

Facultad de Ingenierías

MECÁNICA DE FLUIDOS

UNIVERSIDAD DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO - UDI

FACULTAD DE INGENIERÍAS

Autores

Mag. Angélica María Hernández Gómez
Docente investigadora Grupo AVR
Doctor Jonathan Soto Paz
Docente investigador Grupo AVR

Estilo

Mg. Martha Lenis Castro Castro
Docente Investigadora Grupo Porter

Diagramación

Nicolás Zabala Ferreira
Docente de Diseño Gráfico

Cuerpos directivo

Jairo Castro Castro
Presidente Institucional

Jairo Augusto Castro Castro
Rector

Néstor Rodríguez Suárez
Vicerrector Académico

Gareth Barrera Sanabria
Directora de Investigaciones

Juan Carlos Yepes Patiño
Vicerrector Administrativo y Financiero

Martha Lenis Castro Castro
Vicerrectora General

Armando Arévalo Murillo
Director de Innovación y Desarrollo Tecnológico

Reynaldo Alonso Estevez Lizarazo
Director Dpto. Ciencias Básicas, Humanas y Saber Pro

César Dubier Castro Hernández
Director Instituto de Lenguas

Leidy Arciniegas Millán
Directora de Planeación

Carlos Andrés Maldonado Sanabria
Director Oficina Autoevaluación, Registro Calificado y Acreditación

Kelly Johanna Villamizar Blanco
Directora de Proyección Social y Extensión

Cuerpos colegiados

Gladys Corredor Villamil
**Representante Docentes
Consejo Directivo**

Alba Janeth Muñoz Rodríguez
**Representante Docentes
Consejo Académico**

José Armando Villalba Quintero
**Representante Estudiantes
Consejo Directivo**

Leonardo Andrés Álvarez Garcés
**Representante Estudiantes
Consejo Académico**

Nelsy Marcela Carreño Estupiñán
**Representante Egresados
Consejo Directivo**

Yenny Carolina Villamizar Montoya
**Representante Egresados
Consejo Académico**

ISBN: 978-958-8796-30-7

TABLA DE CONTENIDO

Presentación 06

Saberes 08

01

Propiedades de los fluidos 09

- 1.1. Definición de mecánica de fluidos y fluido 10
- 1.2. Concepto de dimensión y unidad 11
- 1.3. Atributos de los fluidos 14
 - 1.3.1. Densidad y peso específico 14
 - 1.3.2. Tensión superficial 16
 - 1.3.3. Capilaridad 18
 - 1.3.4. Viscosidad 19

02

Hidrostática 09

- 2.1. Definición de presión 23
- 2.2. Relación entre presión y profundidad 24
- 2.3. Ley de Pascal 26
- 2.4. Dispositivos de medición de presión 27
 - 2.4.1. Barómetros 27
 - 2.4.2. Manómetros 28
- 2.5. Estática de fluidos 29
 - 2.5.1. Fuerzas hidrostáticas sobre superficies planas 30
 - 2.5.2. Fuerzas hidrostáticas sobre superficies curvas 31

03

Hidrodinámica 34

- 3.1. Cinemática 36
- 3.2. Ecuación de conservación de la masa o principio de continuidad 39
- 3.3. Ecuación de Bernoulli 42
 - 3.3.1. Limitaciones de la ecuación de Bernoulli 43
- 3.4. Ecuación de la Energía 43

04

Flujo a través de tuberías 45

- 4.1. Número de Reynolds 46
- 4.2. Flujo Laminar 47
- 4.3. Flujo turbulento 47
- 4.4. Pérdidas mayores 48
- 4.5. Pérdidas menores 49

Referencias 51

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Dimensiones y unidades usadas en el SI y Sistema inglés	12
Tabla 2. Factores de conversión entre sistemas de medición	13

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diferencia entre fluidos sólidos	10
Figura 2. Densidad de diferentes fluidos como la miel y el agua	15
Figura 3. Tensión superficial	16
Figura 4. Ejemplo demostrativo de la expresión matemática de la tensión superficial	17
Figura 5. Ejemplo de tensión superficial en un fluido	19
Figura 6. Viscosidad de un fluido líquido	20
Figura 7. Perfil de velocidades generados por efecto de la viscosidad	20
Figura 8. Ejemplo de viscosidad de los fluidos con placas paralelas	21
Figura 9. Presión atmosférica	23
Figura 10. Relación entre presión absoluta, atmosférica y manométrica	23
Figura 11. Ejemplo demostrativo de la relación entre presión absoluta, manométrica y atmosférica.	24
Figura 12. Buzos nadando en lo profundo del mar	24
Figura 13. Relación entre presión y profundidad	25
Figura 14. Presión en diferentes puntos	25
Figura 15. Principio de Pascal	26
Figura 16. Barómetro básico	27
Figura 17. Pasos para escribir ecuación de un manómetro	28
Figura 18. Ejemplo demostrativo de la solución de manómetros	29
Figura 19. Represa Hidrosogamoso	29
Figura 20. Fuerza resultante sobre una placa sumergida	30
Figura 21. Momentos de inercia de algunas figuras geométricas	31
Figura 22. Fuerza hidrostática en superficies curvas	32
Figura 24. Ejercicio resuelto sobre superficies curvas	33
Figura 25. Ecuación de continuidad aplicada en un recipiente por donde pasa un fluido	41
Figura 26. Ecuación de Bernoulli en función de la carga de presión, velocidad y elevación	42
Figura 27. Formas de energía presentes en un conducto	43
Figura 28. Ejemplo de aplicación de la ecuación de la energía	44

Presentación

El cuerpo docente del Programa de Ingeniería Civil de la Universidad de Investigación y Desarrollo – UDI, presenta la cartilla de "Fundamentos de Mecánica de Fluidos para el Ingeniero civil UDI". Esta cartilla forma parte de una colección de materiales creados por docentes e investigadores del programa de Ingeniería Civil, en colaboración con profesionales de otros programas. Como resultado de las actividades acordadas para el desarrollo de funciones sustantivas (docencia, investigación y extensión), se ha generado una serie de cartillas como material de apoyo para los estudiantes de la UDI y la comunidad académica en general, interesados en la ingeniería civil.

La cartilla se desarrolla en cuatro unidades que tratan:

Unidad 1. Propiedades de los fluidos. En esta unidad se describe una introducción a las características fundamentales de los fluidos. Se abordarán la definición y clasificación de fluidos (líquidos y gases), la densidad y el peso específico, viscosidad y capilaridad. Esta unidad proporcionará una base sólida sobre las características esenciales de los fluidos.

Unidad 2. Hidrostática. En esta unidad se describe una introducción a los principios fundamentales de la hidrostática. Se abordarán la definición y propiedades de los fluidos en reposo, incluyendo la presión hidrostática y su variación con la profundidad. También se cubrirán conceptos como la ley de Pascal (transmisión de presión en un fluido en reposo), el principio de Arquímedes (flotación y empuje), y la determinación de fuerzas sobre superficies sumergidas. Esta unidad proporcionará una base sólida sobre los conceptos esenciales de la hidrostática, preparando a los estudiantes para aplicar estos principios en problemas prácticos de ingeniería y diseño.

Unidad 3. Hidrodinámica. En esta unidad se describe una introducción a los principios fundamentales de la hidrodinámica. Se abordarán la definición y propiedades de los fluidos en movimiento, incluyendo el flujo laminar y turbu-



Presentación

lento, y la ecuación de continuidad. También se cubrirán conceptos como la ecuación de Bernoulli, las pérdidas de energía en tuberías, y la medición del caudal. Esta unidad proporcionará elementos para que los estudiantes apliquen conceptos y principios en problemas prácticos de ingeniería y diseño de sistemas de flujo de fluidos.

Unidad 4. Flujo a través de tuberías. En esta unidad se desarrollan los conceptos de flujo laminar, turbulento y transición derivados del Número de Reynolds. Adicionalmente, se desarrolla el concepto de pérdidas mayores y menores, así como sus aplicaciones.

Este material se convierte en un elemento de estudio que propende contribuir con la formación de estudiantes de ingeniería civil. Esperamos que este trabajo sea del agrado de todos los que lo consulten, y facilite el estudio en diversos campos de la ingeniería.

Angélica María Hernández Gómez
Docente investigadora
Grupo AVR

Jonathan Soto Paz
Docente investigador
Grupo AVR

Saberes		
Saberes Conceptuales	Procedimentales	Actitudinales
<ul style="list-style-type: none"> - Comprende el concepto de propiedades de los fluidos. - Identifica los principios teóricos sobre la presión y estática de fluidos. - Argumenta los procedimientos aplicados en la resolución de los ejercicios propuestos para validar los dominios conceptuales y procedimentales de los mismos. - Comprende las ecuaciones de conservación de masa, de Bernoulli y de energía, y sus limitaciones. - Aplica los principios aprendidos para la resolución de problemas de flujo de fluidos a través de tubería considerando tipo de flujo, pérdidas por fricción y accesorios. - 	<ul style="list-style-type: none"> - Determina propiedades de los fluidos. - Calcula las variaciones de presión empleando manómetros. - Calcula la fuerza hidrostática resultante ejercidas por cualquier fluido sobre superficies planas y curvas. - Halla las fuerzas de flotación y metacentro de cuerpos sumergidos. - Aplica la ecuación de Bernoulli a los sistemas de flujo de fluidos. - Determina la potencia suministrada o requerida de acuerdo con el sistema de flujo de tuberías. - Calcula las pérdidas mayores y menores asociadas con el flujo de redes de tuberías. - Analiza sistemas de flujo de tuberías. 	<ul style="list-style-type: none"> - Realiza actividades investigativas relacionadas con los conceptos aprendidos en el aula. - Participa activamente en el desarrollo de ejercicios propuestos sobre las temáticas del curso. - Participa en las actividades de investigación y defender sus ideas en las socializaciones de conceptos que permitan el aprendizaje. - Interpreta en la vida diaria los conceptos y principios básicos de la mecánica de fluidos relacionados con las actividades cotidianas. - Relaciona los conceptos adquiridos en clase con las prácticas de laboratorio afianzando el aprendizaje de estos.

01

Propiedades de los **Fluidos**

1.1

Definición de mecánica de fluidos

La mecánica de fluidos es fundamental en la ingeniería, ya que se encarga de estudiar el comportamiento de líquidos y gases en reposo y movimiento. Esta disciplina es crucial en la ingeniería por su aplicabilidad para mantener la vida y funcionalidad de sistemas complejos. En proyectos de ingeniería, los fluidos permiten la distribución eficiente de recursos como agua, aire y combustibles, asegurando que cada componente funcione de manera óptima. Desde el abastecimiento de agua potable en edificios hasta el enfriamiento de maquinaria industrial, el manejo y control de fluidos es crucial para la operatividad y eficiencia de cualquier infraestructura (Durst, 2022; Mott, 2006).

En términos prácticos, los fluidos son sustancias que carecen de una forma fija y se caracterizan por su capacidad de "fluir", adaptándose a la forma del recipiente que

los contiene. Por lo tanto, dentro de esta definición, solo se consideran como fluidos, los líquidos y los gases; los sólidos se estudian en otro campo de la ciencia conocido como mecánica de sólidos (Mott, 2006). Es importante destacar que los fluidos se diferencian de los sólidos por la capacidad que tienen las moléculas de deslizarse unas sobre otras y por las distancias considerablemente mayores entre las moléculas en comparación con los sólidos. Esta separación molecular les otorga una mayor energía cinética, lo que les proporciona una mayor "libertad de movimiento", siendo más evidente en el caso de los gases, como se muestra en la Figura 1, lo que hace más complejo contenerlos en un recipiente. En contraste, los sólidos, al tener una menor distancia entre sus moléculas, poseen una menor energía cinética y, en consecuencia, presentan una estructura más "rígida" y ordenada.

