

INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE FLUJO

Material de clase
para mecánica de fluidos

Adonay Moisés Varela Muñoz

Varela Muñoz, Adonay Moisés

Introducción a los sistemas de flujo: Material de clase para mecánica de fluidos / Adonay

Moisés Varela Muñoz

Bogotá : Universidad Piloto de Colombia, 2020

269 páginas : ilustraciones, gráficas

Incluye referencias bibliográficas

ISBN: 978-958-5106-12-3

1. MECÁNICA DE FLUIDOS
2. SISTEMA DE FLUJO - HIDRAULICA
3. HIDRAULICA

CCD 532.8

Presidente

Olinto Eduardo Quiñones Quiñones

Rectora

Ángela Bernal Medina

Director de Publicaciones y Comunicación Gráfica

Rodrigo Lobo-Guerrero Sarmiento

Director de Investigaciones

Mauricio Hernández Tascón

Coordinador General de Publicaciones

Diego Ramírez Bernal

Decano del programa de Ingeniería Mecatrónica

Jaime Durán García

ISBN

978-958-5106-12-3

Primera edición 2020

Bogotá, Colombia

Autor

Adonay Moisés Varela Muñoz

Editora

Nancy Liliana Rodríguez V.

Diseño

Shirly Delgado

Daniela Martínez Díaz

Carolina Suárez Tovar

Departamento de Publicaciones y Comunicación Gráfica

Diseño de Portada

Juan José Camargo Gómez

Fotografía Portada

César Couto

<https://unsplash.com>

Introducción a los sistemas de flujo

Material de clase para la mecánica de fluidos

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

INTRODUCCIÓN A LOS
SISTEMAS DE FLUJO
Material de clase para mecánica de fluidos

Contenido

1. Principios Básicos y Conceptos Fundamentales

1.1 Propiedades de los fluidos

1.1.1. Densidad (ρ)

1.1.2. Peso específico (γ)

1.1.3. Densidad relativa

1.1.4. Viscosidad

1.1.5. Presión

1.2. Ecuaciones básicas de la mecánica de fluidos

1.2.1. Ecuación de continuidad

1.2.2. Teorema del impulso y de la cantidad de movimiento

1.2.3. Teorema de Bernoulli

1.2.3.1. Ecuación de Bernoulli para un flujo real

1.2.3.2. Ecuación general de la energía

1.3. Ejemplos de aplicación del teorema de Bernoulli

1.3.1. Ejemplo 1

1.3.2. Ejemplo 2

1.3.3. Ejemplo 3

1.3.4. Ejemplo 4

1.4 Turbo-máquinas

1.4.1. Clasificación de las máquinas hidráulicas

1.4.2. Bombas hidráulicas

1.5 Simbología y normalización en los sistemas hidráulicos

1.5.1. Justificación

1.5.2. Símbolos básicos

2. Análisis del flujo de un fluido en las bombas centrífugas

2.2. Casos particulares de los triángulos de velocidad

2.3. Ecuación de Euler

2.3.1. Otras formas de la ecuación de Euler

2.4 Altura teórica máxima

2.5 Pérdidas en las bombas

2.6 Ecuaciones para el cálculo de las potencias y de las eficiencias en las bombas centrífugas

2.6.2 Eficiencias

2.7 Grado de reacción teórico en las bombas

3. Sistemas de flujo simple o unifilares

3.1. Definiciones

3.2. Pérdidas en los sistemas de flujo

3.3. Altura útil o efectiva en un sistema de bombeo

4. Cavitación en los sistemas de flujo

4.1. Generalidades

4.2. Características de la cavitación

4.3. Análisis de la energía disponible en la tubería de succión

4.4. Altura máxima de instalación de la bomba

