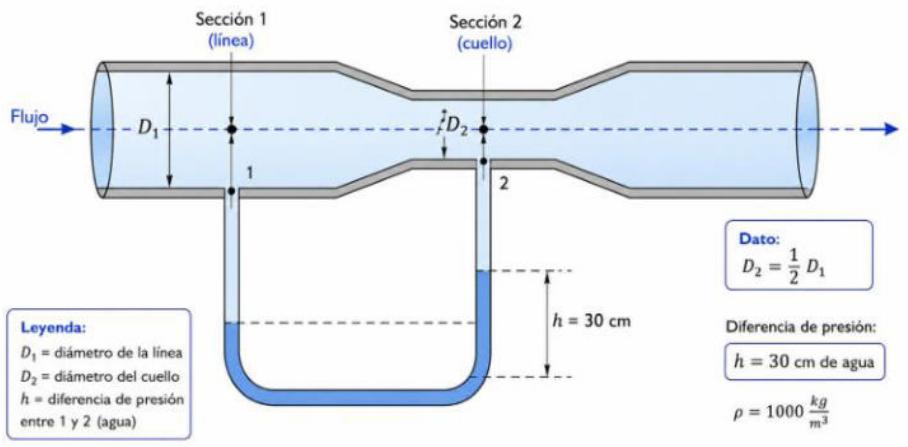


Figura 66. Diámetro del cuello de un venturimetro.

Solución:

La presión ejercida por 30 cm de agua es peso específico $\gamma_{agua} = 9.8 * 10^3 N/m^3$

$$P_1 - P_e = 0.30m\ (9.8 * 10^3)\frac{N}{m^3}$$

$$P_1 - P_e = 2.94 * 10^3\frac{N}{m^2}$$

La velocidad del cuello es:

$$Ve = \sqrt{\frac{2gc(P_1 - P_e)}{\rho(1-\beta^4)}}$$

$$\beta = \frac{Dc}{Di} = \frac{1}{2} = (0.5)^4 = 0.0625 \qquad gc = 1\frac{Kg.m}{N.seg^2}$$

$$Ve = \sqrt{\frac{2 * (2.94 * 10^3)}{1000(1 - 0.0625)}}$$

$$Ve = \sqrt{\frac{5.88}{0.9375}} = \sqrt{6.272} = 2.5m/seg$$

Por consiguiente la velocidad de la línea es:

$$V_1 = \frac{VeAe}{A_1} = 2.5\ \left(\frac{1}{2}\right)^2 = 0.63\ m/seg$$

$$V_1 = 0.63\ m/seg$$

3.6.2 Ejemplo 3.2:

Se usa un gasómetro de tubo de Pitot para medir la velocidad de una corriente de aire a la presión atmosférica estándar a 20C un manómetro adosado a los tubos de presión de estancamiento y estática muestra 20 cm de agua de diferencia. Determinar la velocidad de la corriente de aire.

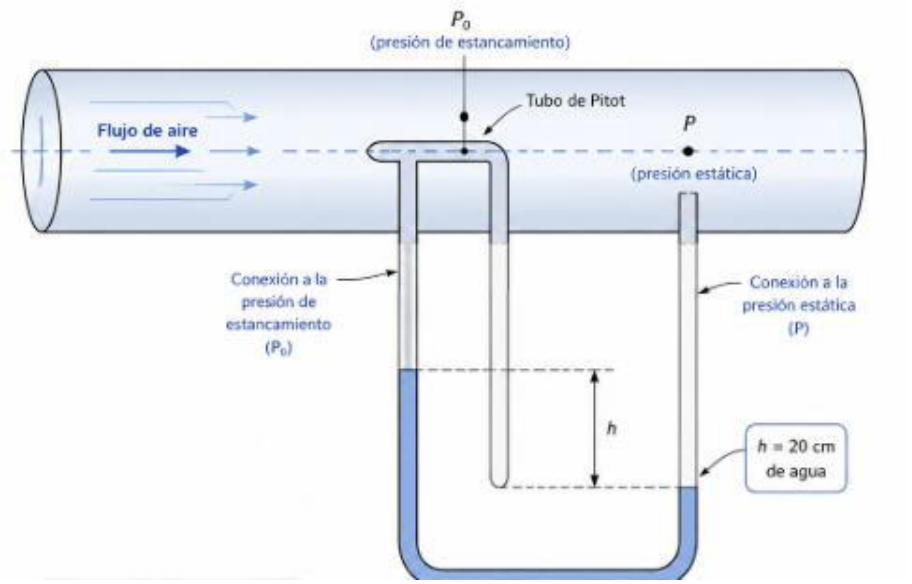


Figura 67. Gasómetro de tubo de Pitot.

$$a \quad 20°C \qquad \rho_{agua} = 1.2\frac{Kg}{m^3}$$

$$\rightleftarrows \quad gc = 1\frac{Kg.m}{N.seg^2}$$

$$\gamma_{agua} = 9.8 * 10^3 N/m^3$$

La velocidad de la corriente de aire es:

$$V = \left[2gc * \frac{\gamma_f \ D}{\rho}\right]^{1/2}$$

$$V = \left[2\left(1\frac{Kg.m}{N.seg^2}\right) * (9.8 * 10^3)\frac{N}{m^3} * \frac{0.20m}{1.2Kg/m^3}\right]^{1/2}$$

$$V = 57.1 \ m/s$$

3.7. BANCO DE PREGUNTAS

Parte I: Preguntas Teóricas

1. ¿Cuál es el principio fundamental de funcionamiento de un tubo de Pitot?

a) Medir directamente el volumen acumulado del fluido.
b) Comparar la presión de estancamiento con la presión estática.
c) Medir la variación de temperatura producida por el flujo.
d) Determinar únicamente la presión atmosférica.

2. En un tubo Venturi, cuando el fluido pasa de la tubería principal hacia la garganta:

a) La velocidad disminuye y la presión aumenta.
b) La velocidad y la presión aumentan simultáneamente.
c) La velocidad aumenta y la presión disminuye.
d) La velocidad permanece constante y la presión disminuye.

3. La diferencia de presión generada entre la entrada y la garganta de un Venturi se utiliza principalmente para determinar:

a) La viscosidad absoluta del fluido.
b) La temperatura del fluido.
c) La velocidad o el caudal del fluido.
d) La masa molecular del fluido.

4. ¿Qué ecuaciones fundamentales se combinan para obtener la relación de velocidad en un tubo Venturi?

a) Ley de Fourier y ecuación de Fick.

b) Bernoulli y continuidad.

c) Ley de Newton y ecuación de Reynolds.

d) Ecuación de estado y ley de Dalton.

5. ¿Cuál de los siguientes medidores produce una contracción repentina del flujo y genera una vena contracta?

a) Rotámetro.

b) Tubo de Pitot.

c) Placa de orificio.

d) Tubo Venturi.

6. En una placa de orificio, la diferencia de presión entre las tomas anterior y posterior es proporcional:

a) Al cuadrado del caudal.

b) A la temperatura absoluta.

c) Al diámetro de la tubería únicamente.

d) A la viscosidad cinemática únicamente.

7. ¿Cuál es una característica particular de una boquilla de flujo?

a) Produce una contracción gradual de la corriente.

b) Utiliza obligatoriamente un flotador.

c) No genera cambios de presión.

d) Solo puede utilizarse en canales abiertos.

8. El principio de funcionamiento de un rotámetro se basa principalmente en:

a) Área constante y presión variable.

b) Área variable y desplazamiento de un flotador.

c) Medición de presión de estancamiento.

d) Contracción repentina mediante una placa perforada.

9. Cuando aumenta el caudal que circula a través de un rotámetro, normalmente el flotador:

a) Desciende hasta el fondo.

b) Permanece inmóvil.

c) Se eleva hasta alcanzar una nueva posición de equilibrio.

d) Sale necesariamente por la parte superior del tubo.

10. ¿Cuál de los siguientes medidores se caracteriza por medir grandes caudales con una baja pérdida de carga?

a) Placa de orificio.

b) Tubo de Pitot.

c) Vertedero.

d) Rotámetro.

Parte II: Ejercicios Aplicados

11. Un tubo de Pitot se utiliza para determinar la velocidad del agua que circula por una tubería. La diferencia entre la presión de estancamiento y la presión estática corresponde a una columna de 25 cm de agua. Considere g = 9,81 m/s². Determine la velocidad del agua.

a) 20,21 m/s

b) 2,921 m/s

c) 2,21 m/s

d) 12,216 m/s

12. Por una tubería horizontal de 10 cm de diámetro circula agua. La garganta de un Venturi tiene un diámetro de 5 cm. Si la diferencia de presión entre la tubería y la garganta equivale a 30 cm de columna de agua, determine la velocidad media del agua en la tubería principal. Desprecie las pérdidas.

a) 1,626 m/s

b) 0,826 m/s

c) 0,626 m/s

d) 0,126 m/s

13. Una tubería de 12 cm de diámetro interno transporta agua con una velocidad media de 1,80 m/s. Se instala un Venturi cuya garganta tiene un diámetro de 6 cm. Determine: a) el caudal volumétrico; b) la velocidad en la garganta.

a) 1,20 m/s

b) 7,20 m/s

c) 7,90 m/s

d) 6,20 m/s

14. Un tubo de Pitot se utiliza para medir la velocidad de una corriente de aire. El manómetro diferencial registra 18 mm de agua. Considere $\rho_{aire} = 1{,}20\ kg/m^3$ y $\rho_{agua} = 1000\ kg/m^3$. Determine la velocidad del aire.

a) 17,15 m/s

b) 15,15 m/s

c) 17,85 m/s

d) 7,15 m/s

15. Por una tubería horizontal de 20 cm de diámetro circula agua. Se instala un Venturi cuya garganta tiene un diámetro de 10 cm. La diferencia de presión corresponde a 50 cm de columna de agua. Considere C = 0,984. Determine: a) la velocidad real en la tubería principal; b) el caudal volumétrico.

a) 27,0 L/s

b) 25,9 L/s

c) 5,0 L/s

d) 15,3 L/s

CAPÍTULO IV

4 BOMBAS

La cuarta unidad aborda equipos esenciales para el transporte de fluidos: bombas. Se presentan los tipos de bombas, curvas características, requisitos de operación como NPSH, y criterios de selección. Además, se estudian los principales instrumentos de medición de caudal utilizados en la industria, con ejemplos prácticos que facilitan su comprensión.