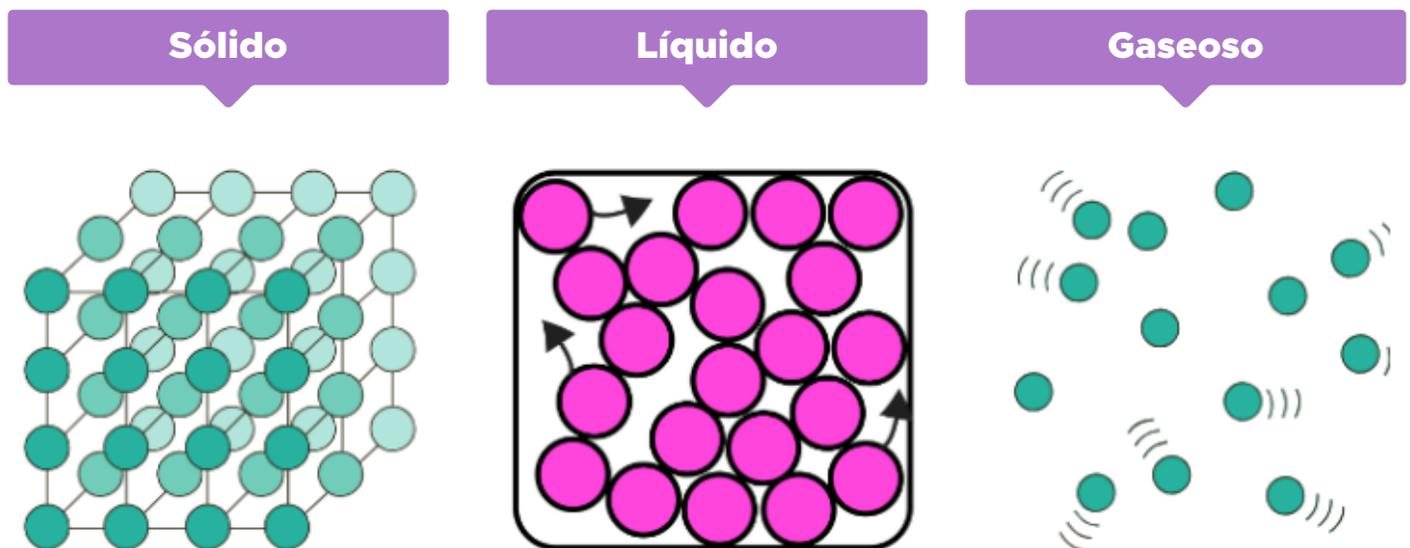


Figura 1. Diferencia entre fluidos sólidos
Fuente: Adaptado de Mott (2006) y de Çengel & Cimbala (2012)

Es común que los estudiantes de ingeniería confundan los sólidos con los fluidos debido a algunas similitudes y conceptos malentendidos sobre materiales que pueden comportarse tanto como sólidos en ciertas condiciones y

como fluidos en otras, lo que complica aún más la distinción clara entre ambos. Por tanto, antes de continuar con la siguiente sección de la unidad, tómesese un tiempo y reflexione sobre lo siguiente:



Caja de inquietudes

Considera el agua en sus tres estados de la materia. ¿Puede ser considerada un fluido?

Realiza una lista de fluidos que conozcas con aplicación en la ingeniería civil.

1.2

Concepto de dimensión y unidad

En ingeniería, la dimensión se refiere a las medidas físicas que describen el tamaño, la longitud, el área, el volumen u otras características de un objeto o sistema. Es importante para cuantificar y especificar las características de estructuras, componentes y terrenos en proyectos de ingeniería. Por ejemplo, las dimensiones de un tanque de almacenamiento de agua incluyen la altura, el diámetro, la capacidad volumétrica, entre otras.

de distribución de agua, las dimensiones precisas de las tuberías (diámetro, longitud) y la capacidad de los tanques de almacenamiento se especifican para garantizar un suministro adecuado y eficiente de agua potable a la población. Además, el uso consistente de unidades adecuadas es crucial para evitar errores en cálculos y especificaciones que podrían afectar la integridad y la viabilidad de los proyectos.

De otro lado, la unidad es una medida estándar utilizada para expresar cantidades físicas, como longitud, área, volumen, fuerza, etc. Estas unidades pueden ser métricas (como metros, kilogramos, Newtons) o unidades inglesas (como pies, libras, pulgadas), dependiendo de la región y las normativas aplicables. Las unidades son esenciales para realizar cálculos precisos y comunicar información de manera clara y universal en los proyectos de ingeniería civil (Munson et al., 1995).

Existen dos sistemas principales de medición utilizados en el mundo: el Sistema Internacional de Unidades (SI) y el Sistema Inglés (también conocido como Sistema Imperial). El SI es el sistema de unidades de medida moderno y más ampliamente utilizado en el mundo. Se basa en siete unidades base y utiliza múltiplos y submúltiplos decimales para expresar diferentes cantidades físicas de forma coherente. En contraste, el Sistema Inglés a pesar de que gran parte ha sido reemplazado por el SI, todavía se usa en ciertos contextos, especialmente en Estados Unidos y en aplicaciones específicas (Munson et al., 1995; Song, 2018). La Tabla 1 resume las dimensiones y unidades utilizadas en ambos sistemas de medición.

Las dimensiones y las unidades son fundamentales en ingeniería civil para el diseño, la construcción y la gestión de proyectos (Song, 2018). Por ejemplo, al diseñar una red

Tabla 1. Dimensiones y unidades usadas en el SI y Sistema inglés

Dimensión	Unidad SI	Símbolo SI	Unidad inglesa	Símbolo unidad inglesa
Longitud	Metro	m	Pie	ft
			Pulgada	in
			Milla	mi
Masa	Kilogramo	Kg	Libra	lb
			Onza	oz
Tiempo	Segundo	s	Segundo	s
Temperatura	Kelvin	K	Fahrenheit	°F
			Celsius	°C
Longitud ³	Metro cúbico	m ³	Pie cúbico	ft ³
			Galón	gal
			Pinta	pt

Fuente: Adaptado de Mott (2006)

Debido a la importancia de las dimensiones y unidades en la ingeniería, resulta fundamental que se pueda pasar de un sistema a otro sin inconvenientes, razón por la cual, la

Tabla 2 resume los principales factores de conversión del sistema inglés al SI y viceversa.



Tabla 2. Factores de conversión entre sistemas de medición

Dimensión	Unidad SI	Factor de Conversión (SI a inglés)	Unidad inglesa	Factor de Conversión (Sistema inglés a SI)
Longitud	Metro	1 m = 39.37 in	Pulgada (in)	1 in = 0.0254 m
		1 m = 3.281 ft	Pie (ft)	1 ft = 0.3048 m
		1 km = 0.6214 mi	Milla (mi)	1 mi = 1.609 km
Masa	Kilogramo	1 kg = 2.205 lb	Libra (lb)	1 lb = 0.4536 kg
		1 g = 0.03527 oz	Onza (oz)	1 oz = 28.35 g
Volumen	Litro (L)	1 L = 0.2642 gal	Galón (gal)	1 gal = 3.785 L
		1 L = 2.113 pt	Pinta (pt)	1 pt = 0.4732 L
	Metro cúbico (m ³)	1 m ³ = 35.31 ft ³	Pie cúbico (ft ³)	1 ft ³ = 0.02832 m ³
Temperatura	Celsius (°C)	°F = (°C × 1.8) + 32	Fahrenheit (°F)	°C = (°F - 32) / 1.8

Fuente: Adaptado de Mott (2006)

1.3

Atributos de los fluidos

Los atributos de los fluidos se refieren a las características físicas que describen el comportamiento de líquidos y gases. Estas propiedades son fundamentales en ingeniería para el diseño y análisis de sistemas como tuberías, sistemas de refrigeración, aerodinámica de vehículos, entre otros (Çengel & Cimbala, 2012). Por ejemplo, la viscosidad de un aceite lubricante es crucial para asegu-

rar el funcionamiento adecuado de un motor, y la densidad del agua determina la capacidad de flotación de un barco y la presión que ejerce sobre estructuras sumergidas. Es importante resaltar que las propiedades que se presentan en los siguientes apartados son desarrolladas para los fluidos líquidos debido a que en ingeniería civil es limitada la aplicación de fluidos gaseosos.

1.3.1

Densidad y peso específico

La densidad es una propiedad fundamental en la mecánica de fluidos, que se define como la masa por unidad de volumen de un fluido (Çengel & Cimbala, 2012; Song, 2018). Matemáticamente, se expresa como:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Donde:

- ρ es la densidad.
- m es la masa del fluido.
- V es el volumen del fluido.

Para comprender la importancia de la densidad, la Figura 2 presenta una ilustración de dos cuerpos que tienen una misma masa, pero su tamaño y volumen difieren. Estas diferencias se deben a que uno de los cuerpos tiene una densidad muy superior al objeto de la izquierda, lo que implica que este cuerpo requiere de un mayor espacio. Imagine ahora que en lugar de dos cuerpos sólidos tiene dos fluidos, agua y aceite, con diferentes densidades y se encuentran contenidos cada uno en un recipiente de la misma capacidad (1 L), ¿Qué efecto tendría? El recipiente con

agua contendrá una masa de 1 kg porque la densidad del agua es 1000 kg/m³ y la capacidad del recipiente es 1 litro; en contraste, el aceite contendrá una masa de 0.8 kg, porque la densidad del aceite es 800 kg/m³ y la capacidad del recipiente es 1 litro. Ahora, si ambos recipientes fueran sumergidos en otro fluido (por ejemplo, agua), el recipiente con aceite tendería a flotar más fácilmente o a flotar más alto que el recipiente con agua debido a su menor densidad.

Comprender la densidad es importante para entender y analizar el comportamiento de los fluidos en diversos contextos de ingeniería, ya que afecta parámetros clave como la presión, la flotabilidad, y el flujo (Munson et al., 1995). Por ejemplo, en aplicaciones de abastecimiento de agua y tratamiento de aguas residuales, la densidad influye en el diseño de las estructuras como desarenadores y funcionamiento de bombas; de igual manera en sistemas donde se requiere mezclar diferentes fluidos, conocer la densidad es esencial para predecir cómo se comportarán los fluidos cuando se combinen.



Figura 2. Densidad de diferentes fluidos como la miel y el agua
Fuente: Los autores

Otra propiedad que hace uso de la densidad de fluidos y que es de amplia aplicación en la ingeniería corresponde al peso específico o de gravedad específica. Esta última se define como la relación entre la densidad de un fluido y la densidad de una sustancia de referencia, generalmente agua a 4°C para líquidos se expresa como (Mott, 2006):

$$(sg) = \frac{\rho_{\text{Fluido}}}{\rho_{\text{Referencia}}}$$

Gravedad específica

Donde:

ρ_{fluido} es la densidad del fluido en cuestión, $\rho_{\text{preferencia}}$ es la densidad de la sustancia de referencia (agua a 4°C, que es 1000 kg/m³ 1000 en el Sistema Internacional).

En la mecánica de fluidos, esta propiedad es útil para el análisis de flotabilidad, la separación de fases y el diseño de sistemas de transporte y almacenamiento de fluidos. Por ejemplo, un fluido con una gravedad específica mayor que 1 es más denso que el agua y tenderá a hundirse en el agua, mientras que un fluido con una gravedad específica menor que 1 es menos denso y tenderá a flotar.

1.3.2

Tensión superficial

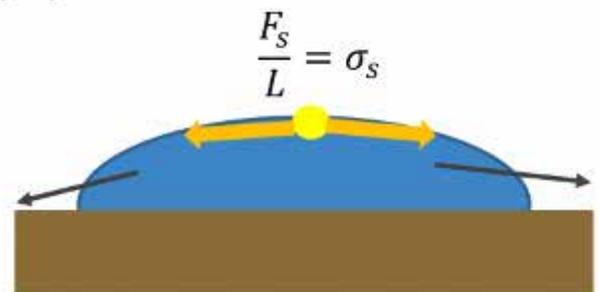
La tensión superficial es una propiedad física que describe la elasticidad de la superficie de un líquido. Es la fuerza por unidad de longitud que actúa en la superficie de un líquido, intentando reducir su área. Esta fuerza es el resultado de las fuerzas de cohesión entre las moléculas del líquido (Çengel & Cimbala, 2012). Si bien el concepto puede parecer abstracto, piense en una mesa o superficie sólida plana como la que se muestra en la Figura 3a e incorpore en ella una gota de agua. Cuestiónese lo siguiente: ¿Es posible que la gota de agua se expanda infinitamente de manera horizontal totalmente adquirien-

do la forma de una fina capa? ¡Si su respuesta fue negativa, en hora buena ha acertado! La razón de que no suceda este fenómeno obedece a la tensión superficial que evita que el fluido se “explaie infinitamente” como ilustra la Figura 3b. En este caso las moléculas de un fluido líquido experimentan una fuerza tangencial que trata de reducir el área de la gota del fluido. En este caso, ¿existirán fluidos que mantengan su forma por acción de la tensión superficial? Reflexione y trate de explicar este comportamiento con una gota de mercurio como presenta la Figura 3c.