Osborne Reynolds

5. Análisis de casos particulares en los sistemas de flujo

5.1. Caída de presión ΔP desconocida; L , D , Q conocidas 181

5.2. Longitud desconocida, Q , D , ΔP conocidas

5.3. Diámetro desconocidos, Q , L , ΔP conocidas

5.4. Caudal desconocido, D , L , ΔP conocidas

5.5. Análisis de sistemas de flujo simples con una o más variables desconocidas

6. Sistemas de flujo con tuberías en serie

7. Sistemas de flujo con tuberías en paralelo

8. Sistemas de flujo con tuberías ramificadas

9. Leyes de Similitud en las Turbo-máquinas

9.1. Análisis dimensional

9.2. Leyes de similitud o de afinidad

9.3. Velocidad específica en las turbo-máquinas

9.3.1. Propiedades de la velocidad específica

Referencias

Lista de figuras

[Figura 1.1. Concepto de viscosidad](#)

[Figura 1.2. Ecuación de continuidad](#)

[Figura 1.3. Teorema de Bernoulli](#)

[Figura 1.4. Ejemplo 1.3.1](#)

[Figura 1.5. Ejemplo 1.3.2.](#)

[Figura 1.6. Ejemplo 1.3.3](#)

[Figura 1.7. Ejemplo 1.3.4](#)

[Figura 1.8. Bomba centrífuga. \(Peerless Pump\)](#)

[Figura 1.9. Componentes de una bomba centrífuga.](#)

[Figura 1.10. Bomba de caja partida \(Peerless Pump\).](#)

[Figura 1.11. Bomba regenerativa.](#)

[Figura 1.12. Bomba peristáltica.](#)

[Figura 1.13. Bomba de flujo mixto \(Peerless Pump\).](#)

[Figura 1.14. Tipos de impulsores.](#)

[Figura 1.15. Representación esquemática de impulsores utilizados en las bombas.](#)

[Figura 1.16. Bomba de engranajes externos.](#)

[Figura 1.17. Bomba de Vapor.](#)

[Figura 2.1. Impulsor con alabes hacia atrás.](#)

[Figura 2.2. Impulsor con alabes curvados hacia delante](#)

[Figura 2.3. Variación de los triángulos de velocidad](#)

[Figura 2.4. Principio del momento angular para el fluido dentro del impulsor](#)

[Figura 2.5. Triángulos de velocidad](#)

[Figura 2.6. Curvas características ideales](#)

[Figura 2.7. Pérdidas en las bombas](#)

[Figura 2.8. Ejercicio 2.1](#)

[Figura 3.1. Sistemas de flujo – terminología](#)

[Figura 3.2. Pérdidas en un sistema de flujo](#)

[Figura 3.2.1. Ensachamiento gradual o brusco y contracción gradual o brusca](#)

[Figura 3.2.2. Codos y curvas Curvas](#)

[Figura 3.2.3. Conexiones en T.](#)

[Figura 3.2.4. Conexiones en Y con diámetros iguales.](#)

[Figura 3.2.5. Entradas de tuberías.](#)

[Figura 3.2.6. Salidas de tubería.](#)

[Figura 3.2.7. Válvulas de pie con filtro.](#)

[Figura 3.2.8. Válvulas de retención.](#)

[Figura 3.2.9. Válvulas de globo y válvula de bola.](#)

[Figura 3.3. Diagrama de Moody.](#)

[Figura 3.4. Ejercicio 3.1](#)

[Figura 3.5. Ejercicio 3.5](#)

[Figura 3.6. Ejercicio 3.7](#)

[Figura 3.7. Ejercicio 3.8](#)

[Figura 4.1. Riesgos de cavitación](#)

[Figura 4.2. Influencia de la cavitación en un sistema de bombeo](#)

[Figura 4.3. Ejercicio 4.1](#)

[Figura 4.4. Ejercicio 4.3](#)

[Figura 4.5. Ejercicio 4.5](#)

[Figura 4.6. Osborne Reynolds.](#)

[Figura 5.1. Ejemplo 5.1.](#)

[Figura 5.2. Ejemplo 5.2.](#)

[Figura 5.3. Ejemplo 5.3.](#)

[Figura 5.4. Ejemplo 5.4.](#)