Objetivo general

Describir el funcionamiento, selección y evaluación del desempeño de bombas en sistemas hidráulicos.

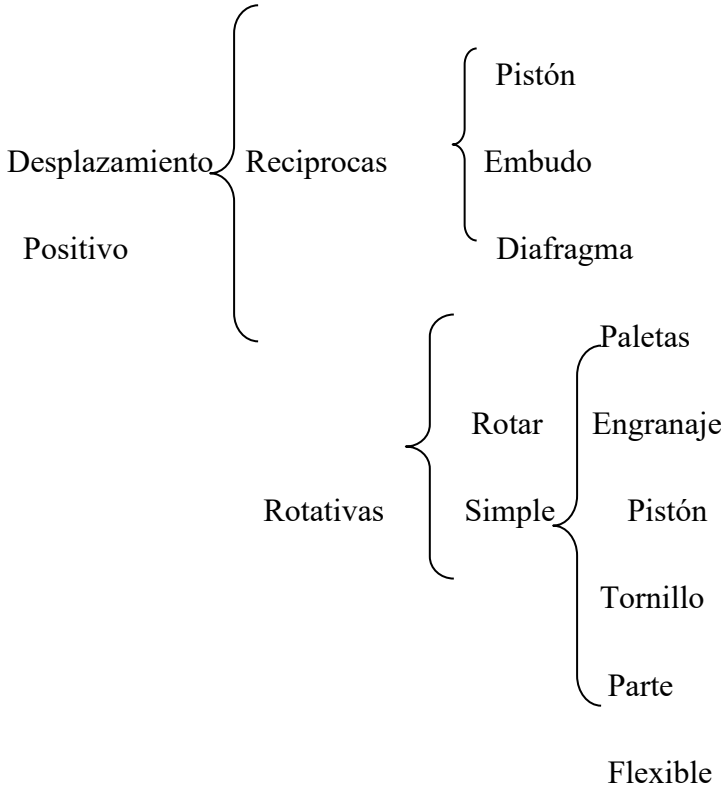
Objetivos específicos

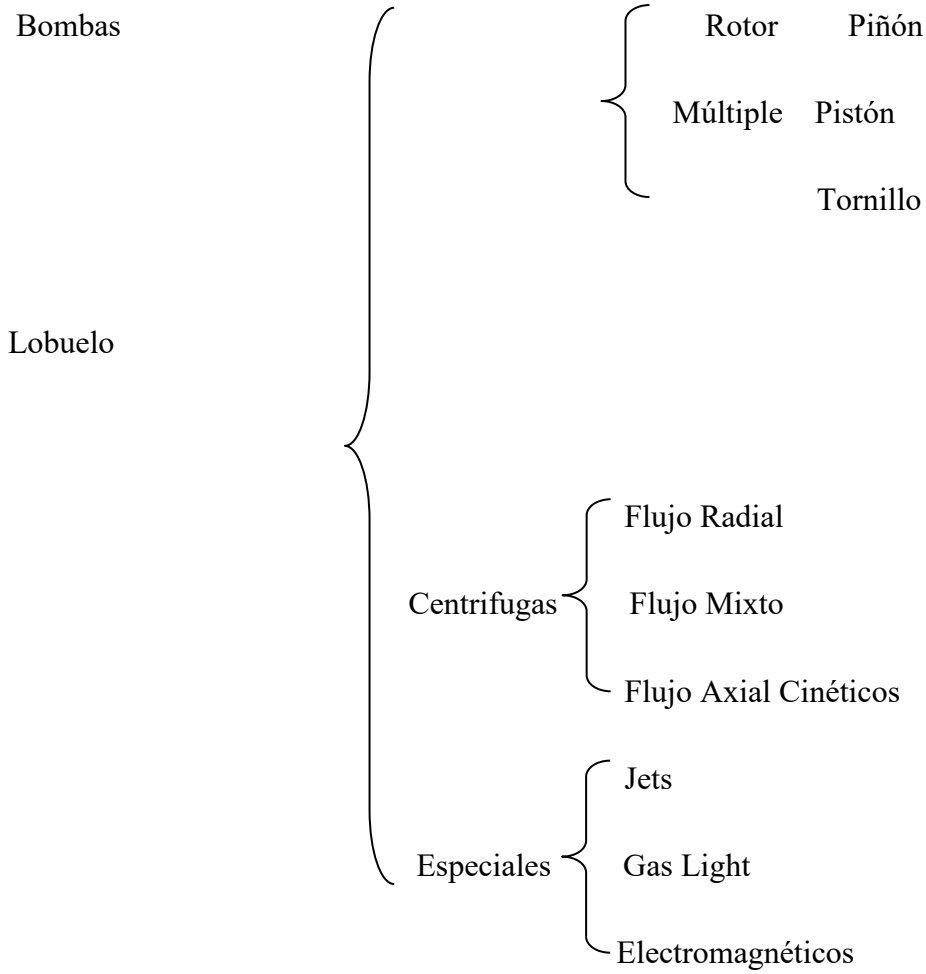
1. Clasificar las bombas según su principio de operación y aplicación industrial.
2. Interpretar curvas características de bombas y sistemas.
3. Analizar el concepto de NPSH y su importancia en la prevención de cavitación.
4. Resolver problemas prácticos relacionados con el diseño y operación de equipos de bombeo y medición.

4.1 Bombas

Las bombas son componentes esenciales en sistemas de manejo de fluidos, utilizados en industrias como la energía, la manufactura, la biomedicina y el petróleo. Su selección y operación adecuada garantizan eficiencia, precisión y seguridad en el transporte de líquidos y gases. Las Bombas son instrumentos que sirven para transportar fluidos o gases para convertir la energía mecánica procedente del motor en energía de Presión o de velocidad que es adquirida por el fluido. (Gülich, 2014)

4.1.1 Clasificación de las bombas





4.1.2 Características de las Bombas

Para específicar una bomba se debe indicar:

- Tipo de Bomba
- Bomba funciona con motor eléctrico o turbina
- El fluido que va a ser bombeado
- La viscosidad y corrosividad de un fluido

- La temperatura del bombeo
- La gravedad específica del fluido
- La presión del vapor del fluido a la temperatura de bombeo
- Capacidad de la bomba G.P.M
- Presión de Succión de descarga y diferencial
- El NPSH disponible en una instalación. (Ferretti et al., 2023)

4.2 Expresiones para la energía de una bomba

Hp., Es la energía que la bomba suministra al fluido, en ft de fluido (hp teórico)

Q, Es la descarga de la bomba en $^{ft^3}/_{seg}$

$\gamma \equiv W$ = Peso específico del fluido bombeado $^{Lbf}\Big/_{ft^3}$.

La energía suplida por la bomba al fluido será:

$$Energia = hp \cdot (ft) \cdot Q \cdot \left(\frac{ft^3}{seg}\right) \cdot W \cdot \left(\frac{lbf}{ft^3}\right)$$

$$Energia = hp \cdot Q \cdot W \cdot \left(ft \cdot \frac{lbf}{seg}\right)$$

Esta energía es expresada en caballos de fuerza HP ya que $550\frac{ft-Lbf}{seg}$, que es el factor de conversión: $HP = \frac{hpQW}{550}$

Algunas veces la descarga Q es expresada en galones por minuto G.P.M, $7.48gal = ft^3$

$$Q' = Q\left(\frac{ft^3}{seg}\right) x\ 7.48\left(\frac{gal}{ft^3}\right) x\ 60\left(\frac{seg}{min}\right)$$

$$Q' = 448\left(\frac{gal}{min}\right)$$

$$HP = \frac{hp\ Q\ W}{448\ x\ 550}$$

$$BHP = \frac{hp\ Q\ W}{246500}$$

hp es el caballaje teórico, que debe entregarse al fluido para que se traslade de un punto (1) a un punto (2) bajo condiciones específicas. El caballaje real deberá ser un poco mayor que el teórico ya que la eficiencia de las bombas es siempre menor que 100 % (por pérdidas por fricción). (Q. Li et al., 2024)

La expresión para el caballaje real BHP (caballaje de freno) será (Breake Hourse Power).

$$BHP = \frac{hp\ Q\ W}{550}$$

4.2.1 Potencia y Eficiencia

El trabajo desarrollado por una bomba está en función de la altura total dinámica de descarga y del peso del líquido bombeado en un periodo de

tiempo determinado, es decir es el régimen de tiempo durante el cual se efectúa en trabajo. (W. Li et al., 2024)

$$Pot = \frac{Trabajo}{tiempo}$$

La unidad de potencia más común es el caballo de fuerza HP.

La potencia de entrada a la bomba BHP (al eje de la bomba).

La potencia de salida de la bomba o caballos hidráulicas WHP (Hidraulic Hourse Power), es la potencia del líquido entregado por la bomba, estos términos los definimos de la siguiente manera:

Tabla 8. Potencia del líquido entregado por la bomba.

Potencia Entrada a la Bomba	**Potencia de salida de la Bomba**
BHP	WHP
Potencia de Entrada entregada al eje de la Bomba	Potencia liquida entregada por la Bomba $WHP = \frac{Q \times T.D.H \times Sp.gr}{3960}$

BHP>WHP debido a la pérdida de energía mecánica de la bomba.