(3a)



(3b)



(3c)

¿Por qué no se expande el fluido?

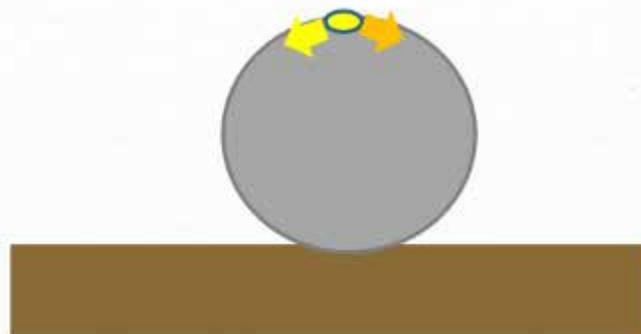


Figura 3. Tensión superficial
Fuente: Fluidomanos (2018)

En términos más técnicos, la tensión superficial (σ) puede definirse como (Çengel & Cimbala, 2012):

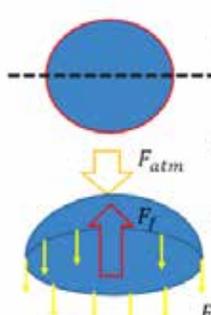
$$\sigma = \frac{F}{L}$$

- Donde:
- F es la fuerza que actúa a lo largo de la superficie.
 - L es la longitud sobre la cual esta fuerza actúa.

La tensión superficial es crucial en una amplia gama de fenómenos y aplicaciones, tanto naturales como industriales. Este fenómeno, que resulta de las fuerzas de cohesión entre las moléculas en la superficie de un líquido, permite la formación de gotas y burbujas, la flotación de objetos livianos en el agua y la capilaridad, esencial para la absorción de líquidos en materiales porosos (Shaughnessy & Ira Katz James P Schaffer, 2005). En la industria, la tensión superficial es vital para procesos como la fabricación de emulsiones, recubrimientos, detergentes y productos farmacéuticos, ya que influye en la dispersión y

estabilidad de los componentes. También juega un papel importante en la biomedicina para el funcionamiento de los pulmones y en la microelectrónica para la manipulación de fluidos en dispositivos a microescala. Comprender y controlar la tensión superficial permite a los científicos e ingenieros optimizar productos y procesos, mejorando la eficiencia y funcionalidad en múltiples áreas tecnológicas y ambientales. Ahora que se tiene una mayor claridad del concepto de tensión superficial, la siguiente caja expone un ejemplo típico del cálculo (Figura 4).

Deduzca una expresión para hallar la diferencia de presión que existe en una gota de agua por el fenómeno de tensión superficial



- Para resolver este ejercicio, necesitamos utilizar la fórmula de tensión superficial y considerar la definición de presión

$$\sigma_s = \frac{F_s}{L} \quad p = \frac{F_R}{A}$$
- Con el esquema, realiza un diagrama de cuerpo libre y analiza las fuerzas que intervienen

$$F_f - F_s - F_{atm} = 0$$
- Relacionamos la definición de presión con la ecuación anterior

$$p_f A - \sigma_s A - p_{atm} A = 0$$
- Reemplaza el área de un círculo con la ecuación anterior y desarróllala matemáticamente

$$p_f \pi r^2 - \sigma_s 2\pi r - p_{atm} \pi r^2 = 0$$

$$(p_f - p_{atm}) \pi r^2 = \sigma_s 2\pi r$$

De los resultados anteriores, se obtiene que la expresión es:

$$\Delta P = \frac{2\sigma_s}{r}$$

Figura 4. Ejemplo demostrativo de la expresión matemática de la tensión superficial
 Fuente: Adaptado de (Çengel & Cimbala, 2012; Mott, 2006)

1.3.3**Capilaridad**

La capilaridad es una de las propiedades de los fluidos que describe la capacidad de los líquidos para moverse dentro de espacios pequeños, como tubos delgados o poros de materiales porosos, debido a las fuerzas de cohesión y adhesión entre las moléculas del líquido y las superficies sólidas (Durst, 2022). En otras palabras, es la capacidad que tienen los líquidos para ascender o descender en tubos capilares más estrechos que su propio diámetro, o para ser absorbidos por materiales porosos, como una esponja o el suelo. La capilaridad se debe a la combinación de dos efectos:

- Adhesión: La atracción entre las moléculas del líquido y las del material que forma el tubo o poro.
- Cohesión: La atracción entre las moléculas del propio líquido.

Este fenómeno es fundamental en diversos aspectos, como la absorción de agua por las plantas desde el suelo, la ascensión de la savia en los árboles, la acción de las mechas en las velas, la distribución de líquidos en sistemas microfluídicos, entre otros. La altura a la que un líquido asciende o desciende en un tubo capilar está determinada por la competencia entre las fuerzas de cohesión y adhesión, y se rige por la ley de Jurin en condiciones ideales (Munson et al., 1995).

La ecuación que describe la altura (h) a la que un líquido asciende o desciende en un tubo capilar bajo el efecto de la capilaridad se conoce como la Ley de Jurin y está dada por:

$$h = \frac{2\sigma \cos(\theta)}{\rho g r}$$

Donde:

- h es la altura de ascenso o descenso del líquido.
- σ es la tensión superficial del líquido.
- θ es el ángulo de contacto entre el líquido y la pared del tubo capilar.
- ρ es la densidad del líquido.
- g es la aceleración debido a la gravedad.
- R es el radio del tubo capilar.

Esta ecuación describe cómo la altura que alcanza el líquido en un tubo capilar está influenciada por la tensión superficial del líquido, el ángulo de contacto, la densidad del líquido, la aceleración debida a la gravedad y el radio del tubo capilar. La capilaridad es un fenómeno fundamental en numerosos procesos naturales e industriales, que describe la capacidad de un líquido para subir o bajar en un tubo estrecho o poros de un material sin la ayuda de fuerzas externas. En la naturaleza, la capilaridad es crucial para la supervivencia de las plantas, permitiendo

que el agua y los nutrientes asciendan desde las raíces hasta las hojas. En la ingeniería y tecnología, la capilaridad es esencial en aplicaciones como la microelectrónica, donde el manejo de líquidos en microescala es vital, y en la construcción, para entender el comportamiento del agua en materiales porosos como el concreto y los suelos. Ahora que se tiene una mayor claridad del concepto de capilaridad, la siguiente caja (Figura 5) expone un ejemplo típico del cálculo (Shaughnessy & Ira Katz James P Schaffer, 2005).

Un tubo de cristal delgado con diámetro de 1.9 mm se introduce en un fluido que tiene densidad de 900 kg/ m³. Se encontró que el fluido ascendió en el tubo hasta alcanzar una altura de 5mm y forma un ángulo de 15°. Cual es la tensión superficial del fluido?

1. Para resolver este ejercicio, necesitamos utilizar la fórmula del ascenso capilar para encontrar la tensión superficial (σ) del fluido. La fórmula es:

$$h = \frac{2\sigma \cos(\theta)}{\rho g r}$$
2. Reorganizando la expresión

$$\sigma = \frac{h \rho g r}{2 \cos(\theta)}$$
3. Sustituimos los valores:

$$\sigma = \frac{0.005 \text{ m} \cdot 900 \text{ kg/m}^3 \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 \cdot 0.00095 \text{ m}}{2 \cos(15^\circ)}$$

$$\sigma = \frac{0.0419475}{1.9318} \approx 0.0217 \text{ N/m}$$

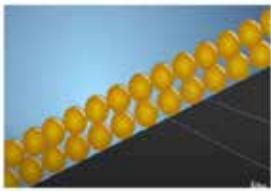
El resultado de 0.0217 N/m indica que el fluido tiene una baja tensión superficial, menor que la del agua, lo que sugiere una menor capacidad para resistir la deformación superficial y posibles aplicaciones similares a las de ciertos aceites. Esto afecta su comportamiento en procesos que dependen de la tensión superficial, como la capilaridad y la formación de gotas.

Figura 5. Ejemplo de tensión superficial en un fluido
Fuente: Adaptado de (Çengel & Cimbala, 2012; Mott, 2006)

1.3.4 Viscosidad

La viscosidad es una propiedad física de los fluidos que describe su resistencia interna al fluir o deformarse bajo la acción de una fuerza cortante. Se relaciona con la fricción interna entre las capas de fluido que se deslizan unas sobre otras cuando el fluido se mueve. Cuanto mayor es la viscosidad, mayor es la resistencia al flujo(-Mott, 2006).

Para dar mayor claridad al concepto, la Figura 6 ilustra metafóricamente dos moléculas de agua, representadas como si estuvieran unidas por las "manos" en un grupo mayor. Estas "manos" simbolizan los puentes de hidrógeno, mantenidos por fuerzas de cohesión. Cuando las moléculas se encuentran en un plano inclinado, el equilibrio del fluido se interrumpe, y el fluido comienza a moverse con cierta resistencia.



Facilidad con la que las partículas de un fluido se desplazan sobre otras considerando la intensidad de las fuerzas cohesivas que actúan sobre las moléculas

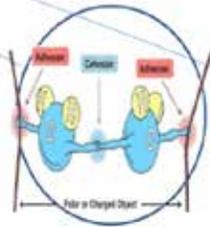


Figura 6. Viscosidad de un fluido líquido
Fuente: Adaptado de Villareal(2018)

Una explicación más técnica se desarrolla a continuación:

La viscosidad de un fluido describe su resistencia al movimiento o deformación bajo una fuerza aplicada. Este concepto se puede entender mejor observando el perfil de velocidades de un fluido en movimiento (Figura 7), especialmente en un flujo laminar entre dos placas paralelas, una de las cuales se mueve mientras la otra permanece estacionaria.

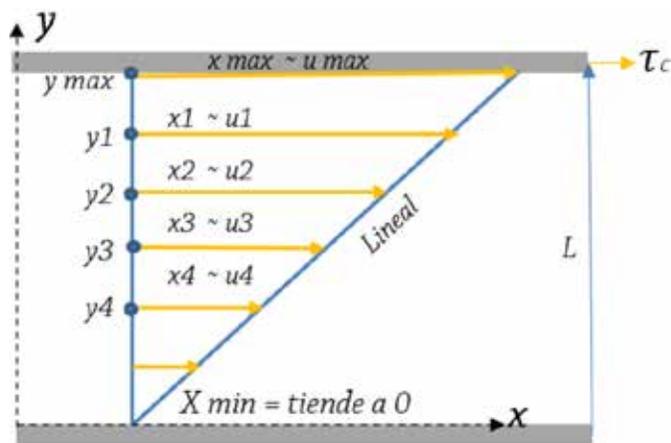


Figura 7. Perfil de velocidades generados por efecto de la viscosidad
Fuente: Villareal (2018)

El perfil de velocidades es lineal en este caso de flujo laminar simple, lo que significa que la velocidad del fluido varía linealmente desde cero en la placa fija hasta la velocidad de la placa superior u_{max} en la placa móvil.

Este perfil se puede expresar como (Çengel & Cimbala, 2012; Durst, 2022):

$$u(y) = \frac{u_{max}}{y_{max}} y$$

Donde:

- $u(y)$ es la velocidad del fluido a una distancia y de la placa fija.
- u_{max} es la velocidad de la placa superior.
- y_{max} es la distancia entre las placas.

El gradiente de velocidad (du/dy) es una medida de la tasa de cambio de la velocidad con respecto a la distancia en la dirección perpendicular al flujo. En este caso de perfil de velocidad lineal, el gradiente de velocidad es constante y se puede calcular como (Çengel & Cimbala, 2012; Durst, 2022):

$$\frac{du}{dy} = \frac{u_{max}}{y_{max}}$$

El esfuerzo cortante (τ) aplicado en el fluido debido a la viscosidad se relaciona directamente con el gradiente de velocidad a través de la siguiente relación:

$$\tau = \frac{du}{dy} \mu$$

En el caso del flujo entre dos placas paralelas con un perfil de velocidad lineal, la relación entre el gradiente de velocidad y las condiciones de máxima velocidad y distancia se puede resumir como:

$$\frac{du}{dy} = \frac{u_{max}}{y_{max}}$$

- Donde:
- τ es el esfuerzo cortante.
 - μ es la viscosidad dinámica del fluido.