[Figura 5.5. Ejemplo 5.5.1](#)

[Figura 5.6. Ejemplo 5.5.2](#)

[Figura 5.7. Ejercicio 5.2](#)

[Figura 5.8. Ejercicio 5.3](#)

[Figura 5.9. Ejercicio 5.4](#)

[Figura 5.10. Ejercicio 5.5](#)

[Figura 5.11. Ejercicio 5.6](#)

[Figura 5.12. Ejercicio 5.9](#)

[Figura 6.1. Representación esquemática de tuberías conectadas en serie.](#)

[Figura 6.2. Radio hidráulico](#)

[Figura 6.3. Tramo de tubería en serie](#)

[Figura 6.4. Ejercicio 6.1](#)

[Figura 6.5. Ejercicio 6.2](#)

[Figura 6.6. Ejercicio 6.3.](#)

[Figura 6.7. Ejercicio 6.4.](#)

[Figura 6.8. Ejercicio 6.5.](#)

[Figura 6.9. Ejercicio 6.6.](#)

[Figura 6.10. Ejercicio 6.7.](#)

[Figura 7.1. Sistema de tuberías conectadas en paralelo.](#)

[Figura 7.2. Sistemas con tuberías en paralelo..](#)

[Figura 7.3. Ejercicio 7.1.](#)

[Figura 7.4. Ejercicio 7.2.](#)

[Figura 7.5. Ejercicio 7.3.](#)

[Figura 7.6. Ejercicio 7.4.](#)

[Figura 7.7. Ejercicio 7.5.](#)

[Figura 7.8. Ejercicio 7.6.](#)

[Figura 7.9. Ejercicio 7.7.](#)

[Figura 7.10. Ejercicio 7.8.](#)

[Figura 8.1. Sistema de flujo con tuberías ramificadas](#)

[Figura 8.2. Ejercicio 8.1](#)

[Figura 8.3. Ejercicio 8.2](#)

[Figura 8.4. Ejercicio 8.3](#)

[Figura 8.5. Ejercicio 8.4](#)

[Figura 8.6. Ejercicio 8.5](#)

[Figura 8.7. Ejercicio 8.6](#)

[Figura 8.8. Ejercicio 8.7](#)

[Figura 8.9. Ejercicio 8.8](#)

[Figura 8.10. Ejercicio 8.9](#)

[Figura 8.11. Ejercicio 8.10](#)

[Figura 9.1. Tipos de impulsores en función de la velocidad específica \$N_s\$](#)

[Figura 9.2. Velocidad específica en las bombas hidráulicas](#)

[Figura 9.3. Ejercicio 9.5.](#)

Lista de tablas

[Tabla 1.1. Propiedades del agua](#)

[Tabla 1.2. Clasificación de las bombas hidráulicas](#)

[Tabla 1.3. Chequeo para problemas de funcionamiento \(Solamente como referencia\).](#)

[Identificación de las causas.](#)

[Tabla 2.1. Pérdidas en las bombas.](#)

[Tabla 3.1. Coeficiente de pérdida de carga \$\lambda\$](#)

[Tabla 3.2. Rugosidad absoluta k \(mm\) para tuberías comerciales nuevas.](#)

[Tabla 3.3. Longitudes equivalentes de tubería en pies para accesorios en acero y flujo en la zona de total turbulencia. Diámetro tubería en plg](#)

[Tabla 3.4. Coeficientes de pérdidas secundarias \$\lambda'\$ en accesorios*](#)

[Tabla 3.5. Tuberías de acero comercial según Normas ANSI B 36.10 y BS1600.1. Calibre 40.](#)

[Tabla 4.1. Presiones absolutas y temperaturas de saturación para vapor de agua](#)

[Tabla 9.1. Tipos de bombas en función de la velocidad específica](#)