4.2.2 Eficiencia

La eficiencia de la Bomba está expresada por:

$$\%Eff = \frac{WHP}{BHP} = \frac{Q \times TDH \times SPgr}{3690 \times BHP}$$

$$Eficiencia = \frac{Potencia\ entregada\ por\ la\ Bomba}{Potencia\ de\ entrada\ a\ la\ Bomba}$$

La Eficiencia de la bomba es la relación entre la energía suministrada y el aumento de energía de presión o velocidad que ha experimentado el fluido.(Himmelblau, 1971)

4.3 Bombas Centrífugas

El nombre de este tipo de bombas viene de la fuerza que se ejerce a un cuerpo por movimiento circular denominado Fuerza Centrífuga, y consiste en un impulsor que gira alrededor de la carcasa fija, impartiendo velocidad al líquido. Esta energía de velocidad se transforma al momento que el líquido abandona la bomba en energía de Presión.(Brown, 1965)

El líquido forzado a abandonar la bomba crea un vacío parcial en el ojo del impulsor permitiendo que la presión atmosférica fuerce la entrada de más líquido en la succión. (Gülich, 2014)

4.3.1 Altura

La Bomba Centrífuga imparte una velocidad al líquido a la salida, transformando a energía de Presión, o sea que la altura h desarrollada es aproximadamente igual a la energía de velocidad desarrollada en la superficie del impulsor y se expresa por:

$$h = \frac{v^2}{2g}$$

$h = altura \quad ft$

$v = velocidad \quad {ft}/{seg}$

$g = gravedad \quad {ft}/{seg^2}$

4.3.2 Altura total dinámica de descarga (TDH)

$$TDH = \frac{(P_2 - P_1) \times 2.31}{Sp\ gr} \pm Z_2 + Hfs + Hfd$$

Donde:

$$h = pies$$

$$P_1, P_2 = PSI$$

$$Sp\ gr = gravedad\ específica$$

4.3.3 Velocidad Específica

Es una correlación entre la capacidad h y la velocidad en el punto de mayor eficiencia de la Bomba, y está dada por:

$$\nu_s = \frac{V\sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

$$V = R.P.M$$

$$Q = G.P.M$$

$$H = altura\ cinemática\ total$$

Presión

$Tanque\ abierto\ a\ la\ atmosfera \quad P = 14.7PSI \quad nivel\ del\ mar$

$Tanque\ cerrado \quad Pabsoluta = Pmanome + Patmos$

$Tanque\ al\ vacio \quad Pr\,e\,sión\ en\ inHg$

$$P = (30 - vacio) \times \quad 0.48$$

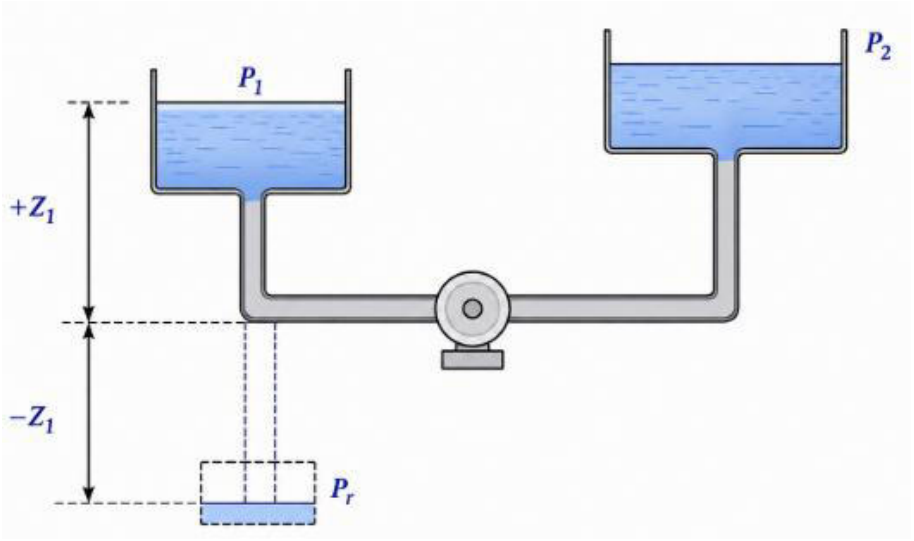


Figura 68. Presión del tanque abierto.

La presión de un líquido en cualquier punto puede considerarse como el causado por una columna vertical del líquido que debido a su peso ejerce una presión igual al a presión existente en el punto mencionado llamándose altura estática.

$$H = \frac{Presión \times 2.31}{Sp\ gr}$$

$$H = \frac{P \times 2.31}{Sp\ gr}$$

$$P = \frac{H \times Sp\ gr}{2.31}$$

4.3.4 Curvas Características de las bombas

Para visualizar y comprender mejor las características de una bomba a una determinada velocidad, se utilizan varias formas de curvas así Q vs. H, para diferentes tipos de bombas, las curvas tienen la conformación siguiente: (Q. Li et al., 2024)

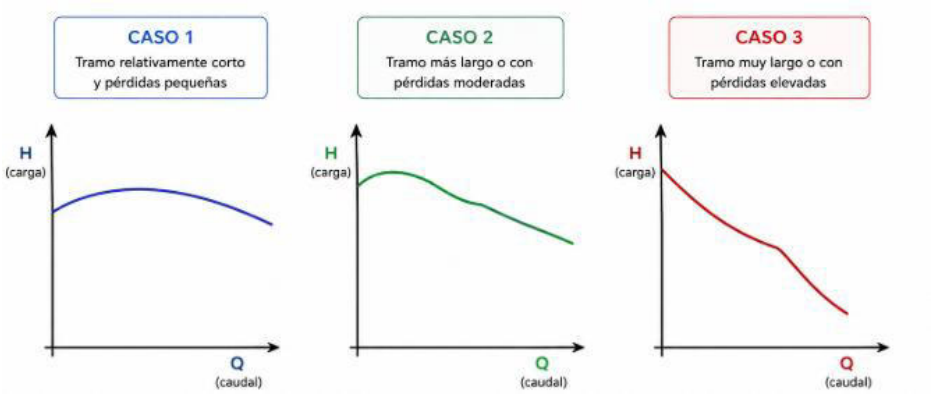


Figura 69. Curvas características de las bombas.

También a velocidades determinadas y a pruebas en laboratorio con un impulsor de un determinado diámetro se obtiene:

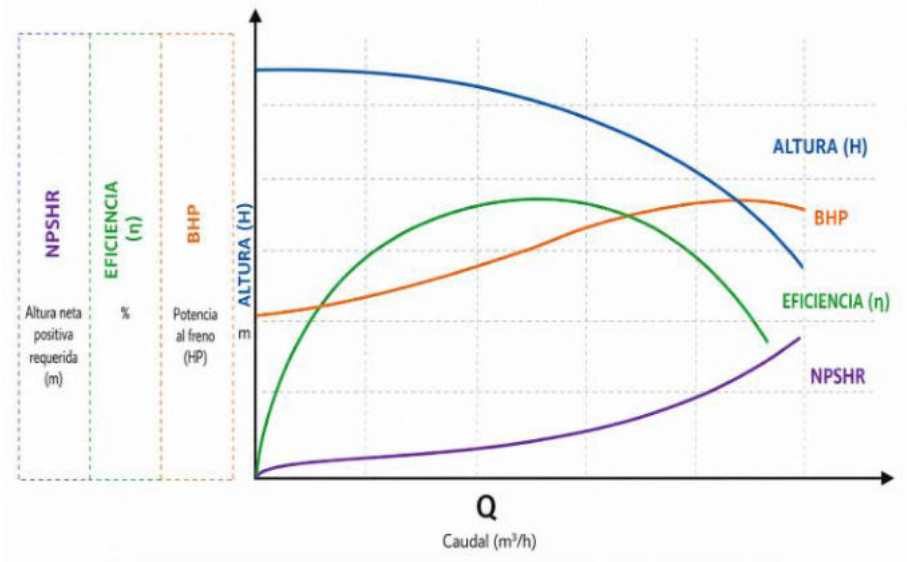


Figura 70. Velocidades determinadas y pruebas en laboratorio.

Los fabricantes de bombas dibujan para una bomba en particular, los diferentes tamaños en una curva general, que nos ayuda a seleccionar la bomba requerida, para cumplir las condiciones de instalación.

4.3.5 Altura Neta Positiva de Succión (NPSH)

El instituto hidráulico de los E.U.A define al NPSH como la altura total absoluta de succión en ft corregida al eje del impulsor, menos la presión de vapor del líquido en pies absolutos, en realidad es un análisis de las condiciones de succión de la bomba para saber si el líquido se vaporiza o no en el punto de menor presión de la bomba. (Vemulapalli & Venkata, 2022)

Es esencial que la presión de succión a la entrada de la bomba tenga un valor más elevado que la presión a la cual se presentaría vaporización a la temperatura de operación del líquido, esto se logra proporcionando

una cabeza de succión positiva neta NPSH, si se le permite a la presión de succión disminuir hasta el punto donde se presenta vaporización, se crea cavitación dentro de la bomba, lo cual tomara una mezcla de vapor y líquido provocado que disminuya la entrega. (Rundo, 2017)

NPSH Requerido esta función del diseño de la bomba al entrar al eje del impulsor. La velocidad aumenta y la presión disminuye.