Esto significa que el gradiente de velocidad, que es clave para entender la viscosidad y el esfuerzo cortante en un fluido, es simplemente la máxima velocidad dividida por la distancia máxima entre las placas (Mott, 2006). Este resultado muestra cómo el perfil de velocidad y la condición de no deslizamiento se combinan para determinar el comportamiento viscoso del fluido. La siguiente caja expone un ejemplo típico del cálculo de viscosidad.

Una placa localizada a una distancia de 0.5 mm de otra placa fija se mueve a una velocidad de 0.25 m/s y requiere una fuerza por unidad de área de 2 Pa para mantener esta velocidad. Determinar la viscosidad de la sustancia que está entre las placas.

1. Esquematizar el problema

$u = 0.5 \text{ mm}$

$l = 0.5 \text{ mm}$

2. Consistencia de Unidades

$l = 0.5 \text{ mm} \times \left(\frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}}\right) = 0.0005 \text{ m}$

$\tau_c = 2 \text{ Pa} = 2 \left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right)$

3. Formula del esfuerzo cortante y viscosidad

$\tau_c = \mu \frac{du}{dy} \rightarrow \tau_c = \mu \frac{u_{max}}{y_{max}}$

4. Aplicar ecuación

$\tau_c = \mu \frac{u_{max}}{y_{max}} \rightarrow \mu = \tau_c \frac{y_{max}}{u_{max}}$

$\mu = 2(\text{Pa}) \frac{0.0005 \left(\frac{\text{m}}{1}\right)}{0.25 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)}$

$\mu = 0.04 (\text{Pa} \cdot \text{s})$

Figura 8. Ejemplo de viscosidad de los fluidos con placas paralelas
Fuente: Adaptado de (Çengel & Cimbala, 2012; Mott, 2006)

02

La Hidrostática

La hidrostática es una rama de la mecánica de fluidos que se encarga del estudio de los fluidos en reposo. Analiza las condiciones bajo las cuales los fluidos están en equilibrio, así como las fuerzas y presiones dentro de ellos y sobre las superficies en contacto con el fluido. La hidrostática es esencial para diversas aplicaciones en la ingeniería, ya que proporciona las bases para diseñar y analizar sistemas en los que los fluidos están en reposo. En la Ingeniería Civil, es fundamental para calcular la presión ejercida por el agua en represas, embalses, y estructuras hidráulicas, así como para diseñar sistemas de almacenamiento de líquidos.

2.1

Definición de presión

La presión ejercida por fluidos se puede definir como la fuerza que ejerce sobre unidad de área ($P=F/A$) y sus unidades están dadas en N/m^2 que equivale a Pascal (Pa). A continuación, se observan algunas conversiones y unidades comunes para expresar la presión en el sistema inglés y el sistema internacional.

$$1 \text{ bar} = 105 \text{ Pa} = 0.1 \text{ MPa} = 100 \text{ kPa}$$

$$1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa} = 101.325 \text{ kPa}$$

Para entender los cambios de presión que percibimos podemos imaginar cuando viajamos de una ciudad cercana al mar a una ciudad ubicada en una montaña (Figura 9), a medida que subimos la columna de aire encima de nosotros va a ser menor, por lo tanto, la presión será menor. Esta presión que percibimos allí y siempre está presente al estar expuestos a la atmosfera, es llamada presión atmosférica.



Figura 9. Presión atmosférica
Fuente: Elaboración propia

La presión se puede medir de diferentes formas, para este propósito vamos a considerar tres tipos de presión, la presión absoluta, manométrica y atmosférica. La presión absoluta es la presión real que se mide en relación con el vacío absoluto. La presión manométrica tiene como referencia a la presión atmosférica, por lo tanto, equivale a la diferencia entre la presión absoluta y la presión atmosférica (Figura 10 y 11).

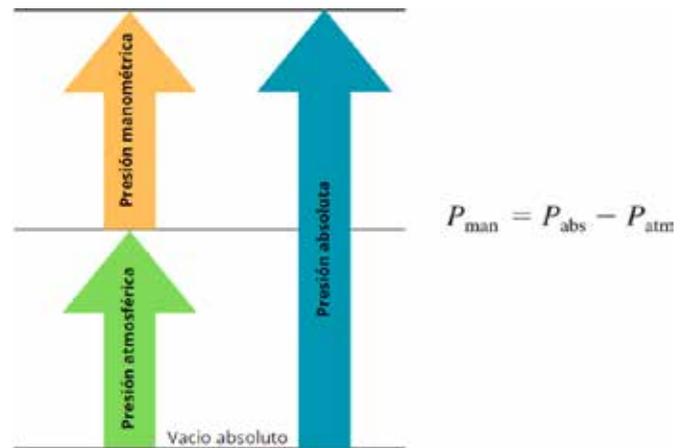


Figura 10. Relación entre presión absoluta, atmosférica y manométrica
Fuente: Adaptado de Mott (2006)



Supongamos que estás utilizando una olla a presión y el indicador de presión muestra que la presión dentro de la olla es de 15 psi (libras por pulgada cuadrada) por encima de la presión atmosférica. La presión atmosférica al nivel del mar es aproximadamente 14.7 psi. Halle la presión absoluta dentro de la olla.

$$P_{man} = P_{abs} - P_{atm}$$

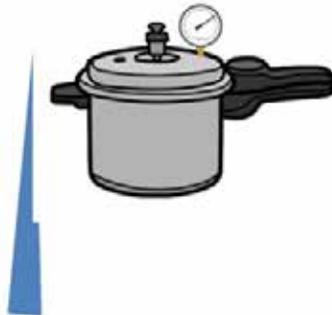
1. Despejamos la presión absoluta de la anterior expresión

$$P_{abs} = P_{man} + P_{atm}$$

2. Sustituimos los valores

$$P_{abs} = 15 \text{ psi} + 14.7 \text{ psi}$$

$$P_{abs} = 29.7 \text{ psi}$$



Por lo tanto, la presión absoluta dentro de la olla a presión es 29.7 psi. Esta presión elevada permite que el agua hierva a una temperatura más alta que los 100°C habituales, lo que acelera el proceso de cocción.

Figura 11. Ejemplo demostrativo de la relación entre presión absoluta, manométrica y atmosférica.

Fuente: Elaboración propia

2.2

Relación entre presión y profundidad

La presión en un punto en un fluido tiene la misma magnitud en todas las direcciones. Este resultado se puede aplicar a fluidos en movimiento o en reposo ya que la presión es un escalar y no un vector. En la Figura 12 se observan a tres buzos que están nadando en lo profundo del mar, responda a la siguiente pregunta ¿cuál de los tres buzos siente mayor presión?, si respondió Juana, está en lo correcto.



Figura 12. Buzos nadando en lo profundo del mar

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con lo que se mencionó anteriormente, la presión en un fluido en reposo no cambia en la dirección horizontal. La presión de un fluido aumenta con la profundidad porque descansa más fluido sobre las capas más profundas (Figura 13).

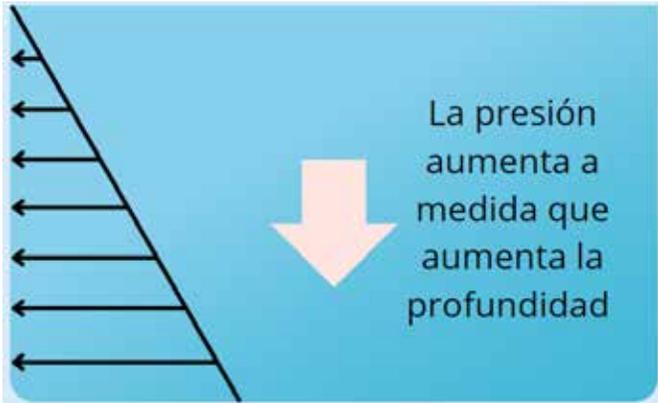


Figura 13. Relación entre presión y profundidad
Fuente: Adaptado de Mott (2006)

$$\Delta p = \gamma h$$

- Δp =cambio de presión
- γ =peso específico del líquido
- h =cambio en la elevación

Por lo tanto, el cambio de presión dentro de un fluido solo depende del tipo de fluido y su elevación. La presión en un fluido en reposo es independiente de la forma o sección transversal del recipiente que lo contiene. En la Figura 14 se observa que las presiones de los puntos A, B, C, D, E, F y G son la misma debido a que están a la misma profundidad y contienen el mismo fluido. Caso contrario ocurre con los puntos H e I que no son iguales, la presión en el punto H es diferente a la presión en el punto I debido a que en H se contiene mercurio también.

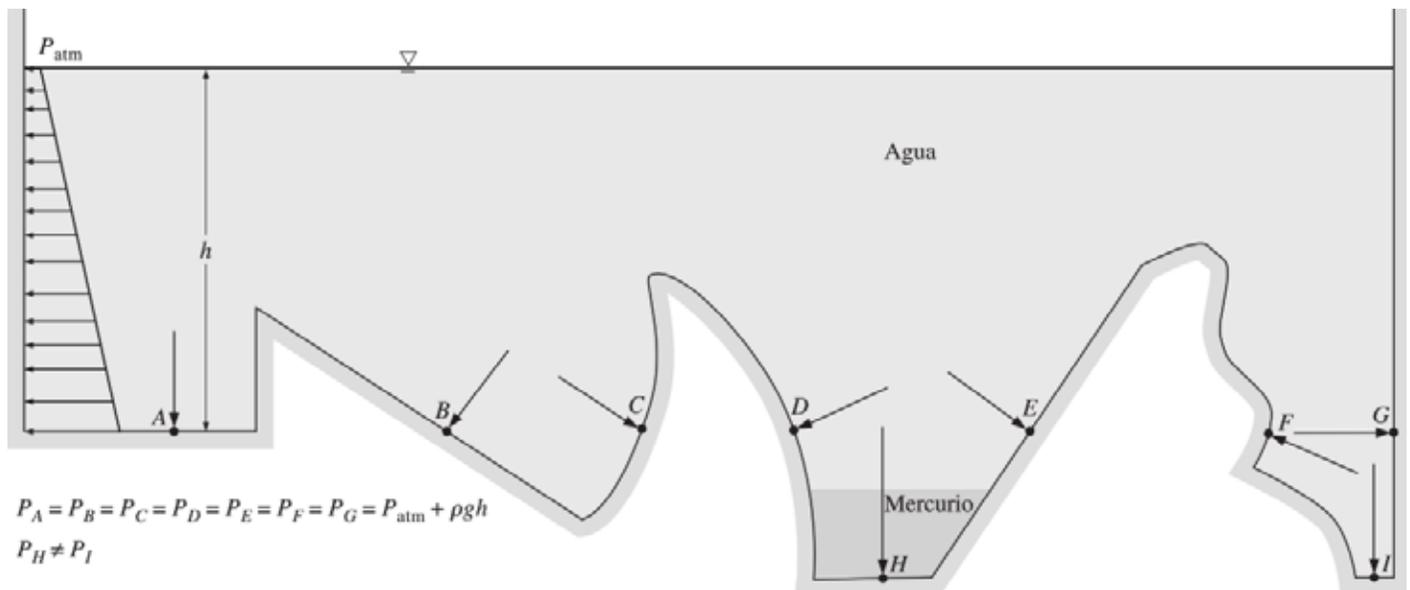


Figura 14. Presión en diferentes puntos
Fuente: Tomado de Mott (2006)

2.3

Ley de Pascal

El científico Blaise Pascal (1623-1622) observó que, al incrementar la presión aplicada a una superficie, esta misma presión aumentará en la misma cantidad (Figura 11). A esto, se le denomina principio de Pascal, que se enuncia de la siguiente forma:

Al ejercerse una presión sobre un fluido, esta se ejercerá con igual magnitud en todas las direcciones y en cada parte del fluido.