Simbolos y siglas

A = Área

$ACEI$ = Altura de carga estática de impulsión o de descarga

$ACEI$ = Altura de carga estática total

$ACTI$ = Altura de carga total de impulsión

b_1 = Ancho en la entrada del impulsor

b_2 = Ancho en la descarga del impulsor

BHP = Potencia al freno

c = Velocidad del sonido

c^1 = Altura de la bomba a válvula cerrada

CES = Carga estática de succión

D = Diámetro

D_1 = Diámetro interior

D_2 = Diámetro exterior

dF = Fuerzas radiales que actúan sobre la masa

dL / dt = Momento hidráulico

EES = Elevación estática de succión

ETS = Altura efectiva de succión o elevación total de succión

Eu = Número de Euler

Fr = Número de Froude

H_D = Energía dinámica

H_p = Energía de presión

_AH^p_E = Pérdidas primarias

_AH^t_B = Pérdida total de carga por fricción

_AH^T_E = Pérdidas totales por fricción

h = Altura

Hⁱ_{int} = Pérdida de carga

H_m = Carga útil, real o efectiva

H_u = Carga de la unión o junta

I = Momento lineal

e = Rugosidad relativa

L = Suma total de los tramos rectos de tubería

L = Longitud

L = Momento angular

m = Masa

M_a = Número de Mach

$NPSH_d$ = Cabeza neta de succión positiva disponible

$NPSH_r$ = Cabeza neta de succión requerida

N_s = Velocidad específica

P = Potencia

P_i = Potencia interna de la bomba

p_s = Presión de saturación del vapor

P_u = Potencia útil o potencia efectiva o real de la bomba

Q = Caudal útil, real o efectivo

Q_d = Caudal ideal, teórico o de diseño

Q_d = Caudal ideal, teórico o de diseño

q_i = Caudal interno en la bomba

R = Vector posición del cuerpo con relación al eje o centro de rotación O

R_E = Número de Reynolds

R_h = Radio hidráulico

S.I.U. = Sistema Internacional de Unidades

t = Tiempo

U = Unión o junta

UTM = Unidad técnica de masa

V = Volumen

V_D = Velocidad del flujo (m/s)

V_n = Velocidad absoluta

We = Número de Weber

Δp = Caída de presión

ΔZ = Cambio de altura

ΣL_e = Suma de todas las longitudes

Σλ'_E = Suma de los coeficientes de pérdidas secundarias

α = Ángulo de admisión del fluido en la bomba

β = Ángulo de la velocidad relativa

γ = Peso específico

η = Viscosidad dinámica o absoluta

λ' = Coeficiente de pérdida secundaria

λ_D = Factor de fricción o coeficiente de pérdida de carga en la tubería de descarga

λ_E = Factor de fricción o coeficiente de pérdida de carga en la tubería de succión

λ_T = Coeficiente total de pérdidas

λ = Factor de fricción

μ = Viscosidad cinemática

ρ = Densidad

σ = Coeficiente de cavitación

ω = Velocidad angular

_____ 1 _____

Principios Básicos y Conceptos Fundamentales

El objetivo principal de estas notas de clase es ilustrar los métodos básicos para el análisis de flujo de fluidos a través de tuberías. El aspecto más importante que se ha tenido en cuenta, es el papel que desempeña la bomba hidráulica en el transporte de fluidos, específicamente, mediante bombas centrífugas.

Los sistemas de flujo que se analizarán, serán los sistemas unifilares o de conexión en serie de tuberías, los sistemas de tuberías conectados en paralelo y la conexión de tuberías ramificadas.

El análisis del flujo de un fluido, cuando circula a través de una bomba y por las tuberías en un sistema hidráulico, se basa en los principios y conceptos relacionados con la teoría de la mecánica de fluidos. Estas aplicaciones son de gran importancia en la industria y en otras áreas de la ingeniería.

Una de las variables que intervienen en el análisis del movimiento de fluidos, es el efecto de la viscosidad, la cual se relaciona con el coeficiente o factor de fricción λ que, como se verá en las aplicaciones desarrolladas a lo largo del texto, es trascendental siempre y cuando se aplique bajo criterios racionales, fundamentados en la teoría fluido-dinámica desarrollada, y la cual debe ser corroborada por la experimentación.

Su gran ventaja radica no sólo en su racionalidad, sino en que además posibilita su aplicación con criterio universal, es decir, a gran número de fluidos en distintas condiciones de temperatura y aún en tuberías no circulares.

1.1 Propiedades de los fluidos

Un fluido puede definirse como una sustancia que se deforma continuamente bajo la acción de un esfuerzo cortante, o como una sustancia que debido a su poca cohesión intermolecular, carece de forma propia y adopta la del recipiente que lo contiene. En las aplicaciones de ingeniería interesan los efectos promedio o macroscópicos de las moléculas que cambian continuamente de posición.

Por otro lado, los efectos macroscópicos son los que pueden medirse u observarse, así que el fluido se considera como una sustancia infinitamente indivisible, es decir, es un “medio continuo” o un agregado que se mueve o se deforma en el tiempo y en el espacio. Una consecuencia de esta idealización es que toda propiedad del fluido tiene un valor en cada punto en el espacio, asimismo, cada propiedad es una función continua de posición y tiempo.

Los fluidos tienen ciertas características descriptivas llamadas propiedades, las cuales deben expresarse en un sistema adecuado de unidades. Las propiedades pueden ser extensivas cuando dependen de la masa total del sistema y se refieren a valores totales, como el volumen total o energía interna total; o bien, pueden clasificarse en intensivas, cuando son independientes de la masa, como la presión, la temperatura y la densidad.

Las principales propiedades de los fluidos utilizados en el análisis de las turbo-máquinas son: turbinas y bombas hidráulicas. En el numeral 1.4 se describen las turbo-máquinas.

1.1.1. Densidad (ρ)

Para una región del fluido con cierto volumen V , un punto cualquiera dentro del fluido de masa dm , volumen dV y de coordenadas (x_0, y_0, z_0) , su densidad se define como la masa por unidad de volumen.

La densidad media dentro del volumen V está dada por:

$$\rho = m/V \quad (1.1)$$

Esta propiedad no es la misma en el punto anteriormente descrito.

Para determinar la densidad del punto, se elige un volumen dV y en este caso $\rho = dm / dV$. El volumen dV debe ser relativamente grande pero inferior al volumen V para obtener un valor medible de la densidad.

Si dV fuera muy pequeño, no sería posible establecer un valor definible para la densidad, así que el valor límite de dV es entonces dV' y queda definida la densidad en el punto mediante:

$$\rho = \lim_{dV \rightarrow dV'} (dm / dV)$$

Para los demás puntos del fluido, la distribución de la densidad resulta una función de sus coordenadas espaciales en relación con cierto instante de tiempo t .

$$\rho = \rho(x, y, z, t)$$

La densidad es una cantidad escalar que solo requiere la especificación de una sola magnitud para su descripción completa.

Si el agua tiene 4°C y presión atmosférica al nivel del mar:

$$\rho = 1000 \text{ kg} / \text{m}^3 \text{ o } \rho = 102 \text{ UTM} / \text{m}^3$$

1 UTM (Unidad Técnica de Masa) = 9.8 kg

1.1.2 *Peso específico (γ)*

Para un fluido esta propiedad depende de la gravedad. Sin embargo, se asume constante en el análisis de las turbo-máquinas.

El peso específico está definido por:

$$\gamma = \text{peso de la sustancia} / \text{volumen ocupado (1.2)}$$

Las unidades más utilizadas son:

$$[\text{lb}_s / (\text{pie}^3)] \text{ y } [\text{N} / \text{m}^3]$$

De acuerdo con la mecánica de fluidos: $\gamma = \rho \cdot g$

Para agua a 4 °C, $\gamma = 9810 \text{ N} / \text{m}^3$, $\gamma = 1000 \text{ kp} / \text{m}^3$

1.1.3 *Densidad relativa*

Esta propiedad relaciona la masa de una sustancia con la masa de un mismo volumen de agua destilada a 4 °C y la presión atmosférica al nivel del mar. Por ejemplo, el mercurio tiene una densidad relativa de 13.6. A esta propiedad también se le conoce como *gravedad específica del fluido*.