NPSH Disponible está en función del sistema donde la bomba puede evaporar

NPSH disponible > NPSH requerido,

El NPSH puede ser representado:

$$NPSH = \frac{(P_1 - P_2)\ 2.31}{Sp\ gr} + Z_1 + 1\ ft$$

La presión de succión de la bomba en ft de fluido puede ser calculada usando el teorema de Bernoulli entre dos puntos.

$$\frac{PA}{W} + \frac{vA^2}{2g} + ZA - hp - hf_{AB} = \frac{PB}{W} + \frac{vB^2}{2g} + ZB$$

$$\frac{PA}{W} + ZA - hf_{AB} = \frac{PB}{W} - \frac{vB^2}{2g}$$

$$\frac{PB}{W} = \frac{PA}{W} + ZA - hf_{AB} - \frac{vB^2}{2g} \qquad ZA = h$$

$$\frac{PB}{W} = \frac{PA}{W} + h - \left[hf_{AB} - \frac{vB^2}{2g}\right]$$

$$h \leq hf_{AB} + \frac{vB^2}{2g} \qquad ; \qquad \frac{PB}{W} \leq \frac{PA}{W}$$

La presión de succión de la bomba $\frac{PB}{W}$ será igual o menor a la presión de vapor $Pv = \frac{PA}{W}$ del líquido a la temperatura de bombeo, bajo estas condiciones ocurrirá evaporación y aparecerán burbujas en la zona de succión de la bomba produciendo vibraciones excesivas, reduciendo la capacidad de la bomba y destrucción de la misma en el caso de llegar a funcionas en seco, por estas razones la presión de succión $\frac{PB}{W}$ debe ser mayor que la presión de vapor a la temperatura de bombeo $\frac{PB}{W} \geq \frac{PA}{W}$ y esto requiere que $h \geq hf_AB + \frac{vB^2}{2g}$, el termino $\frac{vB^2}{2g}$ es muy pequeño y se lo considera despreciable.

$$h \geq hf_{AB}$$

Esto se logra:

- Colocando el reservorio a cierta elevación sobre el suelo al menos 12 ft.
- Diseñando el tamaño de la cañería de succión de tal manera que hf sea pequeño con un diámetro grande.

- Si el NPSH disponible en una instalación es insuficiente se producirá la evaporación del líquido bombeado.

La expresión para el NPSH disponible es

$NPSH_{ent}$ = Presión de succión – P. vapor a la temperatura de la bomba.

Siendo $Pv = PA$

$$- NPSH\ disp\ =\ [\ hf_AB\ +\ \frac{v^2}{2g}\ ]$$

Para una buena instalación:

$$NPSH\ disponible\ >\ NPSH\ requerido$$

$$h_T\ -\ h_{fAB}\ +\ \frac{v^2}{2g}\ \geq\ NPSH\ requerido$$

Donde $h_T$es la distancia vertical desde la tangente al fondo del recipiente, al centro de la bomba.

4.3.6 Ejercicio 4.1:

Un aceite comestible de una s.f. gr. De 0.73 a la temperatura de operación de bombeo fluye a razón de 500 gal/min, desde el fondo de una torre de fraccionamiento que opera da 20 PSI, la otra torre está a una presión de 100 PSI, la viscosidad es de 0.9 centipoise la cañería es de 8 pulg de diámetro con cédula 40 de acero, la línea de succión es de 15 et de largo y contiene dos válvulas de atajadero abiertas ,2 codos de media curvatura una conexión en T.

La cañería de descarga tiene 50 ft de largo, 3 codos de madia curvatura y 5 conexiones con un diámetro de 6 pulg, una caída de presión de 1.5 PSI tiene la válvula de control de flujo.

1. La caída de presión debido a la fricción en la cañería de succión en ft de aceite y en PSI.
2. Los mismos cálculos para la cañería de descarga.
3. Calcular la presión de succión de la bomba del PSI.

4. Calcular la presión de descarga en PSI.
5. Calcule la presión diferencial de la bomba en PSI.
6. Calcule el NPSH.
7. Calcule el HP teórico requerido.
8. Calcule el BHP si la eficiencia es el 80% y el NPSH requerido es 10%
9. Haga un comentario del NPSH requerido y el disponible.

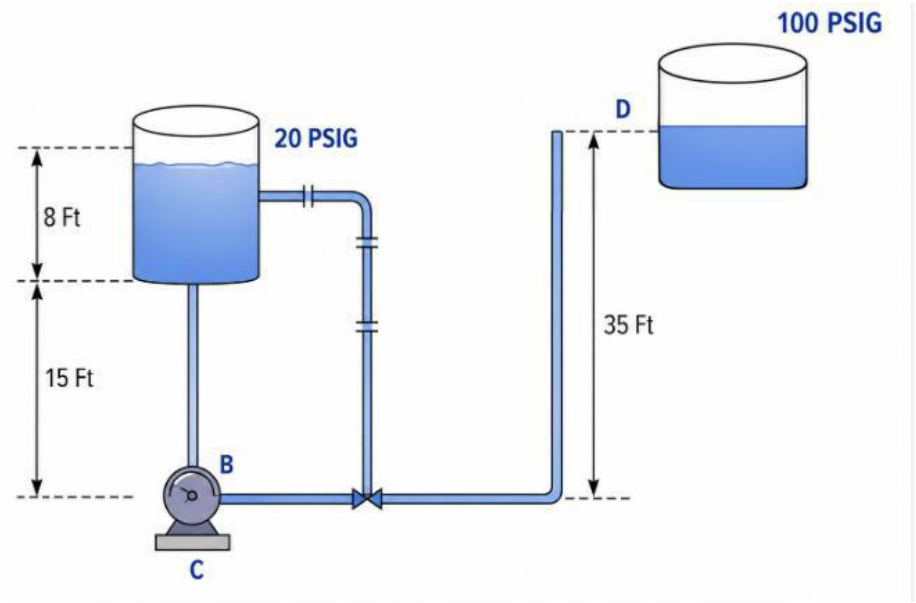


Figura 71. Cañería de descarga.

$$Datos:$$

$$Sp\ gr = 0.73$$

$$\rho = 45.5\ \frac{lbm}{ft^3}$$

$$u = 0.9\ cpoise \times \frac{{}^{gr}/_{cm-se}}{100cpoise} \times \frac{Lbm}{454gr} \times \frac{30.50cm}{ft}$$

$$u = 6.06 \times 10^{-4} \frac{Lbm}{ft - seg}$$

$$W = 0.73 \times 62.4 \frac{Lbm}{ft^3} = 45.5 \frac{Lbf}{ft^3}$$

$$\gamma = \frac{6.06 \times 10^{-4}\ lbm/(ft \cdot s)}{45.5\ lbm/ft^3} = 1.32 \times 10^{-5}\ ft^2/s$$

$$Q = 500\ \frac{gal}{min} \times \frac{ft^3}{7.48\ gal} \times \frac{min}{60\ s} = 1.115\ ft^3/s$$

$$\Phi = 8''\ ced\ 40 \quad A = 0.3474\ ft^2 \quad (tablas)$$

$$hf_{AB} = 3$$

$$e = 1.5 \times 10^{-4}\ ft$$

$$hf = \frac{\Delta P}{W}$$

$$hf_{succión} = 0.2\ \frac{(lbf/in^2)(144\ in^2/ft^2)}{45.5\ lbf/ft^3}$$

$$= 0.634\ ft\ aceite/100\ ft$$

$$hf_{descarga} = \frac{1.5\ x\ 144}{45.5} = 4.75\ ft\ aceite/100\ ft$$

Solución:

1.- hf en cañería de succión (8" cedula 40 acero)

$$D = 7.981\ in = 0.666\ ft$$

$$A = 0.3474\ ft^2$$

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{1.115\ ft^3/s}{0.3474\ ft^2} = 0.159\ ft/s$$

1.a. Método de longitudes equivalentes: L = 100 ft

$$r = 0.00025$$

$$Re = \frac{vD}{\gamma} = 3.2 \times \frac{0.666}{1.32 \times 10^{-5}} = 1.615 \times 10^5$$

$$f = 0.0182$$

$$hf = f\,\frac{v^2}{2g}\frac{L}{D} = 0.0182 \times 0.159 \times \frac{100}{0.666}$$

$$= 0.435\ \frac{ft\ aceite}{100\ ft\ cañería}$$

Longitudes equivalentes de accesorios:

2 válvulas adjuntadas abiertas 4.5 c/u 9.0 ft

Cañería recta 15.0 ft

2 codos de media curvatura 18 c/u 36.0 ft

1 T 44 44.0 ft

Total 104.0 ft

$$hf\ total\ succión\ =\ 0.435\ \times \frac{104}{100}\ =\ 0.453\ ft\ aceite$$

$$En\ PSI\colon\ \frac{0.453\ ft}{144\ in^2/ft^2}\ \times\ 45.5\ lbm/ft^3\ =\ 0.157\ PSI$$