Blaise Pascal
(1623-1622)

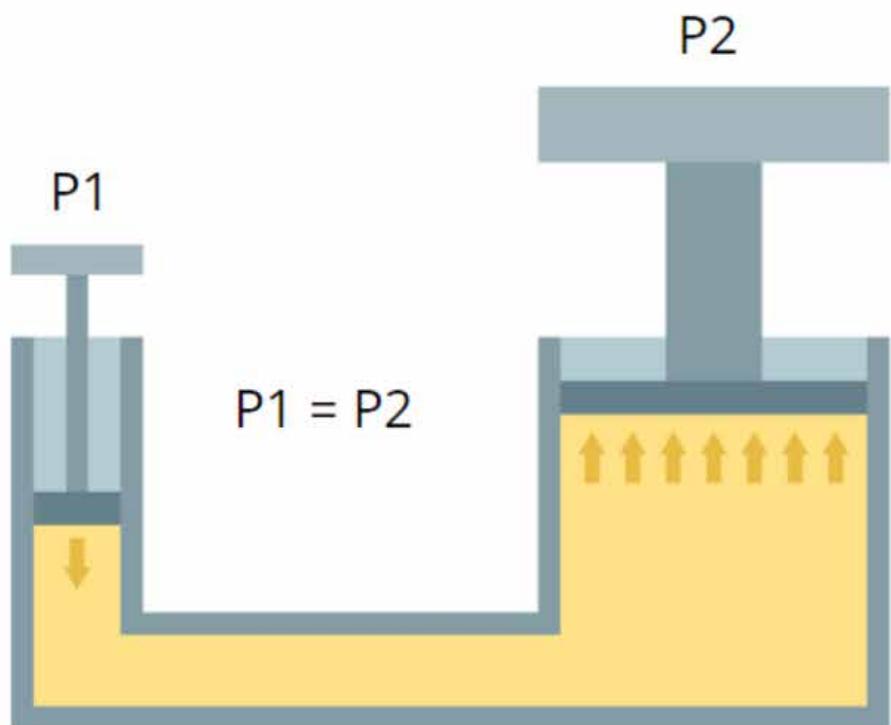


Figura 15. Principio de Pascal
Fuente: Elaboración propia

2.4

Dispositivos de medición de presión

2.4.1 Barómetros

La presión atmosférica se mide con un instrumento llamado barómetro (Figura 16). Evangelista Torricelli (1608-1647) fue el primero en probar que se puede medir la presión atmosférica cuando se invierte un tubo de mercurio en un recipiente lleno con este mismo líquido abierto que está abierto a la atmósfera.

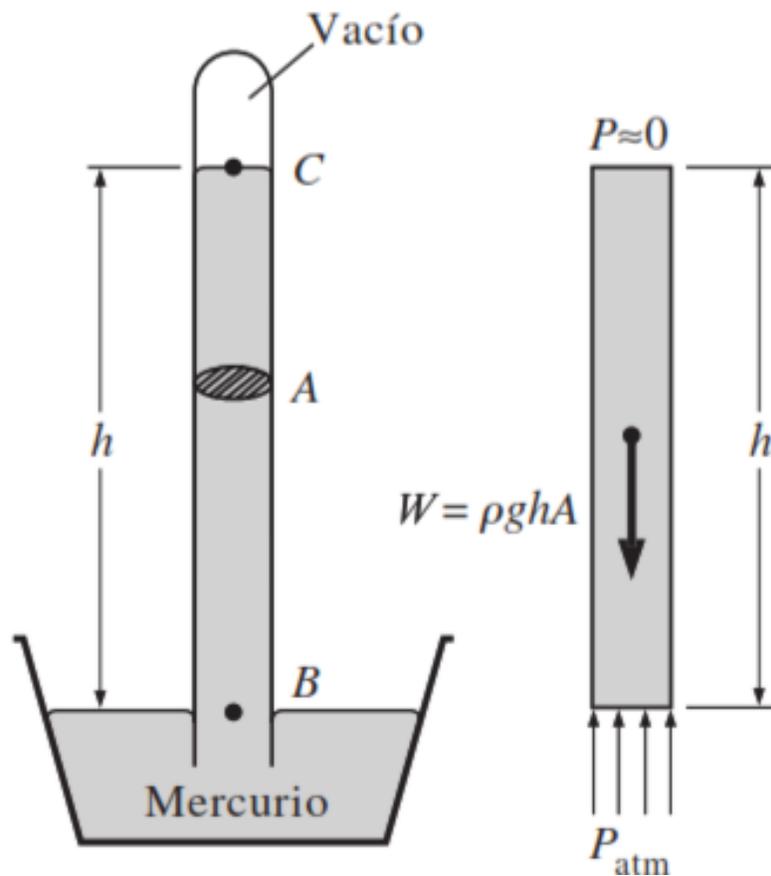
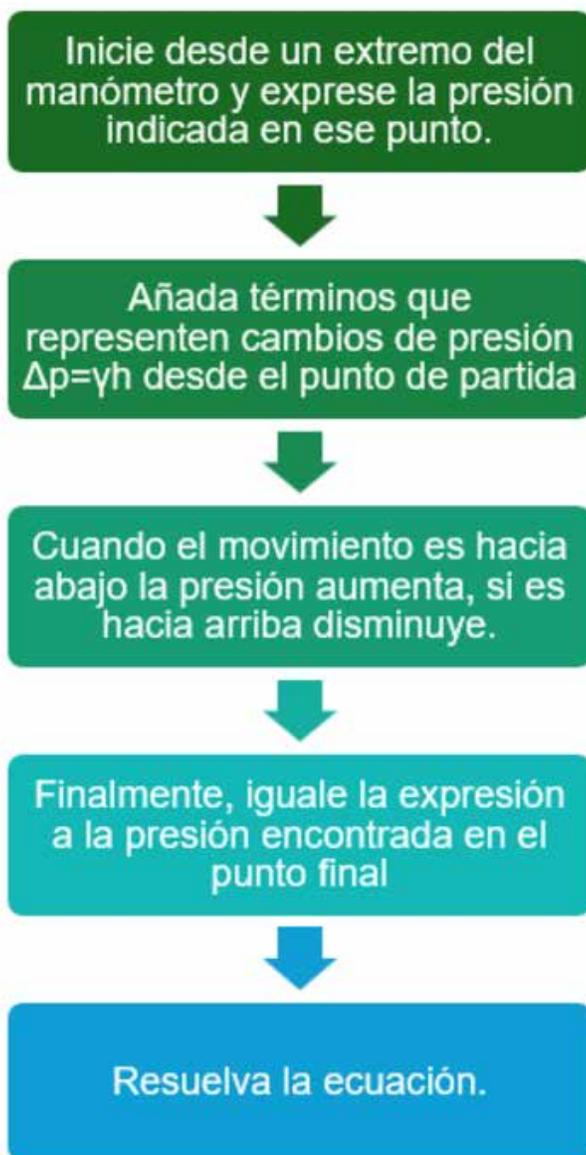


Figura 16. Barómetro básico
Fuente: Tomado de Çengel & Cimbala (2012)

2.4.2**Manómetros**

Es posible usar una columna de fluido para medir las diferencias de presión. El manómetro es un instrumento que funciona bajo este principio, se usa comúnmente para medir diferencias de presión. Consta principalmente de un tubo en U de vidrio o plástico que contiene uno o más fluidos con mercurio, agua, alcohol o aceite. La presión en un fluido no varía en la dirección horizontal dentro del mismo. En la Figura 17 se sugieren una serie de pasos para escribir la ecuación para un manómetro, mientras que en la Figura 18 se presenta un ejemplo de cálculo.



Recuerde que si el manómetro está abierto a la atmósfera en uno de sus extremos la presión es cero,

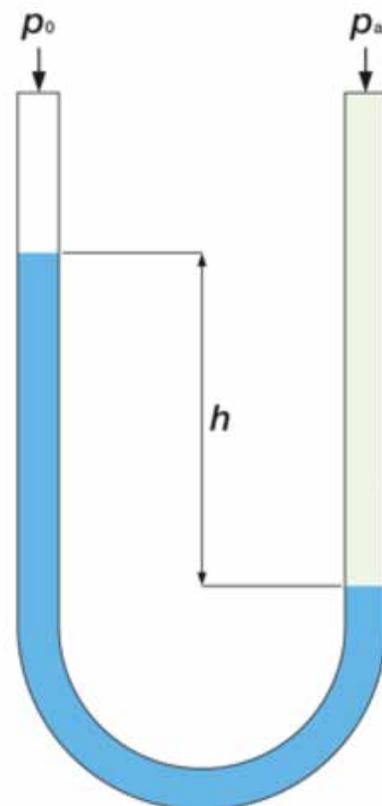
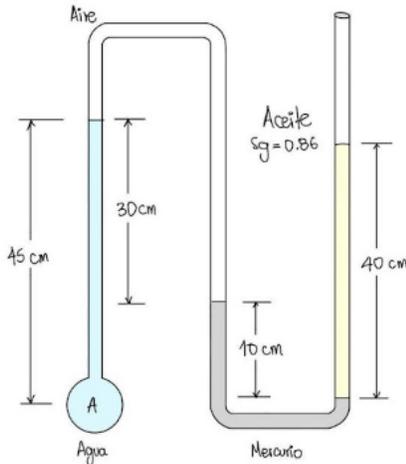


Figura 17. Pasos para escribir ecuación de un manómetro
Fuente: Elaboración propia



Para el manómetro mostrado en la figura, halle el valor de la presión en el punto A.



1. Se plantea la ecuación según los pasos indicados .

Empezando en el extremo que queda abierto a la atmósfera queda de la siguiente forma.

$$0 + (0.4 \text{ m}) * (0.86) * \left(9.81 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}\right) - (0.1 \text{ m}) * (13.54) * \left(9.81 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}\right) + (0.45 \text{ m}) * \left(9.81 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}\right) = P_A$$

2. Se resuelve la ecuación

$$P_A = -5.494 \text{ kPa}$$

Figura 18. Ejemplo demostrativo de la solución de manómetros
Fuente: Adaptado de Mott (2006)

2.5

Estática de fluidos

La estática de fluidos trata problemas relacionados con los fluidos en reposo. Cuando se estudian líquidos se habla de hidrostática, por otro lado, si el fluido es un gas se habla de aerostática. Esta rama se utiliza para determinar las fuerzas que actúan sobre cuerpos flotantes o sumergidos. Su aplicación en la ingeniería es muy importante sobre todo en el diseño de estructuras de contención de agua como presas (Figura 19) o tanques de almacenamiento.



Figura 19. Represa Hidrosogamoso
Fuente: (Portafolio, 2014)

2.5.1

Fuerzas hidrostáticas sobre superficies planas

Cuando se tienen superficies planas sumergidas es necesario calcular la magnitud de la fuerza total que se ejerce sobre ella y su punto de aplicación llamado centro de presión (Figura 20).

La presión promedio se aplica en el centroide de la superficie y se halla con la siguiente ecuación $P_C = P_0 + \gamma h_C$.

Donde h_C es la distancia vertical del centroide a la superficie libre del líquido, h_C se puede expresar de la siguiente forma $h_C = y_C \sin \theta$ y la P_0 suele ser la presión atmosférica.

La magnitud de la fuerza resultante es igual al producto de la P_C (presión promedio) aplicada en el centroide de la superficie y el área A de esta.