1.1.4. *Viscosidad*

Es la propiedad que determina la resistencia que opone el fluido a la acción de las fuerzas cortantes que actúan sobre el mismo, o puede definirse como el coeficiente de la fricción interna del fluido. Cuando un fluido de espesor “y” está contenido entre dos placas paralelas, al someter la placa móvil a la acción de la fuerza tangencial F, experimentalmente se ha encontrado que la placa se mueve con la velocidad V, así como las capas de fluido en contacto con la misma. De acuerdo con la segunda ley de Newton, el esfuerzo cortante sobre un fluido es proporcional al gradiente de velocidad: dv / dy

$$\tau \propto dv / dy \quad (1.3)$$

El esfuerzo cortante se define por: $\tau = F/A$

La constante de proporcionalidad que hace de esta expresión una ecuación se denomina *viscosidad dinámica o absoluta* η

$$\eta = \tau / (dv / dy) \quad (1.4)$$

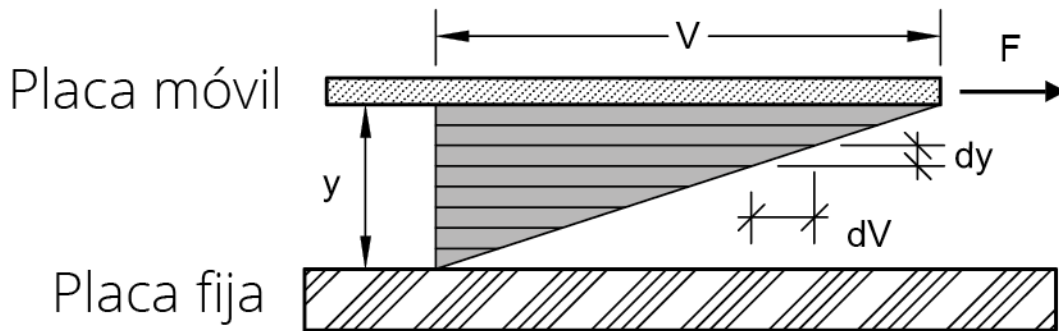


Figura 1.1. Concepto de viscosidad

Elaborada por José Luis González

La viscosidad absoluta o dinámica varía con la temperatura, disminuye en los líquidos y aumenta en los gases, es prácticamente independiente de la presión. Esta puede expresarse en el Sistema Internacional de Unidades en **Pa.s en kg/m.s** y en centipoises en el sistema C.G.S. de unidades.

$$1 \text{ cP} = 10^{-2}[\text{g} / \text{cm.s}] = 10^{-3}[\text{Pa.s}]$$

La viscosidad cinemática resulta de dividir la viscosidad absoluta sobre la densidad.

$$\mu = \eta / \rho \quad (1.5)$$

En el Sistema Internacional de Unidades (S.I.U.), la viscosidad cinemática está dada en **m²/s**, y es la propiedad que con mayor frecuencia se utiliza en el análisis de los fluidos.

Para el agua, la densidad y la viscosidad cinemática en función de la temperatura se muestran en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Propiedades del agua

<i>Temperatura</i> °C	<i>Densidad</i> (kg / m ³)	<i>Viscosidad</i> <i>cinemática</i> x10 ⁻⁶ (m ² / s)
0	999.8	1.787
4	1.000	1.562
10	999.7	1.307
14	999.2	1.163
20	998.2	1.0038
24	997.2	0.914
28	996.1	0.837
30	995.7	0.801
36	993.4	0.705
40	992.2	0.658
50	988	0.554

Fuente. Tomado de Mataix (1982). Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. Cap. 2. Propiedades de los fluidos.

1.1.5. Presión

En un recipiente que contenga algún líquido en reposo, se ejercerá una