2.- Caída de presión en tubería de descarga

$$D\ =\ 0.505\ ft \qquad A\ =\ 0.2006\ ft^2 \qquad v\ =\ \frac{Q}{A}\ =\ \frac{1.115}{0.2006}$$

$$v\ =\ 5.56\ ft/s$$

$$\frac{v^2}{2g}\ =\ \frac{(5.56)^2}{64.4}\ =\ 0.48\ ft\ aceite$$

Por longitudes equivalentes

$$r\ =\ 0.003$$

$$Re\ =\ \frac{Dv}{\gamma}\ =\ \frac{0.505\ \times\ 5.56}{1.32\ \times\ 10^{-5}}\ =\ 2.13\ \times\ 10^5$$

$$f\ =\ 0.018 \qquad fig.2 \qquad L\ =\ 100\ ft$$

$$hf\ =\ f\ \frac{v^2}{2g}\ \times\ \frac{L}{D}\ =\ 0.018(0.48)\ \times\ \frac{100}{0.505}$$

$$=\ 1.71\ \frac{ft\ aceite}{100\ ft\ cañería}$$

Longitudes equivalentes

Cañería recta 50.0 ft

3 válvulas atajo abierto 3.4 c/u 10.2 ft

3 codos media curvatura 14 c/u 42.0 ft

5 T 34 c/u 170.0 ft

Total 276.2 ft

$$hf\ total\ descarga\ =\ 4.75\ +\ 47.5\ =\ 52.25\ ft$$

En PSI:

$$\frac{52.25\ \times\ 45.5}{144}\ =\ 16.5\ PSI$$

3.- Calcular la presión de succión de la bomba en PSI

$$\frac{PA}{W}\ -\ \frac{vA^2}{2g}\ +\ ZA\ +\ hp\ -\ hfAB\ =\ \frac{PB}{W}\ +\ \frac{vB^2}{2g}\ +\ ZB$$

$$\frac{PA}{W}\ =\ \frac{20\ PSI\ \times\ 144}{45.5}\ =\ 63.3\ ft$$

hf = 0.453 Dato: longitud equivalente de succión

$$63.3\ +\ 0\ +\ 23\ +\ 0\ -\ 0.453\ =\ \frac{PB}{W}\ +\ 0.159\ +\ 0$$

$$\frac{P_B}{W}\ =\ 82.7\ ft$$

$$En\qquad PSI = \frac{82.7 \times 45.5}{144} = 26.1PSI$$

4.- Presión de descarga

$$\frac{PC}{W} + \frac{vC^2}{2g} + ZC + hp - hfCD = \frac{PD}{W} + \frac{vD^2}{2g} + Z_D$$

$$\frac{PD}{W} = \frac{100\ PSI \times 144}{45.5} = 317\ ft$$

$$hfCD = 52.25\ ft \qquad dato: longitudes\ equivalentes$$

$$\frac{PC}{W} = 0.48 + 0 + 0 - 52.25 = 317 + 0.48 + 35$$

$$\frac{PC}{W} = 404.3\ ft$$

$$En\ PSI:\ P_descarga = \frac{404.3 \times 45.5}{144} = 127.5\ PSI$$

5.- Presión Diferencial

$$\Delta P = 127.5 - 26.1 = 101.4 PSI$$
$$\Delta P = 404.3 - 82.7 = 321.6 ft\ de\ aceite$$

6.- NPSH disponible = P. succión – P. vapor

La presión de succión basada en la línea tangente al fondo del tanque es:

P. succión – altura del líquido.

$$82.7 - 8 = 74.7 ft$$

$$P.vapor = \frac{PA}{W} = 63.3 \quad Temperatura\ de\ bombeo$$

$$= temp\ ebullicion$$

$$NPSH\ disponible = 74.7 - 63.3 = 11.4\ ft\ aceite$$

7.- HP teórico

$$\frac{PB}{W} + \frac{vB^2}{2g} + ZB + hp - hfBC = \frac{PC}{W} + \frac{vC^2}{2g} + ZC$$

$$82.7 - 0.159 + 0 + hp + 0 = 404.3 + 0.48 + 0$$

$$hp = 321.9\ ft$$

$$HP\ teórico = \frac{hp\ W\ Q}{550} = \frac{321.9 \times 45.5 \times 1.115}{550} = 29.7\ Hp$$

8.- $BHP = \frac{Hp\ teorico}{\%E} = \frac{29.7}{0.8} = 37.1\ Hp$

El NPSH requerido = 10 ft

El NPSH disponible=11.4

La bomba requiere un NPSH menor que el disponible en el sistema, por tanto la bomba es satisfactoria.

4.3.7 Ejercicio 4.2:

Determine la caída de presión disponible para el sistema que se detalla a continuación.

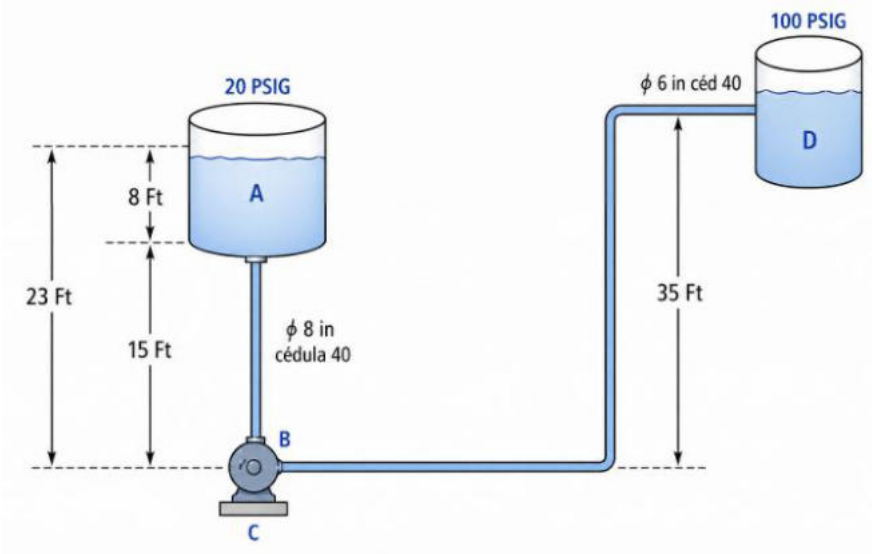


Figura 72. Caída de presión.

$$hf\ succión\ =\ 0.475\ ft$$

$$hf\ descarga\ =\ 4.75\ ft$$

$$hp\ =\ 321.9\ ft$$

$$Q\ =\ 1.115\ \frac{ft^3}{s}$$

$$W\ =\ 45.5\ \frac{lb}{ft^3}$$

$$\rho\ =\ 45.5\ \frac{lbm}{ft^3}$$

$$\mu\ =\ 6.06\ \times\ 10^{-4}\ \frac{lbm}{ft\cdot s}$$

Bernoulli entre A y D

$$\frac{PA}{W} + \frac{vA^2}{2g} + ZA + hp - hfAD - hfcontrol$$

$$= \frac{PD}{W} + \frac{vD^2}{2g} + Z_D$$

$$\frac{PA}{W} = \frac{20 \times 144}{45.5} = 63.3\ ft$$

$$\frac{vA^2}{2g} = 0, \quad Z_A = 23\ ft, \quad hp = 321.9\ ft$$

$$hfAD \text{ sin } válvula\ de\ control = 0.475 + 4.75$$

$$= 5.225\ ft\ (succión + descarga)$$

$$\frac{PD}{W} = \frac{100 \times 144}{45.5} = 317\ ft$$

$$A = 0.2006\ ft^2 \qquad V_D = \frac{Q}{A} = \frac{1.115}{0.2006} = 5.56\ ft/s$$

$$\frac{vD^2}{2g} = \frac{(5.56)^2}{64.4} = 0.48\ ft$$

Reemplazando en la ecuación:

$$63.3 + 0 + 23 + 321.4 - 5.23 - hfcontrol$$

$$= 317 + 0.48 + 35$$

$$hfcontrol = 47.5\ ft\ aceite$$

$$Pfcontrol = \frac{47.5\ ft \times 45.5\ lbf/ft^3}{144\ in^2/ft^2} = 15\ lbf/in^2$$

$$Pfcontrol = 15\ PSI$$

4.3.8 Ejercicio 4.3

Un líquido de densidad 80 $^{Lbm}/_{ft^3}$es bombeado desde un evaporador a razón de 500 G.P.M el vacío en el evaporador es de 26 pulg Hg, y el tanque al cual el líquido es bombeado está abierto a la atmósfera. Las líneas de succión y descarga son de acero de 8" y 6" respectivamente, la caída de presión en la línea de succión es 0.095 PSI y para la descarga 1.96 PSI, para control la caída de presión es de 10 PSI y la eficiencia de la bomba es del 50%. Calcular:

a) BHP

b) La presión de succión en PSI G.

c) La presión de descarga en PSIG.

d) La presión diferencial de la bomba en PSI.

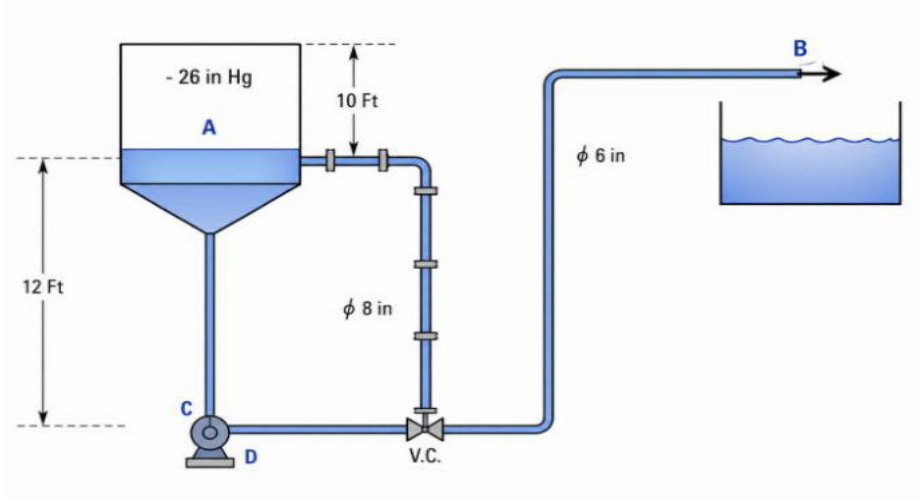


Figura 73. Bombeado desde un evaporador.