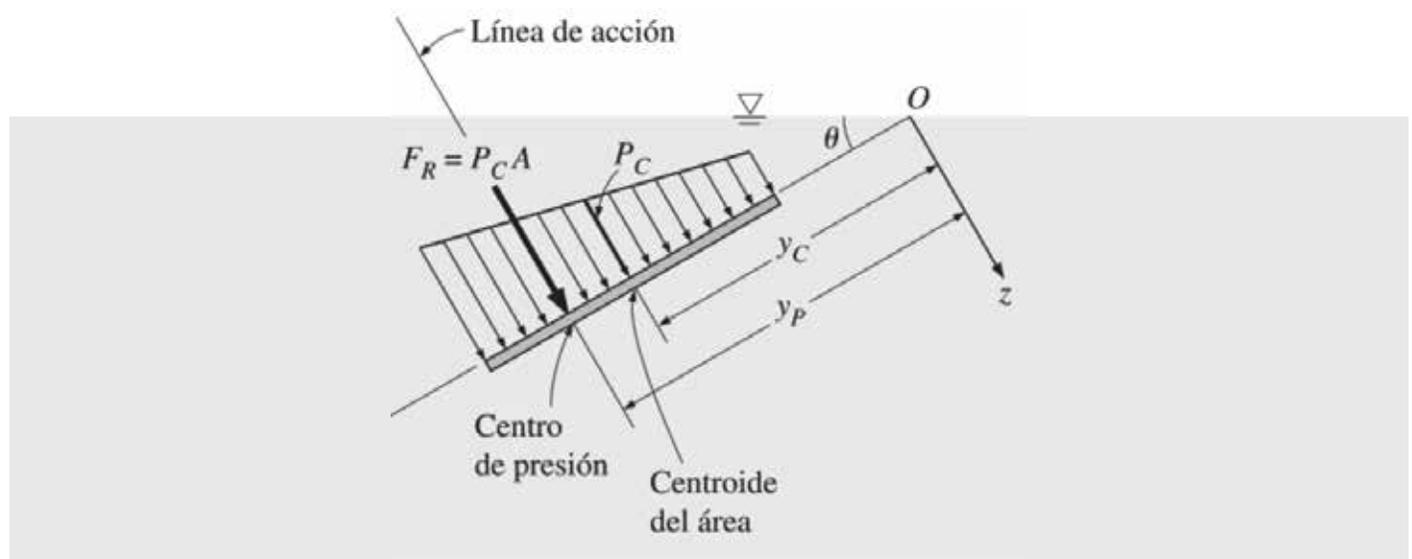


Figura 20. Fuerza resultante sobre una placa sumergida
Fuente: Tomado de Çengel & Cimbala (2012)

Para hallar la distancia entre el centro de presión y la superficie (y_p) se utiliza la siguiente expresión:

$$y_p = y_c + \frac{I_{xx,c}}{y_c A}$$

Donde:

$I_{xx,c}$ es el segundo momento de área respecto al eje x que pasa por el centroide. En la Figura 21 se observan algunos $I_{xx,c}$ de áreas comunes.

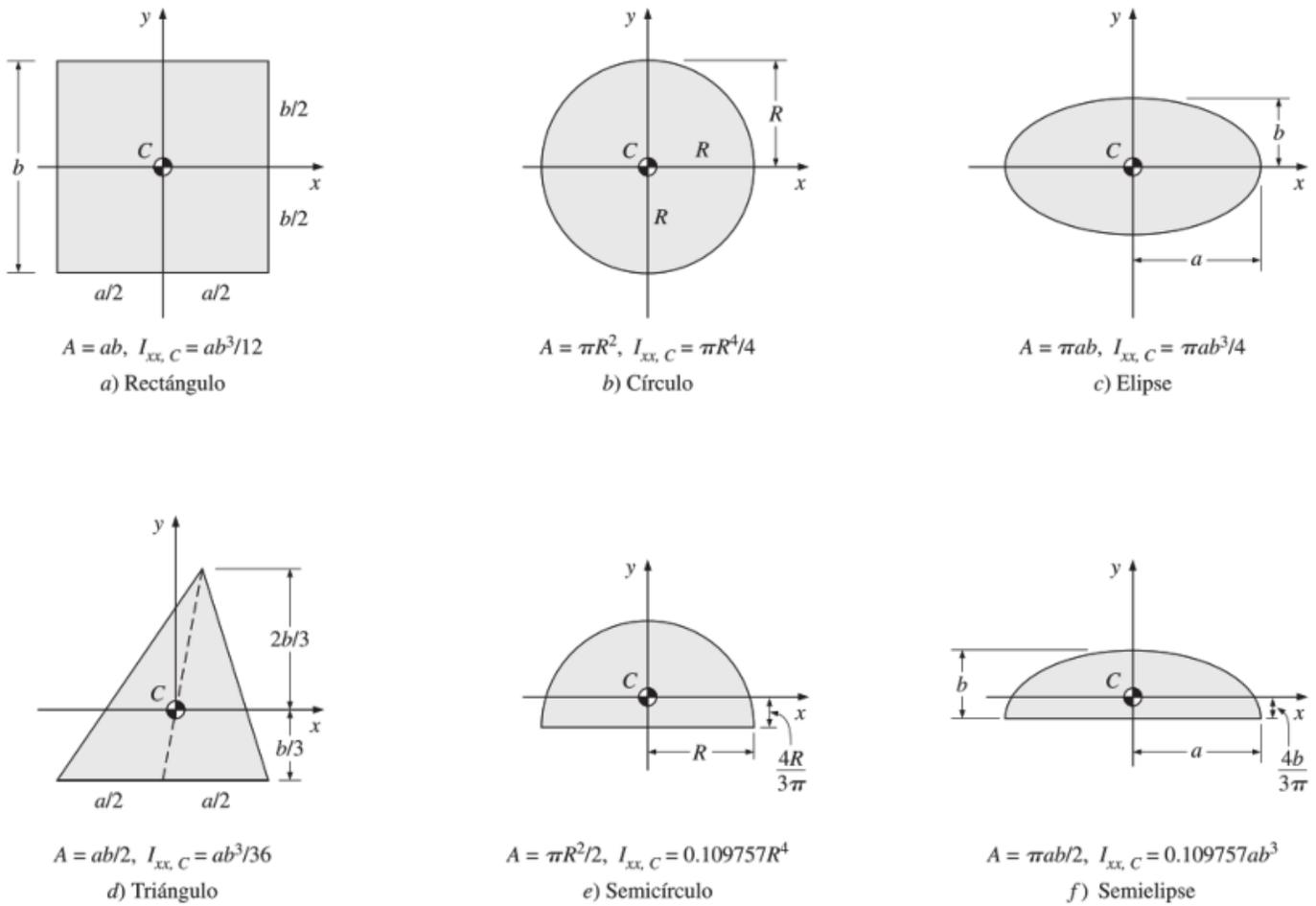


Figura 21. Momentos de inercia de algunas figuras geométricas
 Fuente: Tomado de Çengel & Cimbala (2012)

2.5.2 Fuerzas hidrostáticas sobre superficies curvas

La fuerza resultante en superficies curvas es más fácil de calcular cuando se separa en sus componentes horizontal y vertical. En la Figura 23, se muestra el diagrama de cuerpo libre del fluido en contacto con la superficie curva.

Al aislar esta porción aparecen otras fuerzas como el peso del fluido, la presión que ejerce de forma vertical y horizontal el líquido la misma.



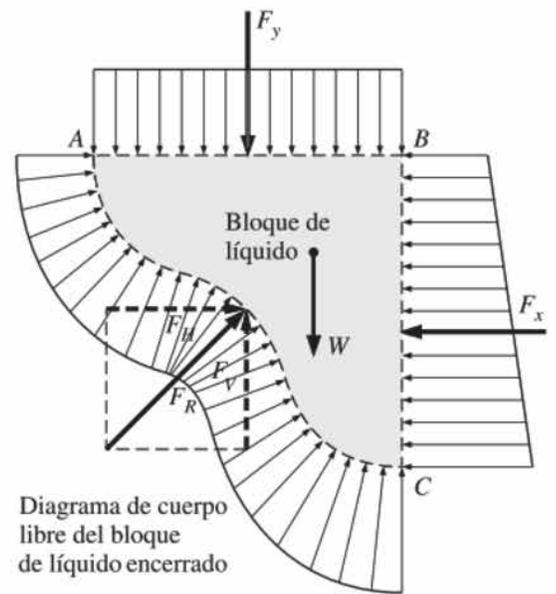
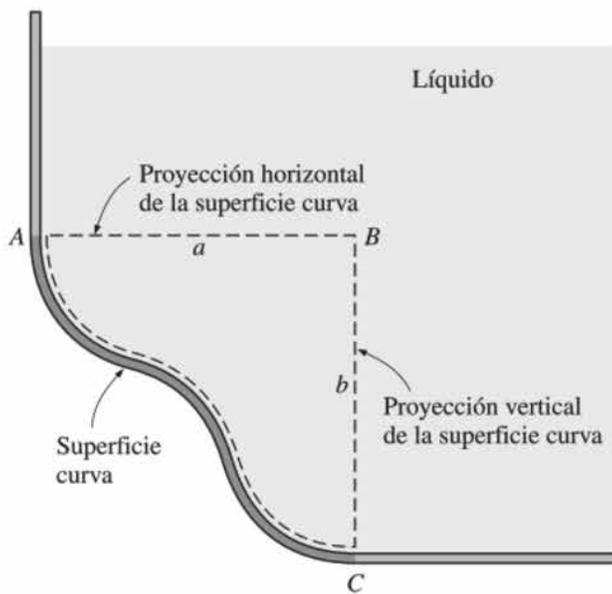


Figura 22. Fuerza hidrostática en superficies curvas
Fuente: Tomado de Çengel & Cimbala (2012)

Al realizar la sumatoria de fuerzas para un cuerpo en equilibrio se obtienen como resultado las componentes horizontal y vertical.

La componente horizontal de la fuerza resultante que se aplica sobre la superficie curva equivale a la fuerza resultante sobre la superficie plana que forma la proyección de la superficie curva en el plano vertical.

$$F_H = F_x$$

$$F_v = F_y + W$$

Para poner en práctica los conceptos que se han visto hasta el momento, en la siguiente caja (Figura 24) se muestra un ejercicio aplicado.

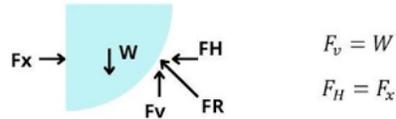
La componente vertical de la fuerza resultante que se aplica sobre la superficie curva, equivale a la magnitud y dirección del peso del líquido contenido sobre la superficie curva más la presión que se ejerce sobre la superficie plana proyectada en el plano horizontal.





Halle el valor de la fuerza resultante sobre la superficie curva (indique la magnitud de sus componentes). La presa tiene un ancho de 50 m.

1. Se realiza el diagrama de cuerpo libre de la porción de agua en contacto con la superficie curva.



2. Fuerza Vertical

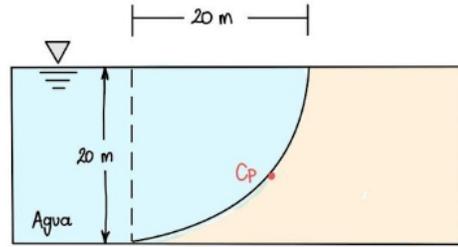
Volumen

$$V = \frac{\pi D^2}{4} h \quad V = \frac{\pi(20)^2}{4} (50) = 15707.96 \text{ m}^3$$

Peso

$$W = \gamma V \quad W = \left(9.81 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}\right) (15707.96 \text{ m}^3) = 154095.09 \text{ kN}$$

$$F_v = 154095.09 \text{ kN}$$



3. Fuerza Horizontal

Área $A = 20\text{m} * 50\text{m} = 1000 \text{ m}^2$

Presión

$$P = \gamma h_c \quad P = \left(9.81 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}\right) (10 \text{ m}) = 98.1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Fuerza sobre la proyección

$$F_x = P * A \quad F_x = \left(98.1 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}\right) * (1000 \text{ m}^2) = 98100 \text{ kN}$$

$$F_H = 98100 \text{ kN}$$

4. Fuerza Resultante

$$F_R = \sqrt{F_H^2 + F_v^2} \quad F_R = \sqrt{98100^2 + 154095.09^2} \quad F_R = 182671.58 \text{ kN}$$

Figura 24. Ejercicio resuelto sobre superficies curvas
Fuente: Tomado de Çengel & Cimbala (2012)

03

La Hidrodinámica

La hidrodinámica es una rama de la mecánica de fluidos que se enfoca en el estudio del comportamiento de los fluidos en movimiento. Analiza cómo los fluidos, tanto líquidos como gases, se desplazan bajo la influencia de fuerzas externas, como la presión y la gravedad. La hidrodinámica es crucial para diversas disciplinas de la ingeniería debido a su aplicabilidad en el diseño y análisis de sistemas de transporte y distribución de fluidos. En la ingeniería civil, se utiliza para el diseño de redes de abastecimiento de agua, sistemas de alcantarillado, y estructuras hidráulicas como presas y canales (Mott, 2006). En la ingeniería, es fundamental para optimizar la forma y eficiencia de vehículos, aviones y embarcaciones, reduciendo la resistencia del fluido y mejorando el rendimiento energético. Además, en la ingeniería ambiental, ayuda en el modelado de la dispersión de contaminantes y en el diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales.

La hidrodinámica se basa en varias ecuaciones fundamentales que describen el comportamiento de los fluidos en movimiento. Entre ellas se encuentran:



Ecuación de Conservación de Masa (Continuidad): Esta ecuación asegura que la masa del fluido se conserva a lo largo de su flujo, estableciendo que la cantidad de masa que entra en una sección de flujo es igual a la que sale.



Ecuación de Bernoulli: Esta ecuación relaciona la presión, velocidad y altura de un fluido en movimiento bajo condiciones ideales (considerando que no existe fricción), proporcionando una herramienta para entender la variación de estos parámetros a lo largo de una línea de flujo.



Ecuación de la Energía: Esta ecuación considera la conservación de la energía en un sistema de fluido, incluyendo las pérdidas de energía por fricción en tuberías y por accesorios menores, así como el uso de sistemas de bombeo o turbinas.

Estas ecuaciones permiten a los ingenieros analizar y diseñar sistemas eficientes y seguros, aplicando los principios de la hidrodinámica para resolver problemas prácticos en diversas áreas de la ingeniería (Çengel & Cimbala, 2012; Mott, 2006). En las siguientes secciones se desarrollan cada una de estas ecuaciones

3.1

Cinemática

Acorde con Çengel & Cimbala (2012) la cinemática en mecánica de fluidos es la rama que estudia el movimiento de los fluidos sin considerar las fuerzas o energías que lo provocan. Se centra en describir cómo se mueven las partículas de fluido en el espacio y el tiempo. Aquí hay algunos conceptos clave en la cinemática de fluidos: *Al ejercerse una presión sobre un fluido, esta se ejercerá con igual magnitud en todas las direcciones y en cada parte del fluido.*



Campo de Velocidades: Representa la velocidad de las partículas del fluido en cada punto del espacio en un momento dado. El campo de velocidades es una función vectorial que define la velocidad de las partículas de fluido en todos los puntos del espacio y en cualquier instante de tiempo. Matemáticamente, se expresa como $v(x,t)$ donde v es la velocidad, x representa la posición en el espacio y t es el tiempo. Este campo permite describir cómo se mueve el fluido en términos de su velocidad en cada punto y en cada momento.

Trayectoria de Partículas: Describe la ruta que sigue una partícula de fluido a lo largo del tiempo. Se obtiene integrando el campo de velocidades. Por tanto, La trayectoria de una partícula de fluido es la ruta que sigue dicha partícula a lo largo del tiempo. Esta se puede determinar integrando el campo de velocidades. Si $X(t)$ representa la posición de una partícula en el tiempo t , su trayectoria se obtiene resolviendo la ecuación diferencial:

$$\frac{d\mathbf{X}(t)}{dt} = \mathbf{v}(\mathbf{X}(t), t)$$





Líneas de Corriente: Las líneas de corriente son líneas imaginarias dibujadas en el campo de flujo tal que, en cualquier punto, la dirección de la línea es la misma que la dirección del vector velocidad en ese punto. Para un flujo estacionario, las líneas de corriente son fijas en el tiempo, mientras que, para un flujo no estacionario, las líneas de corriente pueden cambiar con el tiempo.

Líneas de Emisión: Las líneas de emisión (o líneas de tiempo) conectan todas las partículas que pasaron por un mismo punto de origen en diferentes instantes de tiempo. Estas líneas son útiles para analizar cómo se dispersan las partículas a lo largo del tiempo



Aceleración de las Partículas: Es la tasa de cambio de la velocidad de una partícula de fluido. En la cinemática de fluidos, la aceleración se descompone en dos componentes:

Aceleración Local: Es la variación temporal de la velocidad en un punto fijo del espacio. Se expresa como $\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t}$

Aceleración Convectiva: Es la variación de la velocidad debido al movimiento de la partícula a través del campo de velocidades. Se expresa como $(\mathbf{v} \cdot \nabla)\mathbf{v}$.

La aceleración total es la suma de estos dos componentes:

$$\mathbf{a} = \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla)\mathbf{v}$$



Análisis Euleriano: Observa el flujo de fluidos desde un punto fijo en el espacio y describe cómo cambian las propiedades del fluido (como velocidad, presión, entre otras) en ese punto con el tiempo.



Análisis Lagrangiano: Sigue el movimiento de una partícula específica de fluido a medida que se desplaza a través del campo de flujo.

Acorde, la cinemática en mecánica de fluidos es fundamental para describir y entender cómo se mueven los fluidos bajo diversas condiciones, lo cual es esencial en múltiples aplicaciones prácticas. En ingeniería, permite diseñar sistemas hidráulicos eficientes y seguros, optimizar procesos industriales y realizar simulaciones computacionales de dinámica de fluidos (CFD). Estas simulaciones son vitales para el diseño aerodinámico, la previsión meteorológica y la ingeniería marina. Además, la cinemática es crucial para estudiar fenómenos naturales como corrientes oceánicas y flujos atmosféricos, ayudando a mitigar el impacto ambiental y planificar respuestas ante desastres.

Además, la cinemática de fluidos es indispensable en la investigación científica, permitiendo explorar nuevos fenómenos en la física de fluidos y el desarrollo de tecnologías avanzadas como turbinas eólicas y sistemas de propulsión. También es clave en la medición y control del flujo de fluidos mediante instrumentos como anemómetros y flujómetros. En la educación, proporciona los conocimientos básicos para formar ingenieros y científicos capaces de abordar problemas complejos en la dinámica de fluidos. Por último, en el ámbito de mantenimiento y operaciones, se utiliza para diagnosticar y resolver problemas relacionados con el flujo de fluidos, asegurando el funcionamiento óptimo de diversos sistemas.

3.2

Ecuación de conservación de la masa o principio de continuidad

En la mecánica de fluidos, la conservación de la masa es un principio fundamental que establece que la masa de un fluido en un sistema cerrado permanece constante a lo largo del tiempo, independientemente de los procesos que ocurran dentro del sistema. Este principio puede ser expresado matemáticamente de manera integral y diferencial (Munson et al., 1995).

Para un volumen de control fijo (V) con superficie de control (S), la forma integral de la conservación de la masa se puede escribir como (Çengel & Cimbala, 2012):

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV + \int_S \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS = 0$$

- Donde:
- ρ es la densidad del fluido.
- \mathbf{v} es la velocidad del fluido.
- \mathbf{n} es el vector normal a la superficie de control SSS.
- dV es el elemento de volumen.
- dS es el elemento de superficie.

La primera parte de la ecuación representa la tasa de cambio de la masa dentro del volumen de control, y la segunda parte representa el flujo neto de masa a través de la superficie de control (Çengel & Cimbala, 2012).

Aplicando el teorema de la divergencia a la forma integral, podemos convertir la ecuación integral en una ecuación diferencial. El teorema de la divergencia dice que:

$$\int_V \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) dV = \int_S \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS$$

Sustituyendo en la ecuación integral de conservación de masa:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV + \int_V \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) dV = 0$$

Dado que esto debe ser cierto para cualquier volumen de control arbitrario, podemos escribir la forma diferencial como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

Esta es la ecuación diferencial de la conservación de la masa, también conocida como la ecuación de continuidad en su forma general.

En otras palabras, el flujo masico que de un fluido que atraviesa una sección transversal, debe ser equivalente al mismo flujo en su salida siempre y cuando la densidad permanezca constante y no exista acumulación en el medio. Por tanto, la ecuación anterior puede escribirse de la siguiente manera:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2$$

- Donde:**
- A es el área de una sección transversal al fluido
 - V es la velocidad del fluido en una de las secciones transversales

Para comprender mejor la Ecuación de continuidad, observe la imagen y verá que la ecuación de continuidad se refiere al producto del área y la velocidad del fluido, que es constante para un fluido incompresible. Además, notará que la velocidad aumenta en las secciones estrechas del tubo y disminuye en las secciones anchas, lo que asegura que el caudal sea constante a lo largo del tubo. Ahora reflexione lo presentado en la siguiente caja:



Piensa detenidamente

Caja de inquietudes

¿Por qué la velocidad cambia en una sección u otra?

La respuesta a este interrogante obedece a la definición de caudal. El caudal es una medida del volumen de fluido que pasa a través de una sección transversal de un conducto, canal o cualquier otro sistema en un tiempo determinado. Se expresa típicamente en unidades de volumen por unidad de tiempo, como metros cúbicos por segundo (m³/s) en el sistema internacional o pies cúbicos por segundo (ft³/s) en el sistema inglés. El caudal también puede ser definido matemáticamente como el producto del área y la velocidad. Tenga en cuenta que esta definición proporciona las mismas unidades de volumen sobre tiempo y cumple con los principios de dimensionalidad. La Figura 25 ilustra lo planteado previamente.

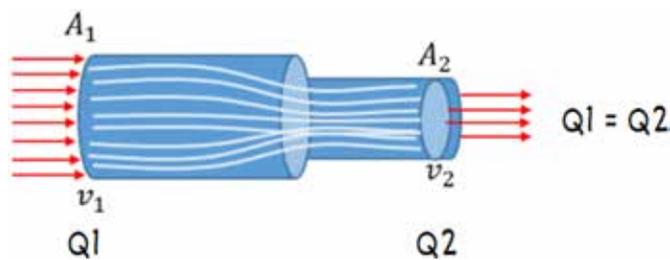


Figura 25. Ecuación de continuidad aplicada en un recipiente por donde pasa un fluido
 Fuente: Adaptado de Çengel & Cimbala (2012)

3.3

Ecuación de Bernoulli

La ecuación de Bernoulli permite relacionar de forma aproximada la energía de presión, energía cinética y la energía potencial en regiones de flujo estacionario e incom-

presible y se desprecia la fricción. Esta ecuación se concibe como una expresión del balance de energía mecánica y se puede escribir de la siguiente forma:

$$E = \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + z$$

Carga de velocidad ↑

Carga de presión ↓ Carga de elevación ↓

Figura 26. Ecuación de Bernoulli en función de la carga de presión, velocidad y elevación

Fuente: Elaboración propia

Esta ecuación tiene una amplia aplicación en la mecánica de fluidos a lo largo de una línea de corriente, en las regiones no viscosas del flujo. Esta ecuación puede usarse para evaluar la energía en cualquier punto sobre el flujo, y también puede escribirse entre dos puntos sobre la misma línea de corriente, expresándose de la siguiente forma:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2$$

3.3.1 Limitaciones de la ecuación de Bernoulli

- Es válida sólo para fluidos incompresibles porque se supone que el peso específico del fluido es el mismo en las dos secciones de interés.
- No puede haber dispositivos mecánicos entre las dos secciones de interés que agreguen o retiren energía del sistema, pues la ecuación establece que en el fluido la energía total permanece constante.
- No puede haber transferencia de calor hacia el fluido o fuera de él.
- No puede haber pérdida de energía debido a la fricción.

3.4

Ecuación de la Energía

La ecuación de energía en mecánica de fluidos es una forma más general de la ecuación de Bernoulli que incluye las pérdidas de energía debido a la fricción y otros factores no ideales en el sistema. Esta ecuación es fundamental para el análisis de sistemas de flujo en tuberías, canales y otros conductos. En la sección anterior vimos que en un fluido influyen tres tipos de cargas: carga de presión, carga

de velocidad y la carga debido a la posición y que actúan cuando el fluido se considera ideal, es decir, donde las fuerzas viscosas son consideradas como nulas. Debido a que en la práctica esto no sucede, los fluidos experimentan esfuerzos viscosos o "fricción" que conlleva a que tengan pérdidas de energía (H_t) en toda la sección de un conducto (Figura 27).