Solución:

a) Bernoulli entre A y B.

$$\frac{PA}{W}+\frac{v_A^2}{2g}+Z_A+hp-hf_{AB}=\frac{PB}{W}+\frac{v_B^2}{2g}+Z_B$$

$$\rho=80\frac{Lbm}{ft^3}\quad W=62.4\frac{Lbm}{ft^3}\quad S=\frac{80\,{}^{Lbm}/_{ft^3}}{62.4\,{}^{Lbm}/_{ft^3}}=1.28$$

$$\frac{ft\ H2O}{ft\ liquido}$$

$$\frac{PA}{W}=\frac{-26inHg\ ft}{12in}\times 13.6\frac{ft\ H2O}{ftHg}\times\frac{ftliquido}{1.28ftH2O}$$

$$\frac{PA}{W}=-23ftliquido\quad,\quad Z_A=0\ plano\ de\ referencia$$

$$\frac{v_A^2}{2g}=0\quad Z_A=0(perdida\ por\ friccion)\quad hp=?$$

$$hf_{AB}=0.095+1.96+10=12.055\ PSI$$

$$\frac{PB}{W}=0\ \rightarrow\quad Q=500\frac{gal}{mi}\times\frac{min}{60seg\frac{ft^3}{seg}}$$

$$v_B=\frac{Q}{A}\ \rightarrow\quad A=\Phi 6"acero=0.2006\ ft^2 tablas\ apendice$$

$$v_B=1.115\frac{ft^3}{seg}\times\frac{1}{0.2006ft^2}=5.57\frac{ft}{seg}$$

$$\frac{v_B}{2g}=\frac{(5.57)^2}{64.4}\frac{{}^{ft^2}/_{seg^2}}{64.4\,{}^{ft}/_{seg^2}}=0.482ft$$

$$Z_B=10f$$

$$-23 + 0 + 0 + hp - 21.7 = 0 + 0.482 + 10$$

$$hp = 55.2 ftliquido$$

$$BHP = \frac{hpWQ}{550E} = \frac{52.2 \times 80 \times 1.115}{550 \times 0.5} = 17.89HP$$

$$BHP = 17.89HP$$

b) Presión de succión. (Bernoulli entre Ay C).

$$\frac{PA}{W} + \frac{vA^2}{2g} + ZA - hfAC + hp = \frac{PC}{W} + \frac{vC^2}{2g} + ZC$$

$$\frac{PA}{W} = -23\ ft \qquad \frac{PC}{W} = ? \qquad ZA = 12\ ft\ de\ líquido$$

$$vC = \frac{Q}{A} = \frac{1.115\ ft^3/s}{0.3474\ ft^2} = 3.22\ ft/s$$

$$A_succión\ \Phi 8 = 0.3074\ ft^2\ (tablas)$$

$$hfAC = \frac{(0.095\ lbf/in^2)(144\ in^2/ft^2)}{80\ lbf/ft^3} = 0.171\ ft$$

$$\frac{vC^2}{2g} = \frac{(3.22)^2}{64.4} = 0.161\ ft$$

Reemplazando en Bernoulli:

$$-23 + 0 + 12 - 0.171 + \frac{PC}{W} + 0.161 + 0$$

$$\frac{PC}{W} = -11.3\ ft$$

$$PC = -11.3\,ft \times 80\,\frac{lbf}{ft^3} \times \frac{ft^2}{144\,in^2} = -6.3\,PSIG$$

c) Presión de descarga, Bernoulli entre C y D (o ENTRE A y C).

$$\frac{PC}{W} + \frac{v_C^2}{2g} + Z_C + hp - hf = \frac{PD}{W} + \frac{v_D^2}{2g} + Z_D$$

$$-11.3 + 0.161 + 0 + 55.2 - 0 = \frac{PD}{W} + 0.482 + 0$$

$$\frac{PD}{W} = 43.58ft$$

$$PD = 43.58ft \times \frac{80\,{}^{Lbf}/_{ft^3}}{144\,{}^{pulg^2}/_{ft^2}} = 24.2PSIG$$

$$PD = 24.2PSIG$$

d) Presión Diferencial.

$$PD - PC = 24.2 - (-6.3) = 30.5\,PSIG$$

$$\Delta PDC = 30.5\,PSIG$$

4.3.9 Ejercicio 4.4:

Agua fluye a razón de $4\,\frac{ft^3}{seg}$ en el sistema mostrado a continuación, ¿Qué caballaje es desarrollado por la turbina? Asuma que no hay pérdidas por fricción.

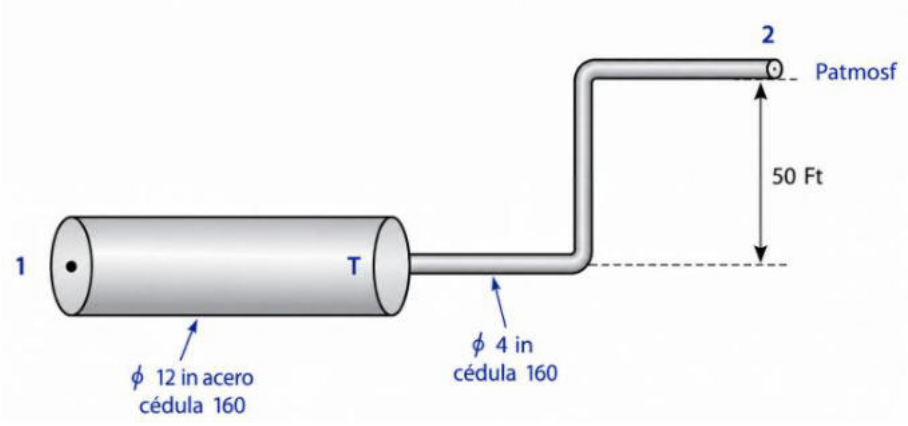


Figura 74. Sistema de agua.

Bernoulli entre 1y 2

$$\frac{P_1}{W} + \frac{{v_1}^2}{2g} + Z_1 + hp - hf_{12} = \frac{P_2}{W} + \frac{{v_2}^2}{2g} + Z_2$$

$$WH_2O = 62.4\ \frac{lbf}{ft^3}$$

$$\frac{P_1}{W} = \frac{853\ lbf/in^2}{62.4\ lbf/ft^3} \times \frac{144\ in^2}{ft^2} = 1992\ ft\ agua \quad \rightarrow \quad \frac{P_2}{W} =$$

$$v_1 = \frac{4\ ft^3/s}{0.5592\ ft^2} = 7.15\ ft/s$$

$$\frac{{v_1}^2}{2g} = \frac{(7.15)^2}{64.4} = 0.794\ ft\ H_2O$$

$$v_2 = \frac{4\ ft^3/s}{0.06447\ ft^2} = 62\ ft/s$$

$$\frac{{v_2}^2}{2g} = \frac{(62)^2}{64.4} = 59.8\ ft\ H_2O$$

Reemplazando en la ecuación de Bernoulli:

$$1992 + 0.794 + 0 + hT - 0 = 0 + 59.8 + 50$$

$$hT = -1883\ ft$$

El signo negativo nos indica que el líquido pierde energía.

$$HP = \frac{h_T WQ}{550} = \frac{1883 \times 62.4 \times 4}{550} = 855HP$$

4.3.10 Ejercicio 4.5:

Calcular la presión para 100ft, y la altura para 43 PSI

Para gasolina s.f. gr. =0.75, para agua Sp gr =1.0, Sal muera Sp gr =1.2

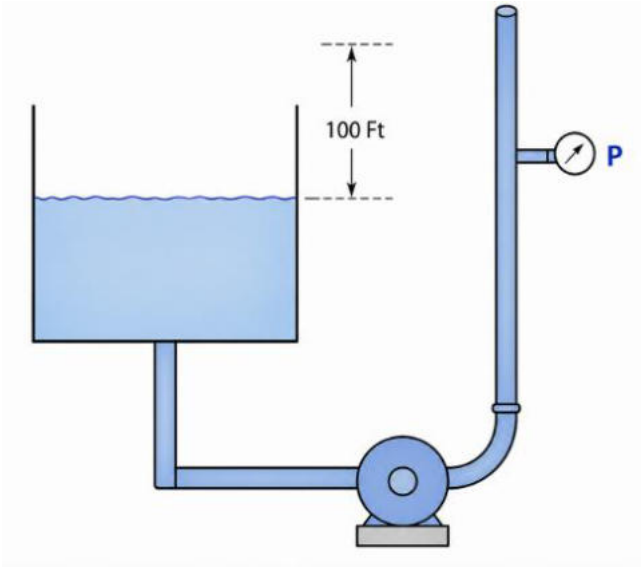


Figura 75. Presión para 100ft de gasolina.

a) Gasolina

$$P = \frac{H \times sp.gr}{2.31}$$

$$H = \frac{P \times 2.31}{sp.gr}$$

$$P = \frac{100 \times 0.75}{2.31} = 325\ PSI$$

$$H = \frac{325 \times 2.31}{0.75} = 134\ ft$$

b) Agua

$$P = \frac{100 \times 1}{2.31} = 43\ PSI$$

$$H = \frac{43 \times 2.31}{1.0} = 100\ ft$$

c) Sal muera

$$P = \frac{100 * 1.2}{2.31} = 52\ PSI$$

$$H = \frac{52 * 2.31}{1.2} = 84ft$$

Siempre se recomienda trabajar en ft de líquido en lugar de presión.

4.3.11 Ejercicio 4.6:

En el diagrama siguiente, encontrar NPSHD.

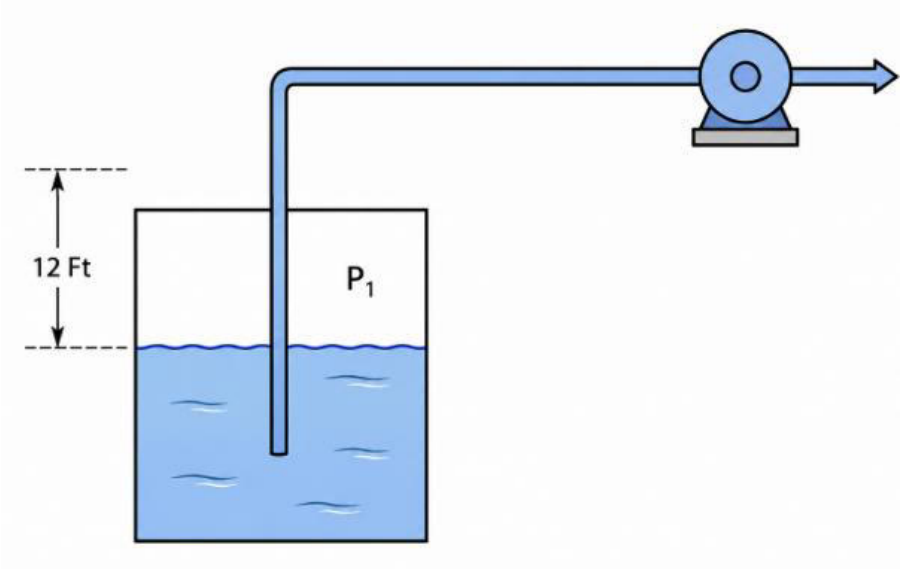


Figura 76. Diagrama para encontrar NPSHD.

Agua 180 °F tanque cerrado

$$Z_1 = 12\ ft$$

$$Pv = 7.5\ PSIA$$

$$Hfs = 2\ ft$$

$$Sp.gr = 0.972$$

$$P_1 = 20\ psi$$

$$NPSHD = \frac{(20 - 7.5)2.31}{0.972} - 12 - 2 = 15.7\ ft$$

$$NPSHD = 15.7\ ft$$

4.3.12 Ejercicio 4.7:

Por medio de un tubo de 3 pulg de diámetro se llevan 1500 lts/min. De jugo de naranja desde un depósito en el suelo hasta un tanque de almacenamiento situado a 30 metros. De altura.

Calcular la potencia de la bomba necesaria para ello si se supone una eficiencia de 100% y no hay pérdidas de fricción en el tubo.

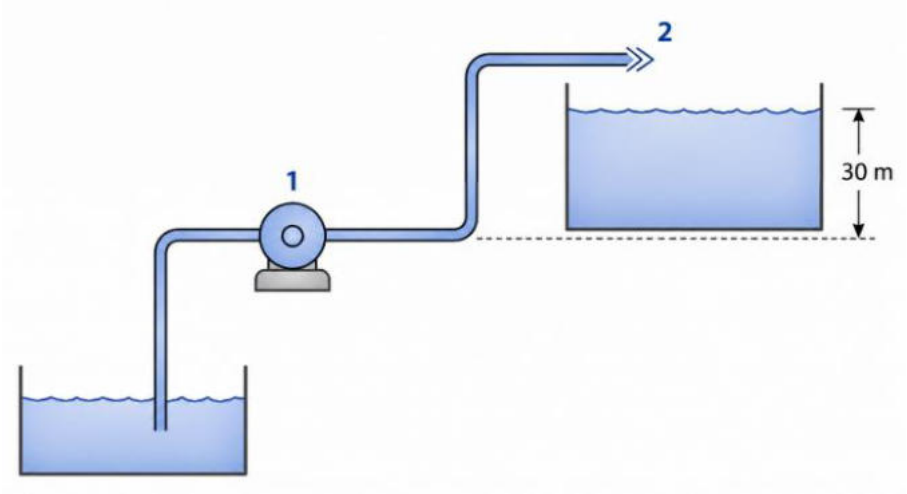


Figura 77. Potencia de bomba.

Solución:

Área del tubo

$$\frac{\pi}{4}D^2 = \frac{\pi}{4}\left(\frac{3pulg * 2.5cm}{pulg}\right)^2 = 45.5cm^2$$

Caudal

$$Q=1500\ \frac{\text{lts}}{min} * \frac{1000\ cm^3}{lts} * \frac{min}{60seg} = 250000\frac{cm^3}{seg}$$

Velocidad

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{250000\ cm^3/s}{45.5\ cm^2} = 549.5\ \frac{cm}{s} \times \frac{m}{100\ cm} = 5.49\ \frac{m}{s}$$

Aplicando Bernoulli entre (1) y (2)

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{{V_1}^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{{V_2}^2}{2g} + Z_2 + Hf - \varepsilon_{bomba}$$

$$\varepsilon_{bomba} = \frac{{V_2}^2}{2g} + Z_2$$

$$\varepsilon_{bomba} = \frac{(5.49)^2}{2 \times 9.8} + 30$$

$$\varepsilon_{bomba} = 31.54\ m$$

Potencia necesaria =

$$\frac{\varepsilon_{bomba} \times Q}{Eff} = \frac{31.54}{1} \times 25\ \frac{kg}{s}$$

$$Potencia\ necesaria = 792\ \frac{m \cdot kg}{s}$$

$$1\ HP = 75\ \frac{m \cdot kg}{s}$$

$$Potencia = 792\ \frac{m \cdot kg}{s} \times \frac{1\ HP}{75\ m \cdot kg/s} = 10.6\ HP$$

Se necesita una bomba de 11 HP de potencia.

4.3.13 Ejercicio 4.8:

¿Qué potencia se necesita para elevar 2000 L de leche a una altura de 5 m en 2 minutos? Exprese el resultado en watts y caballos de vapor (CV), considerando una densidad de la leche de 1,032 g/cm³ y despreciando pérdidas.

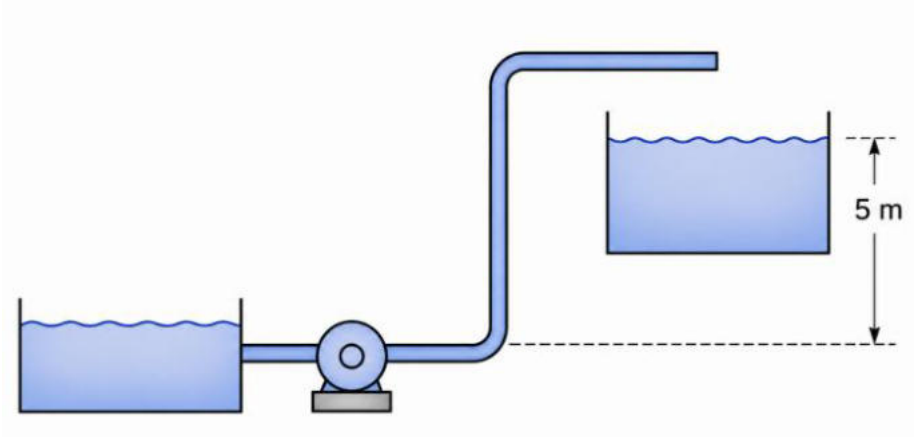


Figura 78. Potencia necesaria para elevar 2000 L de leche.

T = 2min

Potencia= ¿

Trabajo= Energía Potencial = mgh = $\rho v g h$

Trabajo=$1.032\frac{gr}{cm^3} * 2000lts * \frac{1000cm^3}{lts} * \frac{9.8m}{seg} * 5m * \frac{Kg}{1000gr}$

Trabajo=$101136\frac{Kg\ m^2}{seg}(N * m)\ Joule$

Trabajo= Energía Potencial = $101136\ Joule$

Potencia=$\frac{Trabajo}{tiempo} = \frac{101136\ Joule}{2min} * \frac{min}{60seg} = 842.8 \frac{Joul}{seg}$

Potencia= $842.8\ (watts)$

Potencia =$842.8\ (watts) * \frac{1cv}{736watts} = 1.14\ CV$

Potencia ≈ 1.15 CV

4.4 BANCO DE PREGUNTAS

Parte I: Preguntas Teóricas

1. ¿Cuál es la función principal de una bomba en un sistema hidráulico?

a) Disminuir la energía cinética del fluido.
b) Aumentar la presión o energía del fluido.
c) Medir el caudal del fluido.
d) Reducir las pérdidas por fricción.

2. ¿Qué tipo de bomba utiliza un impulsor giratorio para impartir energía al fluido?

a) Bomba centrífuga.
b) Bomba reciprocante.
c) Bomba de engranajes.
d) Bomba de diafragma.

3. ¿Qué magnitud representa la 'Altura Total Dinámica de Descarga' (TDH)?

a) La suma de la altura geométrica más las pérdidas por fricción.

b) La diferencia entre presiones de succión y descarga.

c) La potencia absorbida por el motor.

d) La densidad del fluido.

4. ¿Qué es el NPSH (Net Positive Suction Head)?

a) Altura total de descarga.

b) Diferencia entre presión de descarga y presión atmosférica.

c) Altura neta positiva de succión disponible en la bomba.

d) Eficiencia hidráulica de la bomba.

5. Si el NPSH disponible es menor que el requerido, ocurre:

a) Cavitación en la bomba.

b) Mayor eficiencia.

c) Flujo laminar estable.

d) Reducción del caudal de succión.

6. La potencia hidráulica entregada por la bomba se calcula mediante:

a) $P = \gamma QH$

b) $P = Q/H$

c) $P = \mu vD$

d) $P = \rho v^2$

7. ¿Qué tipo de bomba se caracteriza por mover un volumen fijo de fluido por ciclo?

a) Centrífuga.

b) De desplazamiento positivo.

c) De chorro (Jet Pump).

d) Axial.

8. En una bomba centrífuga, el impulsor convierte la energía:

a) Cinética en potencial.

b) Mecánica en cinética.

c) Térmica en potencial.

d) Potencial en eléctrica.

9. ¿Cuál de los siguientes instrumentos mide la velocidad de flujo mediante la diferencia de presión entre dos puntos?

a) Rotámetro.

b) Tubo de Pitot.

c) Manómetro.

d) Termopar.

10. El tubo Venturi mide el caudal utilizando:

a) La ecuación de continuidad y Bernoulli.

b) La ley de Boyle-Mariotte.

c) La ecuación de Poiseuille.

d) La ley de Fourier.

Parte II: Ejercicios Aplicados

11. Una bomba eleva 1500 L/min de agua a una altura de 30 m. Si la eficiencia es del 80%, determine la potencia del motor.

a) 7.35 HP

b) 9.81 HP

c) 11.0 HP

d) 15.2 HP

12. Si una bomba trabaja con una presión de succión de 0.2 bar y una presión de descarga de 2.5 bar, ¿cuál es la presión diferencial?

a) 1.8 bar

b) 2.3 bar

c) 2.7 bar

d) 2.0 bar

13. Una bomba con Q = 0.02 m³/s, H = 15 m y η = 70% tiene una potencia útil de:

a) 2.1 kW

b) 3.0 kW

c) 4.2 kW

d) 5.6 kW

14. En un Venturímetro, el diámetro de entrada es 0.1 m y el de garganta 0.05 m. La diferencia de presión es 2000 Pa, densidad del fluido 1000 kg/m³ y C = 0.98. ¿Cuál es el caudal?

a) 3.7×10^{-3} m³/s

b) 4.5×10^{-3} m³/s

c) 5.0×10^{-3} m³/s

d) 5.8×10^{-3} m³/s

15. Un tubo de Pitot indica una diferencia de 25 mm de agua para medir la velocidad del aire ($\rho = 1.2$ kg/m³). Calcule la velocidad.

a) 19.6 m/s

b) 22.4 m/s

c) 25.5 m/s

d) 28.0 m/s

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anbarlooei, H. R., Celis, G. E. O., Santos, C. M. M., & Cruz, D. O. A. (2025). On the turbulent friction and the near wall structure of pipe flows. Physics of Fluids, 37(2). https://doi.org/10.1063/5.0249159

Brown, G. (1965). Operaciones Básicas de la Ingeniería Química. Editorial Marín .

Cheng, C., & Zhang, G.-T. (2021). Deep Learning Method Based on Physics Informed Neural Network with Resnet Block for Solving Fluid Flow Problems. Water, 13(4), 423. https://doi.org/10.3390/w13040423

Ferretti, P., Pagliari, C., Montalti, A., & Liverani, A. (2023). Design and development of a peristaltic pump for constant flow applications. Frontiers in Mechanical Engineering, 9. https://doi.org/10.3389/fmech.2023.1207464

Fukami, K., Fukagata, K., & Taira, K. (2020). Assessment of supervised machine learning methods for fluid flows. Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 34(4), 497–519. https://doi.org/10.1007/s00162-020-00518-y

Geankoplis, C. (1967). Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias. Compañía editorial Continental.

Gul, S., Erge, O., & van Oort, E. (2020). Frictional pressure losses of Non-Newtonian fluids in helical pipes: Applications for automated rheology measurements. Journal of Natural Gas

Science and Engineering, 73, 103042. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.103042

Gülich, J. F. (2014). Pump Types and Performance Data. En Centrifugal Pumps (pp. 43–78). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-40114-5_2

Himmelblau, D. (1971). Principios y Cálculos Básicos de la Ingeniería Química. Compañía editorial Continental.

Kochkov, D., Smith, J. A., Alieva, A., Wang, Q., Brenner, M. P., & Hoyer, S. (2021). Machine learning–accelerated computational fluid dynamics. Proceedings of the National Academy of Sciences, 118(21). https://doi.org/10.1073/pnas.2101784118

Li, Q., Ding, Y., Chen, G., Xuan, Y., Gao, N., Li, N., & Hao, X. (2024). Study on operation performance and application potential of the piston-type thermally-driven pump. Energy Conversion and Management, 300, 117910. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117910

Li, W., Ji, L., Agarwal, R., Shi, W., & Zhou, L. (2024). Mixed Flow Pumps. Wiley. https://doi.org/10.1002/9781119910381

Li, X., Tao, S., Li, Y., & Wan, L. (2023). A Study on the Measurement Characteristics of the Spring-Plate Flow Measurement Device. Water, 15(11), 2092. https://doi.org/10.3390/w15112092

McCABE, & SMITH. (1973). Operaciones básicas de Ingeniería Química . REVERTE .

Morimoto, M., Fukami, K., Zhang, K., & Fukagata, K. (2022). Generalization techniques of neural networks for fluid flow estimation. Neural Computing and Applications, 34(5), 3647–3669. https://doi.org/10.1007/s00521-021-06633-z

Ocon, P., & Tojo, J. (1980). Problemas de Ingeniería Química. Aguilar.

Peixoto, J., Sousa, J., Carvalho, R., Santos, G., Cardoso, R., & Reis, A. (2023). End-to-End Solution for Analog Gauge Monitoring Using Computer Vision in an IoT Platform. Sensors, 23(24), 9858. https://doi.org/10.3390/s23249858

Peixoto, J., Sousa, J., Carvalho, R., Santos, G., Mendes, J., Cardoso, R., & Reis, A. (2022). Development of an Analog Gauge Reading Solution Based on Computer Vision and Deep Learning for an IoT Application. Telecom, 3(4), 564–580. https://doi.org/10.3390/telecom3040032

Pimenta, T. A., & Campos, J. B. L. M. (2012). Friction losses of Newtonian and non-Newtonian fluids flowing in laminar regime in a helical coil. Experimental Thermal and Fluid Science, 36, 194–204. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2011.09.013

Raissi, M., Yazdani, A., & Karniadakis, G. E. (2020). Hidden fluid mechanics: Learning velocity and pressure fields from flow visualizations. Science, 367(6481), 1026–1030. https://doi.org/10.1126/science.aaw4741

Rundo, M. (2017). Models for Flow Rate Simulation in Gear Pumps: A Review. Energies, 10(9), 1261. https://doi.org/10.3390/en10091261

Sreenivasan, K. R. (2025). A brief perspective on fluid mechanics research. Physics of Fluids, 37(8). https://doi.org/10.1063/5.0283288

Taira, K., & Nair, A. G. (2022). Network-based analysis of fluid flows: Progress and outlook. Progress in Aerospace Sciences, 131, 100823. https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2022.100823

Treybal, R. (1988). Operaciones de Transferencia de Masa. Mc Graw Hill.

Vemulapalli, S., & Venkata, S. K. (2022). Parametric analysis of orifice plates on measurement of flow: A review. Ain Shams Engineering Journal, 13(3), 101639. https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.11.008

Wang, L., Wan, N., Yang, Y., Wang, Y., Zhao, Y., Zhu, J., Yang, M., Lyu, Y., Liu, M., & Zhao, Y. (2025). Development of leadless packaged heavily doped N-type 4H-SiC pressure sensor family for harsh environments. Microsystems & Nanoengineering, 11(1), 74. https://doi.org/10.1038/s41378-025-00929-z

Fundamentos y aplicaciones del transporte de fluidos y calor: Un enfoque desde la ingeniería química se publicó en el mes de noviembre de 2026.

ISBN: 978-9907-802-30-6

Grupo Editorial BLR
Ecuador
Cel: +593 98 320 4362
https://grupoblr.com/
publicaciones@grupoblr.com

BIOGRAFÍA DE AUTORES

Wilson Patricio León Cueva:
Docente de la Universidad Técnica de Machala. Profesional en Ingeniería Química con experiencia en docencia, investigación y vinculación. Sus principales áreas de interés comprenden los procesos industriales, operaciones unitarias, aprovechamiento de residuos agroindustriales y desarrollo de alternativas sostenibles.

Cristina Vanessa Fernández Vélez:
Docente de la Universidad Técnica de Machala. Profesional en Ingeniería Química con experiencia en docencia, investigación y vinculación. Sus principales áreas de interés comprenden los procesos industriales, operaciones unitarias y desarrollo de alternativas sostenibles.

FUNDAMENTOS Y APLICACIONES DEL TRANSPORTE DE FLUIDOS Y CALOR: UN ENFOQUE DESDE LA INGENIERÍA QUÍMICA

Estimado lector, el transporte de fluidos y la transferencia de calor constituyen fundamentos esenciales para comprender, diseñar y operar numerosos procesos de la Ingeniería Química. Su dominio permite analizar el comportamiento de los fluidos dentro de tuberías y equipos, seleccionar sistemas de bombeo y medición, determinar condiciones de presión y comprender los mecanismos mediante los cuales se transmite la energía térmica. Operaciones Unitarias Básicas presenta estos fundamentos desde una perspectiva clara, progresiva y aplicada, articulando los principios físicos y matemáticos con situaciones propias de la ingeniería y del entorno industrial.

La obra se estructura en cuatro unidades. La primera aborda los fundamentos del transporte de fluidos, incluyendo las propiedades de los fluidos, los diferentes regímenes de flujo, las leyes de conservación, la ecuación de Bernoulli, el número de Reynolds y las pérdidas por fricción. La segunda unidad se centra en bombas y medición de caudal, estudiando la clasificación y funcionamiento de las bombas, sus parámetros de operación, curvas características, NPSH y criterios de selección, además de instrumentos como venturímetros, orificios y rotámetros.

La tercera unidad desarrolla la manometría y la medición de presión, mientras que la cuarta profundiza en la transferencia de calor, abordando conducción, convección y radiación, junto con resistencias térmicas, coeficientes globales y aplicaciones en intercambiadores y sistemas térmicos. El contenido se complementa con ejemplos numéricos, ejercicios resueltos, diagramas técnicos y bancos de preguntas, recursos concebidos para facilitar la comprensión de los conceptos y fortalecer las competencias analíticas y resolutivas necesarias en la formación ingenieril.

Una obra dirigida principalmente a estudiantes, docentes y profesionales de Ingeniería Química, Ingeniería de Alimentos y disciplinas afines, que encontrarán en sus páginas una herramienta de apoyo para el estudio, la enseñanza y la aplicación práctica de los principios fundamentales de las operaciones unitarias.

Comprender cómo se mueven los fluidos y cómo se transfiere el calor es comprender una parte esencial de cómo funcionan los procesos industriales**.**

GRUPO BLR

Grupo Editorial BLR
Ecuador
Cel: +593 98 320 4362
https://grupoblr.com/
publicaciones@grupoblr.com

ISBN: 978-9907-802-30-6

9 789907 802306

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MACHALA 1969