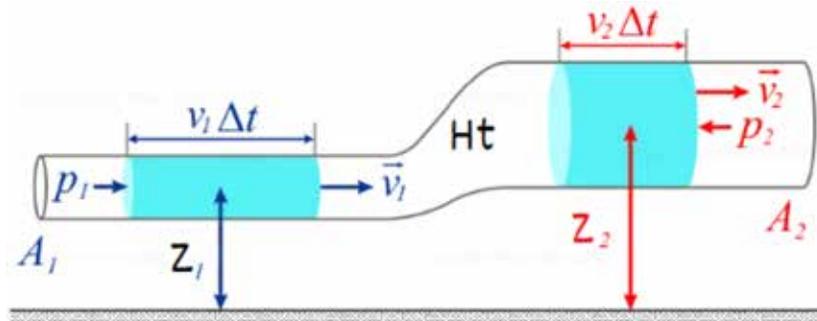


Figura 27. Formas de energía presentes en un conducto
Fuente: Adaptado de Çengel & Cimbala (2012)

La ecuación de energía para un fluido en movimiento, considerando las pérdidas de energía, se expresa como:

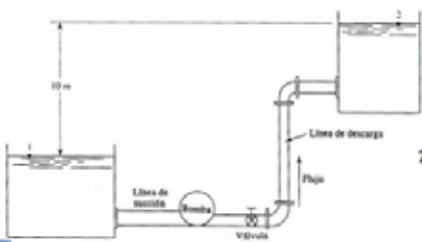
$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_f$$

Donde:

- p_1 y p_2 son las presiones en los puntos 1 y 2.
- γ es el peso específico del fluido.
- v_1 y v_2 son las velocidades del fluido en los puntos 1 y 2.
- g es la aceleración debida a la gravedad.
- z_1 y z_2 son las alturas sobre un nivel de referencia en los puntos 1 y 2.
- H_f es la pérdida de carga total debido a la fricción y otros factores (pérdidas mayores y menores).

Apliquemos ahora lo planteado en la teoría en un caso práctico como lo expone la siguiente caja:

Determine la potencia suministrada a la bomba mostrada en la figura II.2, considerando que su eficiencia es del 76%. A una temperatura de 25 °C, el metanol fluye a una velocidad de 0.015 m³/s. La línea de succión consta de una tubería de acero estándar de calibre 40, con un diámetro de 4 pulgadas y una longitud de 15 metros. La pérdida por fricción en la línea de descarga es 185.9 m, la pérdida en la salida es 2.44 m.



1. Plantee la ecuación de la energía entre los puntos 1 y 2

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_A - h_L = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$
2. Debido a que $p_1=p_2=0$ al igual que $v_1=v_2=0$, la ecuación se simplifica a:

$$z_1 + h_A - h_L = z_2$$
3. Se determinan las pérdidas totales del sistema:

$$h_A = z_2 - z_1 + h_L$$

$$h_A = 10 \text{ m} + 207.4 \text{ m} = 217.4 \text{ m}$$
4. Determine la potencia del equipo de bombeo

$$\text{Potencia} = \frac{h_A \gamma Q}{\epsilon_{br}} = \frac{(217.4 \text{ m})(7.74 \times 10^3 \text{ N/m}^3)(0.015 \text{ m}^3/\text{s})}{0.76}$$

$$= 33.2 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{m/s} = 33.2 \text{ kW}$$

Figura 28. Ejemplo de aplicación de la ecuación de la energía
Fuente: Adaptado de Mott (2006)

04

Flujo a través de **Tuberías**

En cualquier sistema de tuberías hay pérdida de energía debido a la fricción que se produce dentro del fluido por su movimiento a través de tuberías, dicha pérdida se ve afectada por el tipo de fluido, la velocidad del flujo y la naturaleza de la superficie de la pared de la tubería estacionaria. Las pérdidas por fricción provocan que la presión disminuya a lo largo de la tubería y aumentan la cantidad de potencia que una bomba debe suministrar al fluido. Posiblemente usted ha observado que la presión disminuye a medida que fluye desde un grifo hasta el extremo de un tramo largo de tubería, un tubo, una manguera de jardín o una manguera contra incendios. El coeficiente de fricción depende del tipo de flujo que se tiene dentro del sistema, el número de Reynolds permite determinar si el flujo es laminar o turbulento.

Adicionalmente, los accesorios que permiten cambios de dirección, regulación de flujo, aumento o reducción de diámetros, también ocasionan pérdidas en el sistema llamadas pérdidas menores.

4.1

Número de Reynolds

El científico Osborne Reynolds descubrió, a finales de la década de 1880, que el régimen de flujo depende principalmente de la razón de fuerzas inerciales a fuerzas viscosas

en el fluido. Se utiliza la siguiente expresión para determinar su valor y se expresa para flujo interno en una tubería circular

$$Re = \frac{\text{Fuerza inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{v_{prom}}{\nu} = \frac{\rho v_{prom} D}{\mu}$$

- Donde:

- v_{prom} = velocidad de flujo promedio (m/s)
- D = diámetro (m)
- ν = viscosidad cinemática del fluido (m²/s)

El número de Reynolds es una cantidad adimensional. Según el valor que se obtenga, el flujo se puede clasificar de la siguiente forma:

$Re < 2000$	Flujo laminar
$2000 < Re < 4000$	Flujo transicional
$Re > 4000$	Flujo turbulento

4.2

Flujo Laminar

El flujo laminar en líquidos es un régimen de flujo donde las partículas del líquido se mueven en capas paralelas sin mezclarse entre sí. En este tipo de flujo, el movimiento del líquido es suave y ordenado, sin la aparición de turbulencias o fluctuaciones caóticas. Este comportamiento se presenta cuando la velocidad del líquido es baja y su viscosidad es relativamente alta, lo que permite que las fuerzas viscosas dominen sobre las fuerzas inerciales.

El flujo laminar se caracteriza por un número de Reynolds (Re) bajo, generalmente menor a 2000. El número de Reynolds se calcula como $Re = (\rho v d) / \mu$, donde ρ es la densidad del líquido, v es la velocidad del flujo, d es el diámetro

del conducto y μ es la viscosidad dinámica del líquido. Cuando el número de Reynolds es bajo, el flujo permanece laminar y estable.

En un conducto cilíndrico, el perfil de velocidad del flujo laminar es parabólico, con la velocidad máxima en el centro del conducto y disminuyendo gradualmente hacia las paredes debido a la fricción. Este perfil de velocidad predecible y uniforme es ventajoso en muchas aplicaciones, como en el diseño de sistemas de tuberías y canales, donde se busca minimizar las pérdidas de energía y evitar turbulencias.

4.3

Flujo turbulento

El flujo turbulento es un tipo de flujo de fluido caracterizado por movimientos caóticos y desordenados de las partículas del fluido. En contraste con el flujo laminar, donde las capas del fluido se deslizan suavemente unas sobre otras, el flujo turbulento se manifiesta en remolinos, vórtices y fluctuaciones rápidas de velocidad y presión en todas las direcciones. Este tipo de flujo ocurre a altas velocidades y bajas viscosidades, donde las fuerzas inerciales dominan sobre las fuerzas viscosas.

El flujo turbulento se asocia con un número de Reynolds (Re) alto, generalmente mayor a 4000. En un conducto cilíndrico, el perfil de velocidad del flujo turbulento es más uniforme en comparación con el flujo laminar, pero presenta una mayor mezcla y una distribución de velocidades menos predecible. La turbulencia aumenta la fricción interna y, en consecuencia, las pérdidas de energía en el sistema, lo que puede afectar la eficiencia de la conducción de fluidos.

4.4

Pérdidas mayores

Las pérdidas mayores en tuberías se refieren a la disminución de presión del fluido debido a la fricción entre el fluido en movimiento y las paredes internas de la tubería. Estas pérdidas de energía son significativas en sistemas de transporte de fluidos y afectan la eficiencia del flujo a lo largo de largas distancias. Las pérdidas mayores son una función de varios factores, incluyendo el tipo de flujo (laminar o turbu-

lento), la rugosidad de la superficie interna de la tubería, la velocidad del flujo y las propiedades del fluido.

La ecuación de Darcy-Weisbach es una herramienta fundamental para calcular las pérdidas mayores en tuberías. La ecuación se expresa como:

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

Donde:

- h_f es la pérdida de carga (altura de pérdida de presión) debido a la fricción,
- f es el factor de fricción de Darcy,
- L es la longitud de la tubería,
- S es el diámetro interno de la tubería,
- v es la velocidad media del flujo,
- g es la aceleración debida a la gravedad.

El factor de fricción de Darcy (f) depende del régimen de flujo y la rugosidad relativa de la tubería. Para el flujo laminar, f se puede calcular utilizando la relación:

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

Donde Re es el número de Reynolds. Para el flujo turbulento, el factor de fricción se obtiene a partir de diagramas como el diagrama de Moody o utilizando ecuaciones empíricas como la ecuación de Colebrook-White:

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

- Donde:
- ε es la rugosidad absoluta de la tubería.

Las pérdidas mayores son críticas en el diseño y operación de sistemas de tuberías porque influyen en la selección del diámetro de la tubería, la potencia requerida para las bombas y la eficiencia general del sistema. Minimizar las pérdidas mayores implica optimizar la velocidad del flujo y

la rugosidad interna de las tuberías, así como seleccionar materiales y diseños que reduzcan la fricción. Por ejemplo, el uso de tuberías de mayor diámetro puede reducir la velocidad del flujo y, por lo tanto, las pérdidas por fricción, aunque puede aumentar el costo inicial de instalación.

4.5

Pérdidas menores

Las pérdidas menores en tuberías se refieren a la disminución de presión del fluido causada por elementos especiales y cambios en el flujo dentro del sistema de tuberías. Estas pérdidas ocurren en lugares como válvulas, codos, tees, reducciones, expansiones, entradas y salidas de tuberías, y otros accesorios que perturban el flujo laminar o turbulento. Aunque estas pérdidas son denominadas "menores", pueden ser significativas y deben ser considera-

das en el diseño y análisis de sistemas de transporte de fluidos.

Las pérdidas menores se cuantifican usando el coeficiente de pérdida de carga (K), que es un valor adimensional específico para cada tipo de accesorio o cambio de dirección. La pérdida de carga (h_m) debido a un accesorio se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$h_m = K \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

- h_m es la pérdida de carga debido al accesorio,
- K es el coeficiente de pérdida de carga del accesorio,
- v es la velocidad del flujo en la tubería,
- g es la aceleración debida a la gravedad.

Los valores del coeficiente K se determinan experimentalmente y varían según el diseño y la geometría del accesorio. A continuación, se presentan algunos ejemplos comunes de K para distintos accesorios:

- Codos de 90 grados: $K \approx 0.9-1.5$ (dependiendo del radio de curvatura)
- Válvulas de compuerta completamente abiertas: $K \approx 0.1-0.2$
- Válvulas de globo: $K \approx 10$
- Tés en línea recta: $K \approx 0.4$
- Entradas de tuberías: $K \approx 0.5$
- Salidas de tuberías: $K \approx 1.0$

Para sistemas de tuberías complejos, las pérdidas menores se suman para todos los accesorios y cambios en el sistema, y esta suma total se añade a las pérdidas mayores (debidas a la fricción en las tuberías) para determinar la pérdida de presión total del sistema.

En el diseño de sistemas de tuberías, es fundamental minimizar las pérdidas menores para mejorar la eficiencia del flujo y reducir los costos operativos. Esto puede lograrse seleccionando accesorios con bajos coeficientes K , optimizando el diseño del sistema para reducir el número de cambios de dirección y usando válvulas y codos que ofrezcan una menor resistencia al flujo.

Referencias

- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2012). Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones.
- Durst, F. (2022). Fluid Mechanics. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-63915-3>
- Fluidomanos. (2018). Penaloza, . <https://sites.udel.edu/japg/>
- Mott, R. (2006). Mecanica de Fluidos. Mecánica de Fluidos, 3 ed., 644. https://www.academia.edu/31396567/Mecánica_de_Fluidos_-_6ta_Edición_-_Robert_L._Mott.pdf
- Munson, B. R., Young, D. F., & Okiishi, T. H. (1995). Fundamentals of fluid mechanics. Oceanographic Literature Review, 10(42), 831. <https://www.infona.pl//resource/bwmeta1.element.elsevier-013-ce2bb-5df3-353d-9205-9c4162529c62>
- Portafolio. (2014, December 16). Hidrosogamoso ya está generando energía al país. Portafolio.Co.
- Shaughnessy, E. J., & Ira Katz James P Schaffer, J. M. (2005). Introduction to Fluid Mechanics.
- Song, H. (2018). Engineering Fluid Mechanics. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-0173-5>
- Villareal, A. (2018). Problemas Resueltos de Mecánica de Fluidos-Universidad Nacional de Colombia.

UDI

UDI UNIVERSIDAD
DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO