Última actualización: November 1, 2026

🗺️ Ruta de cuatro años · Año 3, Otoño · 🧮 Calculadora integrada

Sobre este curso

Este curso gratuito tiene 10 unidades y 6 laboratorios. Son los totales reales, no un programa más largo recortado.

Una comprobación es un número o un resultado de código en una página de curso que un script vuelve a calcular antes de publicar. El número impreso y el recalculado tienen que coincidir.

> Este es el esquema de un curso gratuito de autoestudio escrito por Saving Planets. No es un curso universitario, no otorga créditos académicos y ninguna institución participa.
>
> Su alcance sigue un curso semestral de mecánica de fluidos de tercer año. Se basa en los temas y la profundidad de MIT 2.06 Fluid Dynamics y MIT 1.060 Engineering Mechanics II (ambos gratuitos en MIT OpenCourseWare), y en cursos como Purdue ME 309 y Georgia Tech CEE 3040, usando el capítulo gratuito de fluidos de OpenStax University Physics y simulaciones de PhET, que enlazamos donde ayudan. Ninguno de esos autores o centros respalda esta página.
>
> Lo que añadimos: cada unidad se vincula a trabajo real con una fuente pública citada (energía hidroeléctrica, almacenamiento por bombeo, energía marina, fugas de agua domésticas, circulación oceánica y turbinas eólicas), cada número de la página se recalcula con un script de verificación antes de publicarse, y cada práctica tiene una simulación gratuita o una versión segura para hacer en casa.
>
> Síguelo en orden. Cada unidad tiene objetivos, ideas clave, ecuaciones, ejemplos paso a paso, práctica con respuestas completas, errores comunes, tarjetas de estudio y un cuestionario. Tu progreso se guarda solo en este navegador.

Cómo ayuda este curso a salvar el planeta

El agua y el aire en movimiento transportan la mayor parte de la energía renovable del mundo: los ríos a través de turbinas hidroeléctricas, el viento sobre las palas de los aerogeneradores, las mareas y las olas en los dispositivos de energía marina. La mecánica de fluidos también decide cuánta energía se necesita para bombear agua a ciudades y granjas, y cuánta se pierde por fugas y fricción.

Las corrientes oceánicas mueven calor por todo el planeta y moldean el clima. Cada unidad termina con una breve sección con fuentes. Los valores que no proceden de una fuente se indican como valores de ejemplo.

Para docentes

Puedes enseñar este curso o dejar que un estudiante lo haga solo. Es gratis. Saving Planets no pone nota ni da crédito escolar.

- Esta página es el curso completo: 10 unidades y 6 laboratorios (ENGR 330).
- Calcula 15 semanas, unas 6 a 9 horas por semana, incluidas las semanas de laboratorio.
- Sigue el calendario de 15 semanas. Lee la unidad, haz la práctica en papel y luego abre la respuesta. En una semana de laboratorio, haz el laboratorio o la versión en casa.
- Una comprobación es un número o un resultado de código en la página que un script vuelve a calcular antes de publicar. El número que ves y el recalculado tienen que coincidir.
- Usa Imprimir esta página, o descarga la guía de estudio en PDF. La hoja de fórmulas está cerca del final.
- Pregunta: ¿cómo ayuda esta unidad a las personas y al planeta? Cada unidad tiene un recuadro verde con un dato y su fuente.
- Copia la plantilla de guía docente y escribe el nombre de tu clase, el tiempo que tienes y las preguntas que harás. Abrir la plantilla de guía docente

Antes de empezar

Requisitos previos

- Cálculo III: derivadas parciales, divergencia e integrales múltiples.
- Ecuaciones diferenciales: EDO de primer y segundo orden.
- Estática y Dinámica: diagramas de cuerpo libre, leyes de Newton y cantidad de movimiento.
- La termodinámica ayuda con la ecuación de la energía, pero no es obligatoria.

Cómo estudiar

- Empieza cada problema con un esquema: volumen de control, línea de corriente o diagrama de cuerpo libre del fluido.
- Escribe primero la ecuación que rige el problema con palabras (masa, cantidad de movimiento o energía) y luego elimina los términos que puedas justificar.
- Trabaja con alturas (metros de fluido) en sistemas de líquidos; facilitan comparar bombas, tuberías y turbinas.
- Calcula el número de Reynolds antes de elegir una correlación de fricción o de arrastre.
- Comprueba unidades y casos límite: caudal nulo significa pérdida nula; duplicar la velocidad cuadruplica aproximadamente las pérdidas turbulentas.
- Haz cada ejercicio en papel antes de abrir la respuesta, y repite los cuestionarios unos días después.

Qué necesitas

- Una computadora o tableta para las simulaciones gratuitas de PhET Density, Buoyancy, Under Pressure y Fluid Pressure and Flow.
- Una botella de plástico transparente, un clavo o una brocheta, una regla y cinta adhesiva.
- Una báscula de cocina, una jarra medidora, un cubo y un cronómetro.
- Una manguera de jardín o un grifo de fregadero.
- Una hoja de cálculo para las prácticas de tuberías y bombas.

Calendario sugerido de 15 semanas

Unas 6 a 9 horas por semana: lectura, problemas de práctica y, en las semanas de laboratorio, el laboratorio.

Semana	Unidad	Temas	Lectura
1	Propiedades de los fluidos: densidad, viscosidad y tensión superficial	Propiedades de los fluidos, viscosidad, tensión superficial	OpenStax UP1 14.1, 14.7
2	Estática de fluidos, manómetros y flotación	Hidrostática y manómetros	UP1 14.2
3	Estática de fluidos, manómetros y flotación	Fuerzas sobre superficies sumergidas, flotación, estabilidad; Práctica A	UP1 14.4
4	Bernoulli, alturas y la ecuación de la energía	Continuidad, Bernoulli, alturas, ecuación de la energía; Práctica B	UP1 14.5–14.6
5	Cantidad de movimiento integral: chorros, álabes, codos y turbinas	Teorema del transporte de Reynolds, cantidad de movimiento, chorros, álabes, Pelton	MIT 2.06
6	Análisis diferencial: continuidad, Navier–Stokes y flujos exactos	Cinemática, continuidad, función de corriente	MIT 2.06
7	Análisis diferencial: continuidad, Navier–Stokes y flujos exactos	Navier–Stokes, Couette y Poiseuille; Práctica C; repaso para el parcial	MIT 2.25
8	Análisis dimensional, semejanza y ensayos con modelos	Análisis dimensional y semejanza	MIT 1.060
9	Flujo en tuberías: fricción, el diagrama de Moody y pérdidas menores	Flujo laminar y turbulento en tuberías, diagrama de Moody	MIT 1.060

Semana	Unidad	Temas	Lectura
10	Flujo en tuberías: fricción, el diagrama de Moody y pérdidas menores	Pérdidas menores, redes; Práctica D	MIT 1.060
11	Bombas, turbinas y sistemas de bombeo	Bombas, curvas del sistema, leyes de afinidad, turbinas; Práctica F	Sistemas de bombeo del DOE
12	Flujo externo: capas límite, arrastre y sustentación	Capas límite, arrastre, flujo de Stokes	NASA Glenn
13	Flujo externo: capas límite, arrastre y sustentación	Sustentación, energía eólica, límite de Betz; Práctica E	NASA Glenn; DOE wind
14	Flujo en canales abiertos: ríos, canales y resaltos hidráulicos	Canales abiertos, número de Froude, Manning	MIT 1.060
15	Flujo en canales abiertos: ríos, canales y resaltos hidráulicos	Energía específica, resaltos hidráulicos, vertederos; repaso para el final	MIT 1.060

Tu progreso

Marca las unidades y los laboratorios al terminarlos y haz los cuestionarios. El progreso y las puntuaciones se guardan solo en este navegador y nunca se nos envían.

Unidades

Propiedades de los fluidos: densidad, viscosidad y tensión superficial

Qué es un fluido, la hipótesis del continuo, densidad y densidad relativa, presión, viscosidad y ley de Newton de la viscosidad, viscosidad cinemática, fluidos no newtonianos, tensión superficial y ascenso capilar, y presión de vapor y cavitación.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Definir un fluido y usar la hipótesis del continuo.
- Usar la ley de Newton de la viscosidad para hallar el esfuerzo cortante.
- Calcular el ascenso capilar a partir de la tensión superficial.
- Explicar cómo las diferencias de densidad impulsan flujos.

Conceptos clave

- Un fluido se deforma continuamente bajo cualquier esfuerzo cortante, por pequeño que sea. Tratarlo como un continuo permite definir densidad, velocidad y presión en cada punto.
- Densidad ρ (kg/m³) y densidad relativa SG = ρ/ρ_water. El agua a 20 °C tiene ρ = 998 kg/m³; el aire a 15 °C, 1.225 kg/m³.
- Ley de Newton de la viscosidad: esfuerzo cortante τ = μ du/dy. La viscosidad dinámica μ mide la resistencia al corte; la viscosidad cinemática es ν = μ/ρ. El agua es unas 56 veces más viscosa que el aire, pero su ν es unas 15 veces menor.
- Los fluidos no newtonianos (pintura, sangre, pasta de dientes) tienen una viscosidad que cambia con la tasa de corte.
- La tensión superficial σ tensa las superficies líquidas; en un tubo fino el agua sube h = 4σ cos θ/(ρgD). Si la presión local baja hasta la presión de vapor, el líquido hierve: es la cavitación, que daña bombas y hélices.

Ecuaciones clave

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

τ=μdu/dy

Ley de Newton de la viscosidad

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

ν=(μ)/(ρ)

Viscosidad cinemática

$$SG = \frac{\rho}{\rho_{water}}$$

SG=ρρ_water

Densidad relativa

$$h = \frac{4\sigma \cos\theta}{\rho g D}$$

h=(4σθ)/(ρ gD)

Ascenso capilar

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 1.1 Agua (μ = 1.002 × 10⁻³ kg/(m·s)) llena una holgura de 1 mm entre una placa fija y otra que se mueve a 2 m/s. Halla el esfuerzo cortante.

1. du/dy = 2/0.001 = 2000 s⁻¹.
2. τ = 1.002 × 10⁻³ × 2000.

Respuesta: τ = 2.00 Pa.

Ejemplo 1.2 Halla el ascenso capilar del agua (σ = 0.0728 N/m, θ = 0) en un tubo de vidrio de 1 mm.

1. h = 4 × 0.0728/(998 × 9.81 × 0.001).

Respuesta: h = 29.7 mm.

Ejemplo 1.3 Halla ν para el agua a 20 °C.

1. ν = 1.002 × 10⁻³/998.

Respuesta: ν = 1.004 × 10⁻⁶ m²/s.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Halla la SG del agua de mar (1025 kg/m³).

   1025/998 = 1.027.

2. Halla el ascenso capilar en un tubo de 0.5 mm.

   El doble: 59.5 mm.

3. Halla μ_water/μ_air.

   $1.002 \times 10^{-3}/1.789 \times 10^{-5} = 56.0$.

4. ¿Qué fracción de un iceberg queda bajo el agua de mar?

   917/1025 = 89.5%.

Ideas erróneas comunes

Mito: La viscosidad y la densidad son lo mismo.
En realidad: La miel es viscosa; el mercurio es denso pero poco viscoso.

Mito: Los fluidos resisten el corte como los sólidos.
En realidad: Fluyen bajo cualquier esfuerzo cortante.

Mito: La cavitación requiere alta temperatura.
En realidad: Basta con una presión baja.

Tarjetas de estudio

Fluido

Se deforma continuamente bajo corte.

Viscosidad

$\tau = \mu\, du/dy$.

Viscosidad cinemática

$\nu = \mu/\rho$.

Densidad relativa

ρ/ρ_{water}.

Ascenso capilar

$4\sigma \cos\theta/(\rho g D)$.

Cavitación

Ebullición a baja presión.

Cuestionario de autoevaluación

1. El esfuerzo cortante en un fluido newtoniano es...

μ du/dy

ρgh

ρV^2

σ/D

μ du/dy. Ley de Newton de la viscosidad.

2. La viscosidad cinemática es...

μρ

μ/ρ

ρ/μ

τ/μ

μ/ρ. ν = μ/ρ.

3. El ascenso capilar aumenta cuando el tubo es...

más ancho

más estrecho

más largo

más pesado

más estrecho. h ∝ 1/D.

4. La cavitación ocurre cuando la presión baja hasta...

cero manométrico

la presión de vapor

la atmosférica

la de estancamiento

la presión de vapor. Ebullición local.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La NOAA explica que los vientos impulsan las corrientes oceánicas en los 100 metros superiores, pero las corrientes profundas, a miles de metros, se deben a diferencias de densidad del agua controladas por la temperatura y la salinidad: la circulación termohalina.

En las regiones polares se forma hielo marino que deja atrás la sal, así que el agua circundante se vuelve más salada y densa y se hunde; el agua superficial fluye para reemplazarla e inicia la cinta transportadora global. La densidad, la primera propiedad de esta unidad, mueve calor por todo el planeta.

En Saving Planets: Océanos · Observación de la Tierra

Fuentes: NOAA National Ocean Service: Thermohaline circulation (https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_currents/05conveyor1.html)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- OpenStax UP1, 14.1 Fluids, density and pressure (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-1-fluids-density-and-pressure): Sección de libro de texto gratuita.
- OpenStax UP1, 14.7 Viscosity and turbulence (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-7-viscosity-and-turbulence): Sección de libro de texto gratuita.
- MIT OpenCourseWare 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): Apuntes del MIT sobre propiedades de los fluidos.
- PhET: Density (https://phet.colorado.edu/en/simulations/density): La densidad de forma interactiva.

☐ **Terminé esta unidad**

UNIDAD 2 · SEMANAS 2–3

Estática de fluidos, manómetros y flotación

Presión en un punto, la ecuación hidrostática, presión manométrica y absoluta, manómetros, fuerzas hidrostáticas sobre superficies planas sumergidas y el centro de presión, fuerzas sobre superficies curvas, el principio de Arquímedes y la estabilidad de cuerpos flotantes.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Calcular la presión en profundidad y leer manómetros.
- Hallar la fuerza resultante y el centro de presión sobre una compuerta sumergida.
- Aplicar el principio de Arquímedes.
- Juzgar si un cuerpo flotante es estable.

Conceptos clave

- La presión en un punto actúa igual en todas las direcciones. En un fluido estático dp/dz = −ρg, así que con densidad constante p = p_0 + ρgh a la profundidad h. La presión manométrica se mide respecto a la atmósfera.
- Los manómetros equilibran columnas de fluido: recorre el tubo sumando ρgh al bajar y restándolo al subir.
- Sobre una superficie plana la fuerza resultante es F = ρg h_c A (h_c = profundidad del centroide). Actúa en el centro de presión, por debajo del centroide: y_cp = y_c + I_xc/(y_c A).
- En superficies curvas, la componente horizontal es la fuerza sobre la proyección vertical y la componente vertical es el peso del fluido que hay encima.
- Arquímedes: la fuerza de flotación es igual al peso del fluido desplazado, F_B = ρ_fluid g V_displaced. Un cuerpo flotante es estable si su metacentro está por encima de su centro de gravedad.

Ecuaciones clave

$$p = p_0 + \rho g h$$

`p=p_0+ρ gh`

Presión hidrostática

$$F = \rho g h_c A$$

`F=ρ g h_cA`

Fuerza sobre una superficie plana

$$y_{cp} = y_c + \frac{I_{xc}}{y_c A}$$

`y_cp=y_c+_xcy_cA`

Centro de presión

$$F_B = \rho_f g V_{disp}$$

`F_B=ρ_f gV_disp`

Fuerza de empuje

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 2.1 Halla la presión manométrica 10 m por debajo de la superficie de agua dulce (ρ = 998 kg/m³).

1. p = 998 × 9.81 × 10.

Respuesta: p = 97.9 kPa (cerca de una atmósfera).

Ejemplo 2.2 Una compuerta rectangular vertical de 2 m de ancho y 3 m de alto tiene su borde superior en la superficie del agua. Halla la fuerza y la profundidad del centro de presión.

1. h_c = 1.5 m; A = 6 m².
2. F = 998 × 9.81 × 1.5 × 6 = 88.1 kN.
3. I_xc = 2 × 3³/12 = 4.5 m⁴; y_cp = 1.5 + 4.5/(1.5 × 6).

Respuesta: F = 88.1 kN, actuando a 2.0 m bajo la superficie (dos tercios de la profundidad).

Ejemplo 2.3 Un manómetro de mercurio (ρ = 13600 kg/m³) conectado a una tubería de agua muestra una diferencia de 0.1 m. Halla la diferencia de presión.

1. Δp = (13600 − 1000) × 9.81 × 0.1 (agua sobre el mercurio, ρ_water ≈ 1000 kg/m³).

Respuesta: Δp = 12.4 kPa.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Halla la fuerza de flotación sobre un objeto de 2 L totalmente sumergido en agua ($\rho \approx 1000$ kg/m³).

   1000 × 9.81 × 0.002 = 19.6 N.

2. ¿Cuál es la presión absoluta a 10 m de profundidad si p_atm = 101.3 kPa?

   199.2 kPa.

3. ¿La fuerza sobre una presa depende de la longitud del embalse?

   No; solo de la profundidad y del área del muro.

4. ¿Por qué el centro de presión está por debajo del centroide?

   La presión aumenta con la profundidad.

Ideas erróneas comunes

Mito: La presión depende de la forma del recipiente.
En realidad: Solo de la profundidad (la paradoja hidrostática).

Mito: La flotación depende del peso del objeto.
En realidad: Depende del volumen desplazado.

Mito: La fuerza sobre una compuerta actúa en su centro.
En realidad: Actúa en el centro de presión, más abajo.

Tarjetas de estudio

Hidrostática

$p = p_0 + \rho g h$.

Presión manométrica

Respecto a la atmósfera.

Fuerza sobre superficie plana

$\rho g\, h_c\, A$.

Centro de presión

$y_c + I/(y_c\, A)$.

Arquímedes

$F_B = \rho g V$.

Estabilidad

Metacentro por encima de G.

Cuestionario de autoevaluación

1. La presión a la profundidad h es...

ρgh

$\rho V^2/2$

μ du/dy

mg/A

ρgh. Hidrostática (manométrica).

2. La fuerza de flotación es igual al...

peso del objeto

peso del fluido desplazado

masa del objeto

cero

peso del fluido desplazado. Arquímedes.

3. En una compuerta vertical desde la superficie, el centro de presión está a...

media profundidad

dos tercios de la profundidad

la superficie

el fondo

dos tercios de la profundidad. Carga triangular.

4. Un cuerpo flotante es estable si...

G está por encima de M

M está por encima de G

B = G

es pesado

M está por encima de G. Metacentro.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

El DOE señala que Estados Unidos tiene más de 90000 presas y que menos del 3 % generan electricidad; el resto sirve para recreación, estanques agrícolas, control de inundaciones, abastecimiento de agua y riego. Cada una se diseña con las ecuaciones de esta unidad: la carga del agua sobre una presa crece con el cuadrado de la profundidad y actúa en la parte baja del muro.

El DOE describe la central hidroeléctrica más común, una instalación de embalse, como una presa que almacena agua de un río en un embalse; el agua liberada a través de una turbina hace girar un generador, y las descargas también pueden servir para control de inundaciones, recreación, paso de peces y calidad del agua. La presión del agua almacenada sobre la presa y su altura en la turbina salen directamente de $p = \rho g h$.

En Saving Planets: Estática · Océanos

Fuentes: U.S. DOE: Types of hydropower plants (https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-plants)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- OpenStax UP1, 14.2 Measuring pressure (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-2-measuring-pressure): Sección de libro de texto gratuita.
- OpenStax UP1, 14.4 Archimedes' principle and buoyancy (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-4-archimedes-principle-and-buoyancy): Sección de libro de texto gratuita.
- PhET: Under Pressure (https://phet.colorado.edu/en/simulations/under-pressure): La hidrostática de forma interactiva.
- PhET: Buoyancy (https://phet.colorado.edu/en/simulations/buoyancy): La flotación de forma interactiva.

Ver la clase

Fluid Dynamics and Statics and Bernoulli's Equation (https://oyc.yale.edu/physics/phys-200/lecture-20) (en inglés)

Ramamurti Shankar, PHYS 200 Fundamentals of Physics I, Open Yale Courses. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · Condiciones de uso (https://oyc.yale.edu/terms). Enlace solo para estudio gratuito; Saving Planets no está afiliado a esta universidad ni cuenta con su respaldo.

☐ **Terminé esta unidad**

Bernoulli, alturas y la ecuación de la energía

Líneas de corriente y visualización del flujo, continuidad Q = AV, la ecuación de Bernoulli y sus límites, alturas de presión, velocidad y elevación, la línea de energía, la ley de Torricelli, la ecuación de energía en flujo estacionario con alturas de bomba, turbina y pérdidas, y la producción hidroeléctrica.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Aplicar continuidad y Bernoulli a lo largo de una línea de corriente.
- Trabajar con alturas: de presión, de velocidad y de elevación.
- Usar la ecuación de la energía con alturas de bomba, turbina y pérdidas.
- Calcular la potencia hidroeléctrica y la potencia de bombeo.

Conceptos clave

- En flujo estacionario incompresible, el caudal Q = AV es el mismo en cada sección de una tubería (continuidad).
- Bernoulli a lo largo de una línea de corriente (estacionario, no viscoso, incompresible): p/(ρg) + V²/(2g) + z = constante. Cada término es una altura en metros.
- Torricelli: un chorro que sale de un tanque a la profundidad h tiene velocidad V = √(2gh).
- Los sistemas reales añaden bombas y turbinas y pierden energía por fricción: $p_1/(\rho g) + V_1^2/(2g) + z_1$ + h_pump = $p_2/(\rho g) + V_2^2/(2g) + z_2$ + h_turbine + h_L.
- Potencia a partir de una altura: P = ρgQH. Las turbinas entregan P = ηρgQH; las bombas necesitan P = ρgQH/η. El DOE señala que la producción hidroeléctrica depende del caudal y de la altura.

Ecuaciones clave

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2$$

`Q=A_1V_1=A_2V_2`

Continuidad

$$\frac{p}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z = \text{const}$$

`(p)/(ρ g)+(V^2)/(2g)+z=const`

Bernoulli en alturas

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

V=2gh

Torricelli

$$P = \eta \rho g Q H$$

P=ρ gQH

Energía hidroeléctrica

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 3.1 Halla la velocidad del chorro que sale de un orificio 5 m por debajo de la superficie de un tanque.

1. V = √(2 × 9.81 × 5).

Respuesta: V = 9.90 m/s.

Ejemplo 3.2 Una central hidroeléctrica tiene Q = 50 m³/s, altura H = 100 m y eficiencia global 0.9 (valores de ejemplo; ρ = 1000 kg/m³). Halla la potencia.

1. P = 0.9 × 1000 × 9.81 × 50 × 100.

Respuesta: P = 44.1 MW, una central «grande» según la definición del DOE de 30 MW.

Ejemplo 3.3 Una bomba eleva 0.05 m³/s de agua 20 m con 5 m de pérdidas en tubería y una eficiencia del 75 %. Halla la potencia de entrada.

1. h_pump = 20 + 5 = 25 m.
2. P = 1000 × 9.81 × 0.05 × 25/0.75.

Respuesta: P = 16.4 kW.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Una manguera lleva 0.4 L/s por un diámetro interior de 20 mm hacia una boquilla de 10 mm. Halla ambas velocidades.

   1.27 m/s y 5.09 m/s.

2. Convierte 200 kPa a metros de columna de agua.

   200,000/(1000 × 9.81) = 20.4 m.

3. Se duplica la altura de una central hidroeléctrica con el mismo Q. ¿Potencia?

   Se duplica.

4. ¿Por qué un tubo de Pitot marca más que una toma estática?

   Añade la altura de velocidad.

Ideas erróneas comunes

Mito: Bernoulli se aplica a través de una bomba.
En realidad: Usa la ecuación de la energía con h_pump.

Mito: Un flujo más rápido significa mayor presión.
En realidad: A lo largo de una línea de corriente, más rápido significa menor presión estática.

Mito: La altura es una presión.
En realidad: Es energía por unidad de peso, en metros.

Tarjetas de estudio

Continuidad

$Q = AV$.

Bernoulli

$p/\rho g + V^2/2g + z = \text{const.}$

Torricelli

$V = \sqrt{(2gh)}$.

Ecuación de la energía

Añade h_pump, h_turbine, h_L.

Energía hidroeléctrica

$P = \eta\rho gQH$.

Potencia de bomba

$\rho gQH/\eta$.

Cuestionario de autoevaluación

1. La altura de velocidad es...

$V^2/(2g)$

$p/\rho g$

z

ρV^2

$V^2/(2g)$. Energía cinética por unidad de peso.

2. Reducir a la mitad el área de la tubería duplica...

la presión

la velocidad

el caudal

la pérdida de carga

la velocidad. Continuidad.

3. La potencia hidroeléctrica es proporcional a...

solo Q

solo H

Q × H

Q/H

Q × H. $P = \eta\rho gQH$.

4. La velocidad del chorro de Torricelli es...

gh

$\sqrt{(2gh)}$

2gh

$\sqrt{(gh)}$

√(2gh). Bernoulli del tanque al chorro.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

El DOE explica que la energía hidroeléctrica proviene de la energía cinética del agua que fluye, y que la energía disponible depende tanto del caudal como del desnivel, la altura: cuanto mayor sea el caudal y más alta la caída, más electricidad se puede generar. El agua fluye por una tubería forzada y hace girar una turbina conectada a un generador.

El DOE clasifica las centrales por tamaño: gran hidráulica por encima de 30 MW, pequeña hidráulica de 100 kW a 10 MW y microhidráulica hasta 100 kW, suficiente para una vivienda, una granja o un pueblo. P = ηρgQH permite dimensionar cualquiera de ellas a partir de una medida de caudal y un levantamiento del desnivel.

En Saving Planets: Soluciones · Termodinámica

Fuentes: U.S. DOE: How hydropower works (https://www.energy.gov/eere/water/how-hydropower-works) · U.S. DOE: Types of hydropower plants (https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-plants)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- OpenStax UP1, 14.5 Fluid dynamics (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-5-fluid-dynamics): Sección de libro de texto gratuita.
- OpenStax UP1, 14.6 Bernoulli's equation (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-6-bernoullis-equation): Sección de libro de texto gratuita.
- PhET: Fluid Pressure and Flow (https://phet.colorado.edu/en/simulations/fluid-pressure-and-flow): Bernoulli de forma interactiva.
- MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engineering-mechanics-ii-spring-2006/): Apuntes sobre la ecuación de la energía.

Ver la clase

Fluid Dynamics and Statics and Bernoulli's Equation (https://oyc.yale.edu/physics/phys-200/lecture-20) (en inglés)

Ramamurti Shankar, PHYS 200 Fundamentals of Physics I, Open Yale Courses. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 US (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/us/) · Condiciones de uso (https://oyc.yale.edu/terms). Enlace solo para estudio gratuito; Saving Planets no está afiliado a esta universidad ni cuenta con su respaldo.

☐ **Terminé esta unidad**

Cantidad de movimiento integral: chorros, álabes, codos y turbinas

Teorema del transporte de Reynolds, la ecuación de cantidad de movimiento lineal para volúmenes de control, fuerzas de chorros sobre placas y álabes, fuerzas sobre codos y boquillas, volúmenes de control móviles, turbinas de impulso (ruedas Pelton) y la ecuación del momento angular para turbomáquinas.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Enunciar el teorema del transporte de Reynolds.
- Aplicar la ecuación de cantidad de movimiento a chorros y álabes.
- Analizar un álabe móvil y una rueda Pelton.
- Usar el momento angular para el par de turbinas y bombas.

Conceptos clave

- Teorema del transporte de Reynolds: la tasa de cambio de una propiedad de un sistema fluido = tasa de cambio dentro de un volumen de control + flujo neto saliente a través de su superficie.
- Cantidad de movimiento lineal estacionaria: ΣF = Σṁ_out V_out − Σṁ_in V_in (vectores). Incluye las fuerzas de presión en las secciones cortadas y la fuerza de soporte.
- Un chorro de velocidad V y caudal Q que choca de frente con una placa plana ejerce F = ρQV. Un álabe que desvía el chorro un ángulo θ ejerce F = ρQV(1 − cos θ) a lo largo del chorro.
- Para un álabe que se mueve a velocidad U, usa la velocidad relativa (V − U). Las cucharas de una rueda Pelton desvían el chorro casi 180°; la potencia F·U es máxima cuando U = V/2.
- Momento angular: par = ṁ(r_2V_θ2 − r_1V_θ1) (ecuación de Euler de las turbomáquinas), la base del diseño de bombas y turbinas.

Ecuaciones clave

$$\sum \mathbf{F} = \sum \dot{m}\mathbf{V}_{out} - \sum \dot{m}\mathbf{V}_{in}$$

F= m V_out- m V_in

Cantidad de movimiento estacionaria

$$F = \rho Q V(1 - \cos\theta)$$

F=ρ QV(1-θ)

Fuerza de un chorro desviado

$$F = \rho Q(V - U)(1 - \cos\beta)$$

`F=ρ Q(V-U)(1-β)`

Álabe móvil

$$T = \dot{m}(r_2 V_{\theta 2} - r_1 V_{\theta 1})$$

`T= m(r_2V_θ2-r_1V_θ1)`

Ecuación de Euler de las turbomáquinas

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 4.1 Un chorro de agua de 50 mm a 20 m/s choca de frente con una placa plana. Halla la fuerza.

1. A = π × 0.05²/4 = 1.963 × 10⁻³ m².
2. F = ρAV² = 1000 × 1.963 × 10⁻³ × 400.

Respuesta: F = 785 N.

Ejemplo 4.2 El mismo chorro es desviado 120° por un álabe fijo. Halla la fuerza a lo largo del chorro.

1. F = ρAV²(1 − cos 120°) = 785 × 1.5.

Respuesta: F = 1178 N.

Ejemplo 4.3 Una cuchara Pelton que se mueve a 15 m/s recibe un chorro de 0.01 m³/s a 30 m/s y lo desvía 165°. Halla la fuerza y la potencia.

1. F = 1000 × 0.01 × (30 − 15)(1 − cos 165°) = 294.9 N.
2. P = F × U.

Respuesta: F = 294.9 N; P = 4.42 kW (el chorro lleva ½ρQV² = 4.5 kW).

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. ¿A qué velocidad de cuchara da una rueda Pelton la máxima potencia?

La mitad de la velocidad del chorro.

2. Se duplica la velocidad del chorro con la misma área. ¿Fuerza sobre una placa?

   4 veces.

3. Nombra las fuerzas de un balance de cantidad de movimiento en un codo.

   Fuerzas de presión en la entrada y la salida, el peso y la fuerza de soporte.

4. ¿Por qué las cucharas Pelton están divididas por la mitad?

   Para desviar el chorro casi 180° sin que golpee la siguiente cuchara.

Ideas erróneas comunes

Mito: La fuerza sobre la placa depende del tamaño de la placa.
En realidad: Para un chorro totalmente desviado, solo de ρQV.

Mito: Un álabe móvil ve toda la velocidad del chorro.
En realidad: Ve V − U.

Mito: La cantidad de movimiento es un escalar.
En realidad: Es un vector; descompón en componentes.

Tarjetas de estudio

RTT

Tasa del sistema = tasa en el VC + flujo neto saliente.

Momento lineal

$\Sigma F = \Sigma \dot{m}\, V_{out} - \Sigma \dot{m}\, V_{in}$.

Placa

ρQV.

Álabe

ρQV(1 − cos θ).

Pelton

Óptimo con U = V/2.

Turbina de Euler

$T = \dot{m}\, \Delta(rV_\theta)$.

Cuestionario de autoevaluación

1. La fuerza de un chorro sobre una placa plana es...

ρQV

ρgQH

½ρV²

QV

ρQV. Flujo de cantidad de movimiento.

2. Desviar un chorro 180° da una fuerza de...

ρQV

2ρQV

0

ρQV/2

2ρQV. 1 − cos 180° = 2.

3. El mejor U/V de una rueda Pelton es...

0.25

0.5

1

2

0.5. Maximiza (V − U)U.

4. La ecuación de Euler da, para una turbomáquina, el...

el momento de fuerza

la resistencia

la flotación

viscosidad

el momento de fuerza. Momento angular.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

El DOE explica que el almacenamiento hidroeléctrico por bombeo funciona como una batería gigante: cuando la demanda es baja bombea agua a un embalse superior, y cuando la demanda es alta el agua vuelve a bajar a través de una turbina. El DOE informa que el almacenamiento por bombeo representa el 88 % de todo el almacenamiento de energía a escala de red en Estados Unidos, en 43 centrales, con margen para más que duplicar la capacidad.

Cada bomba-turbina se diseña con las ecuaciones de cantidad de movimiento y momento angular de esta unidad: los ángulos de los álabes del rodete fijan cuánto par cede o recibe el agua. Almacenar así la energía solar y eólica depende de acertar con esos álabes.

En Saving Planets: Soluciones · Dinámica

Fuentes: U.S. DOE: Pumped storage hydropower (https://www.energy.gov/eere/water/pumped-storage-hydropower)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- MIT OpenCourseWare 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): Cantidad de movimiento en volúmenes de control.
- MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engineering-mechanics-ii-spring-2006/): Apuntes sobre cantidad de movimiento.
- NASA Glenn: Conservation of momentum (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/conmo.html): Página gratuita de la NASA.
- MIT OpenCourseWare 2.25 Advanced Fluid Mechanics (Fall 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-25-advanced-fluid-mechanics-fall-2013/): Tratamiento más profundo.

☐ **Terminé esta unidad**

UNIDAD 5 · SEMANAS 6–7

Análisis diferencial: continuidad, Navier–Stokes y flujos exactos

Cinemática de fluidos (campo de velocidad, aceleración, vorticidad, deformación), la ecuación diferencial de continuidad, la función de corriente, las ecuaciones de Euler y Navier–Stokes, condiciones de contorno y soluciones laminares exactas: flujo de Couette, flujo de Poiseuille plano y flujo de Hagen–Poiseuille en tuberías.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Calcular la aceleración material de un campo de velocidad.
- Comprobar la continuidad y hallar una función de corriente.
- Enunciar las ecuaciones de Navier–Stokes y sus condiciones de contorno.
- Resolver los flujos de Couette y de Hagen–Poiseuille.

Conceptos clave

- En la descripción euleriana, la aceleración tiene una parte local ∂V/∂t y una parte convectiva (V·∇)V; la suma es la derivada material DV/Dt.
- Continuidad incompresible: ∇·V = ∂u/∂x + ∂v/∂y + ∂w/∂z = 0. En 2D, una función de corriente ψ con u = ∂ψ/∂y, v = −∂ψ/∂x la cumple automáticamente.
- Navier–Stokes (incompresible, newtoniano): ρ DV/Dt = −∇p + ρg + μ∇²V. Con no deslizamiento en las paredes, rige casi todos los flujos de este curso; solo unos pocos casos tienen solución exacta.
- Flujo de Couette entre una placa fija y una móvil: perfil de velocidad lineal, esfuerzo τ = μU/h.
- Flujo de Hagen–Poiseuille en una tubería: perfil parabólico, u_max = 2V_avg y Q = πR⁴Δp/(8μL). Vale mientras el flujo sea laminar (Re por debajo de unos 2300).

Ecuaciones clave

$$\frac{D\mathbf{V}}{Dt} = \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V}\cdot\nabla)\mathbf{V}$$

```
(D V)/(Dt)=( V)/( t)+( V·) V
```

Aceleración material

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$$

Continuidad incompresible

$$\rho\frac{D\mathbf{V}}{Dt} = -\nabla p + \rho\mathbf{g} + \mu\nabla^2\mathbf{V}$$

ρ(D V)/(Dt)=- p+ρ g+μ^2 V

Navier–Stokes

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8 \mu L}$$

Q=(π R^4Δ p)/(8μ L)

Hagen–Poiseuille

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 5.1 Fluye agua por un tubo de 4 mm de diámetro con Δp/L = 100 Pa/m. Halla Q, V_avg, u_max y Re.

1. $Q = \pi \times 0.002^4 \times 100/(8 \times 1.002 \times 10^{-3}) = 6.27 \times 10^{-7}$ m³/s.
2. $V = Q/(\pi \times 0.002^2) = 0.0499$ m/s; u_max = 2V.
3. $Re = 998 \times 0.0499 \times 0.004/1.002 \times 10^{-3}$.

Respuesta: $Q = 6.27 \times 10^{-7}$ m³/s, V = 0.0499 m/s, u_max = 0.0998 m/s, Re = 199 (laminar).

Ejemplo 5.2 Una placa se mueve a 1 m/s sobre una película de agua de 2 mm. Halla el esfuerzo cortante.

1. $\tau = \mu U/h = 1.002 \times 10^{-3} \times 1/0.002$.

Respuesta: τ = 0.501 Pa.

Ejemplo 5.3 ¿Es V = (2x, −2y) incompresible, y cuál es su aceleración en (1, 1)?

1. $\partial u/\partial x + \partial v/\partial y = 2 - 2 = 0$.
2. $a_x = u\,\partial u/\partial x = 2x \times 2 = 4x$; $a_y = v\,\partial v/\partial y = (-2y)(-2) = 4y$.

Respuesta: Sí; a = (4, 4) m/s².

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Se reduce a la mitad el radio de la tubería con el mismo Δp/L. ¿Q?

1/16 del original.

2. Halla ψ para $u = 1$, $v = 0$.

   $\psi = y$.

3. ¿Dónde es máximo el esfuerzo cortante en el flujo de Poiseuille?

   En la pared.

4. Nombra la condición de contorno en una pared sólida.

   No deslizamiento: la velocidad del fluido es igual a la de la pared.

Ideas erróneas comunes

Mito: El flujo estacionario tiene aceleración nula.
En realidad: La aceleración convectiva puede no ser nula.

Mito: Navier–Stokes tiene muchas soluciones exactas.
En realidad: Solo unas pocas geometrías simples.

Mito: La ley de Poiseuille sirve para cualquier flujo en tuberías.
En realidad: Solo para flujo laminar.

Tarjetas de estudio

Derivada material

$\partial/\partial t + V\cdot\nabla$.

Continuidad

$\nabla\cdot V = 0$.

Función de corriente

$u = \partial\psi/\partial y$, $v = -\partial\psi/\partial x$.

Navier–Stokes

$\rho DV/Dt = -\nabla p + \rho g + \mu\nabla^2 V$.

Couette

$\tau = \mu U/h$.

Poiseuille

$Q = \pi R^4 \Delta p/8\mu L$.

Cuestionario de autoevaluación

1. El Q de Hagen–Poiseuille varía con el radio como…

R

R^2

R^3

R^4

R^4. $\pi R^4 \Delta p/(8\mu L)$.

2. En el flujo de Couette el perfil es...

parabólico

lineal

uniforme

logarítmico

lineal. Sin gradiente de presión.

3. La aceleración convectiva es...

$\partial V/\partial t$

$(V\cdot\nabla)V$

∇p

$\mu\nabla^2 V$

$(V\cdot\nabla)V$. El cambio espacial.

4. u_max/V_avg en flujo laminar en tuberías es...

1

1.5

2

4

2. Parabólico.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La EPA informa que las fugas domésticas pueden desperdiciar casi 1 billón de galones de agua al año en todo el país, que las fugas de un hogar promedio pueden desperdiciar más de 9300 galones al año, y que el 9 % de las viviendas tiene fugas que desperdician 50 galones o más al día.

Las pequeñas fugas por juntas y accesorios desgastados suelen ser flujos lentos y laminares por huecos diminutos, donde la ley en R^4 de arriba muestra por qué un pequeño ensanchamiento de una grieta marca una gran diferencia. Según la EPA, arreglar las fugas domésticas fáciles de corregir puede ahorrar cerca del 10 % en las facturas de agua.

En Saving Planets: Ecuaciones diferenciales · Cálculo III

Fuentes: U.S. EPA WaterSense: Fix a Leak Week (https://www.epa.gov/watersense/fix-leak-week)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- MIT OpenCourseWare 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): Clases sobre Navier–Stokes.
- MIT OpenCourseWare 2.25 Advanced Fluid Mechanics (Fall 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-25-advanced-fluid-mechanics-fall-2013/): Soluciones exactas.
- OpenStax UP1, 14.7 Viscosity and turbulence (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-7-viscosity-and-turbulence): Ley de Poiseuille.
- MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engineering-mechanics-ii-spring-2006/): Apuntes de cinemática.

☐ **Terminé esta unidad**

Análisis dimensional, semejanza y ensayos con modelos

Homogeneidad dimensional, el teorema Pi de Buckingham, grupos adimensionales comunes (Reynolds, Froude, Mach, Weber, Euler), semejanza geométrica, cinemática y dinámica, leyes de modelos y efectos de escala, y adimensionalización de las ecuaciones que rigen el flujo.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Hallar grupos adimensionales con el teorema Pi.
- Decir qué comparan Re, Fr, Ma y We.
- Escalar resultados de ensayos con modelos al tamaño real con semejanza de Froude o de Reynolds.
- Explicar por qué la semejanza completa suele ser imposible.

Conceptos clave

- Toda ecuación válida es dimensionalmente homogénea. El teorema Pi de Buckingham dice que un problema con n variables y k dimensiones básicas tiene n − k grupos adimensionales independientes.
- Grupos comunes: Re = ρVL/μ (inercia/viscosidad), Fr = V/√(gL) (inercia/gravedad), Ma = V/a (compresibilidad), We = ρV²L/σ (inercia/tensión superficial), Eu = Δp/(ρV²) (presión).
- Semejanza dinámica: si el modelo y el prototipo tienen la misma geometría y los mismos grupos adimensionales dominantes, sus resultados adimensionales (C_D, C_p, eficiencia) coinciden.
- Los flujos con superficie libre (barcos, aliviaderos, olas) usan escalado de Froude: V_m = V_p√(L_m/L_p); las fuerzas escalan con el cubo de la escala de longitudes y la potencia con esa escala elevada a 3.5.
- Igualar Re y Fr a la vez suele requerir un fluido imposible, así que los ingenieros igualan el grupo dominante y corrigen el otro (efectos de escala).

Ecuaciones clave

$$\Pi \text{ groups} = n - k$$

`groups=n-k`

Teorema Pi de Buckingham

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu},\ Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

`Re=(ρ VL)/(μ),\ Fr=`

Números de Reynolds y de Froude

$$V_m = V_p\sqrt{L_m/L_p}$$

`V_m=V_p_m/L_p`

Escalado de Froude

$$\frac{F_p}{F_m} = \left(\frac{L_p}{L_m}\right)^3$$

`(F_p)/(F_m)=((L_p)/(L_m))^3`

Escala de fuerzas (Froude, mismo fluido)

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 6.1 El arrastre F sobre una esfera depende de ρ, V, D y μ. ¿Cuántos grupos Pi hay y cuáles son?

1. n = 5 variables, k = 3 dimensiones (M, L, T).
2. Grupos: $F/(\rho V^2 D^2)$ y $\rho VD/\mu$.

Respuesta: 2 grupos: C_D = f(Re).

Ejemplo 6.2 Se ensaya un modelo undimotriz 1:20 con escalado de Froude. La velocidad de las olas a tamaño real es 10 m/s. Halla la velocidad en el modelo.

1. V_m = 10/√20.

Respuesta: V_m = 2.24 m/s.

Ejemplo 6.3 Para ese modelo, ¿cómo escalan las fuerzas y la potencia?

1. $F_p/F_m = 20^3$.
2. P_p/P_m = 20^3.5.

Respuesta: Fuerzas × 8000; potencia × 35777.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. ¿Qué grupo importa más para las olas de un barco?

   El número de Froude.

2. ¿Y para el flujo en una tubería pequeña?

   El número de Reynolds.

3. Un modelo 1:10 en el mismo fluido debe igualar Re. ¿Velocidad del modelo frente al tamaño real?

   10 veces más rápida.

4. ¿Qué compara We?

   La inercia con la tensión superficial.

Ideas erróneas comunes

Mito: Los ensayos con modelos usan la misma velocidad que el tamaño real.
En realidad: Usan velocidades escaladas.

Mito: Adimensional significa sin importancia.
En realidad: Los grupos adimensionales controlan la física.

Mito: Cualquier modelo da resultados exactos a escala real.
En realidad: Quedan efectos de escala cuando no coinciden todos los grupos.

Tarjetas de estudio

Teorema Pi

n − k grupos.

Reynolds

Inercia/viscosidad.

Froude

Inercia/gravedad.

Weber

Inercia/tensión superficial.

Semejanza

Mismos grupos, mismos coeficientes.

Escalado de Froude

$V \propto \sqrt{L}$.

Cuestionario de autoevaluación

1. El número de Froude compara la inercia con...

viscosidad

la gravedad

la tensión superficial

la compresibilidad

la gravedad. $V/\sqrt{(gL)}$.

2. Con 6 variables y 3 dimensiones hay...

2

3

6

9

3. $n - k$.

3. Las fuerzas con escalado de Froude (mismo fluido) escalan con la longitud elevada a...

1st

2nd

3rd

3.5th

3rd. L^3.

4. El C_D de una esfera lisa depende sobre todo de...

Fr

Re

We

Ma

Re. Efectos viscosos.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

El DOE describe la energía marina como la energía obtenida de olas, mareas, corrientes fluviales y oceánicas, y de diferencias de temperatura del océano. Dice que el recurso marino total de EE. UU. equivale a cerca del 57 % de toda la generación eléctrica de EE. UU. en 2019, y que estos recursos son muy predecibles.

El DOE señala que los investigadores prueban y despliegan nuevas tecnologías para aprovechar ese recurso. Los convertidores de energía undimotriz y las turbinas mareomotrices se desarrollan con modelos a escala en tanques de olas y canales mucho antes de que los dispositivos de tamaño real salgan al mar, usando el escalado de Froude y Reynolds de esta unidad.

En Saving Planets: Océanos · Soluciones

Fuentes: U.S. DOE: Marine energy basics (https://www.energy.gov/eere/water/marine-energy-basics)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- MIT OpenCourseWare 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): Clases de análisis dimensional.
- MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engineering-mechanics-ii-spring-2006/): Apuntes sobre semejanza.
- NASA Glenn: Similarity parameters (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/airsim.html): Página gratuita de la NASA.
- MIT OpenCourseWare 2.25 Advanced Fluid Mechanics (Fall 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-25-advanced-fluid-mechanics-fall-2013/): Escalado.

Terminé esta unidad

UNIDAD 7 · SEMANAS 9–10

Flujo en tuberías: fricción, el diagrama de Moody y pérdidas menores

Flujo laminar y turbulento en tuberías, longitud de entrada, la ecuación de Darcy–Weisbach, factor de fricción laminar 64/Re, el diagrama de Moody y las correlaciones de Colebrook y Haaland, pérdidas menores, conductos no circulares y diámetro hidráulico, y tuberías en serie, en paralelo y en red.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Decidir si el flujo en una tubería es laminar o turbulento.
- Calcular pérdidas por fricción con Darcy–Weisbach y la fórmula de Haaland.
- Añadir pérdidas menores de accesorios y válvulas.
- Resolver problemas sencillos de tuberías en serie y en paralelo.

Conceptos clave

- En tuberías, el flujo es laminar por debajo de Re ≈ 2300 y turbulento por encima de unos 4000. El flujo turbulento mezcla fuertemente la cantidad de movimiento y tiene un perfil más plano.
- Darcy–Weisbach: h_L = f(L/D)(V²/2g). Para flujo laminar f = 64/Re.
- Para flujo turbulento f depende de Re y de la rugosidad relativa ε/D (diagrama de Moody). La fórmula de Haaland es explícita: 1/√f = −1.8 $\log_{10}$[(ε/D/3.7)^1.11 + 6.9/Re].
- Accesorios, válvulas, codos y entradas añaden pérdidas menores h_m = K V²/(2g). En tuberías largas domina la fricción; en la fontanería doméstica importan los accesorios.
- Los conductos no circulares usan el diámetro hidráulico D_h = 4A/P. Las tuberías en serie comparten Q y suman pérdidas; en paralelo comparten la pérdida de carga y suman caudales.

Ecuaciones clave

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

`Re=(ρ VD)/(μ)`

Número de Reynolds en tuberías

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

`h_L=fL/D(V^2)/(2g)`

Darcy–Weisbach

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \log_{10}\left[\left(\frac{\varepsilon/D}{3.7}\right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re}\right]$$

`(1)/( f)=-1.8_10[((/D)/(3.7))^1.11+(6.9)/(Re)]`

Haaland

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

`h_m=K(V^2)/(2g)`

Pérdida menor

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 7.1 Fluye agua a 2 m/s en una tubería de acero comercial de 50 mm (ε = 0.045 mm). Halla Re y f.

1. Re = 998 × 2 × 0.05/1.002 × 10⁻³ = 99,600.
2. ε/D = 0.0009; Haaland da f.

Respuesta: Re = 9.96 × 10⁴ (turbulento); f = 0.0216.

Ejemplo 7.2 Halla la pérdida de carga por fricción en 100 m de esa tubería.

1. h_L = 0.0216 × (100/0.05) × 2²/(2 × 9.81).

Respuesta: h_L = 8.82 m.

Ejemplo 7.3 Halla el factor de fricción laminar con Re = 1500, y la pérdida de una entrada de arista viva (K = 0.5) a 2 m/s.

1. f = 64/1500.
2. h_m = 0.5 × 4/19.62.

Respuesta: f = 0.0427; h_m = 0.102 m.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Halla D_h para un conducto de 0.2 m × 0.1 m.

   $4 \times 0.02/0.6 = 0.133$ m.

2. Se duplica V en flujo turbulento completamente rugoso. ¿h_L?

   Unas 4 veces.

3. Dos tuberías iguales en paralelo llevan un Q total. ¿Caudal en cada una?

   Q/2, con la misma pérdida de carga.

4. ¿Re = 3000 es laminar o turbulento?

   De transición.

Ideas erróneas comunes

Mito: El factor de fricción es constante.

En realidad: Depende de Re y de la rugosidad.

Mito: Las pérdidas menores siempre son pequeñas.

En realidad: No en tuberías cortas con muchos accesorios.

Mito: El flujo laminar tiene más pérdidas.

En realidad: En el mismo rango de Re su f es menor, pero el flujo laminar solo ocurre a bajas velocidades.

Tarjetas de estudio

Transición

Re ≈ 2300–4000.

Darcy–Weisbach

$f(L/D)V^2/2g$.

f laminar

64/Re.

Haaland

f explícito.

Pérdida menor

$KV^2/2g$.

Diámetro hidráulico

4A/P.

Cuestionario de autoevaluación

1. El factor de fricción laminar es...

64/Re

0.316/Re^0.25

0.02

Re/64

64/Re. Poiseuille.

2. La pérdida de Darcy–Weisbach escala con...

V

V^2

V^3

1/V

V^2. Con f fijo.

3. El diámetro hidráulico es...

4A/P

A/P

P/A

2A/P

4A/P. Definición.

4. Las tuberías en paralelo comparten el mismo...

caudal

la pérdida de carga

diámetro

la velocidad

la pérdida de carga. Extremos comunes.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La EPA señala que un grifo que gotea una vez por segundo puede desperdiciar más de 3000 galones al año, suficiente para más de 180 duchas, y que una regadera que gotea 10 veces por minuto desperdicia más de 500 galones al año. Una fuga de riego de 1/32 de pulgada puede desperdiciar unos 6300 galones al mes.

Cada galón entregado también debe bombearse por kilómetros de tuberías, contra las pérdidas por fricción de esta unidad. Arreglar fugas ahorra a la vez el agua y la energía de bombeo; 3000 galones son unos 11355 L, o 31.1 L cada día.

En Saving Planets: Soluciones · Mecánica de materiales

Fuentes: U.S. EPA WaterSense: Fix a Leak Week (https://www.epa.gov/watersense/fix-leak-week)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engineering-mechanics-ii-spring-2006/): Apuntes sobre flujo en tuberías.
- MIT OpenCourseWare 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): Clases sobre flujo interno.
- OpenStax UP1, 14.7 Viscosity and turbulence (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-7-viscosity-and-turbulence): Flujo laminar y turbulento.
- MIT OpenCourseWare 2.25 Advanced Fluid Mechanics (Fall 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-25-advanced-fluid-mechanics-fall-2013/): Turbulencia.

☐ **Terminé esta unidad**

UNIDAD 8 · SEMANA 11

Bombas, turbinas y sistemas de bombeo

Bombas centrífugas y axiales, altura de la bomba, potencia y eficiencia, curvas de desempeño de bombas, curvas del sistema y punto de operación, bombas en serie y en paralelo, leyes de afinidad y variadores de velocidad, cavitación y NPSH, y turbinas hidráulicas (Pelton, Francis, Kaplan).

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Leer una curva de bomba y hallar el punto de operación con una curva del sistema.
- Calcular la potencia y la eficiencia de una bomba.
- Aplicar las leyes de afinidad a cambios de velocidad.
- Explicar el NPSH y cómo evitar la cavitación.

Conceptos clave

- Una bomba añade una altura h_p al flujo; la potencia hidráulica es ρgQh_p y la potencia en el eje es ρgQh_p/η.
- La curva de la bomba (altura que baja al subir el caudal) se cruza con la curva del sistema (elevación estática más pérdidas que crecen con Q²) en el punto de operación.
- Leyes de afinidad para la misma bomba a una nueva velocidad N: Q ∝ N, H ∝ N², P ∝ N³. Reducir la velocidad de una bomba con un variador en lugar de estrangular una válvula ahorra mucha energía.
- La cavitación empieza cuando la presión de entrada baja cerca de la presión de vapor. La altura neta positiva de succión disponible (NPSH_A) debe superar la que requiere la bomba (NPSH_R).
- Las turbinas hidráulicas son bombas al revés: Pelton (de impulso) para gran altura, Francis para altura media, Kaplan (de hélice) para baja altura y gran caudal; muchas unidades de almacenamiento por bombeo son bombas-turbinas reversibles.

Ecuaciones clave

$$P_{shaft} = \frac{\rho g Q h_p}{\eta}$$

```
P_shaft=(ρ gQh_p)/()
```

Potencia de bomba

$$H_{sys} = H_{static} + kQ^2$$

```
H_sys=H_static+kQ^2
```

Curva del sistema

$$\frac{Q_2}{Q_1}=\frac{N_2}{N_1},\ \frac{H_2}{H_1}=\left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2,\ \frac{P_2}{P_1}=\left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3$$

```
(Q_2)/(Q_1)=(N_2)/(N_1),\ (H_2)/(H_1)=((N_2)/(N_1))^2,\ (P_2)/(P_1)=((N_2)/(N_1))^3
```

Leyes de afinidad

$$NPSH_A > NPSH_R$$

Sin cavitación

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 8.1 La curva de una bomba es H = 40 − 7000Q² y la del sistema H = 10 + 5000Q² (H en m, Q en m³/s). Halla el punto de operación.

1. 40 − 7000Q² = 10 + 5000Q², así que Q² = 30/12000.
2. Q = 0.05 m³/s; H = 10 + 5000 × 0.0025.

Respuesta: Q = 0.05 m³/s, H = 22.5 m.

Ejemplo 8.2 Halla la potencia en el eje en ese punto con η = 0.75 (ρ = 1000 kg/m³).

1. P = 1000 × 9.81 × 0.05 × 22.5/0.75.

Respuesta: P = 14.7 kW.

Ejemplo 8.3 Una bomba que entrega 0.05 m³/s a 30 m de altura se frena de 1800 a 1500 rpm. Halla el nuevo caudal, la nueva altura y la relación de potencias.

1. Q = 0.05 × 1500/1800.
2. H = 30 × (1500/1800)².
3. Relación de P = (1500/1800)³.

Respuesta: Q = 0.0417 m³/s, H = 20.8 m, potencia al 57.9 % de la original.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Dos bombas iguales en serie: ¿qué se suma?

   Las alturas al mismo caudal.

2. ¿Y dos en paralelo?

   Los caudales a la misma altura.

3. Se reduce la velocidad un 20 %. ¿Potencia?

   $0.8^3 = 51.2\%$.

4. ¿Qué turbina conviene para una altura de 500 m?

   Pelton.

Ideas erróneas comunes

Mito: Estrangular una válvula es una forma eficiente de reducir el caudal.
En realidad: Desperdicia altura; es mejor frenar la bomba.

Mito: Una bomba más grande siempre es mejor.
En realidad: Las bombas sobredimensionadas funcionan lejos de su punto de máxima eficiencia.

Mito: La cavitación solo hace ruido.
En realidad: Erosiona los rodetes y reduce el desempeño.

Tarjetas de estudio

Potencia de bomba

$\rho g Q h/\eta$.

Curva del sistema

$H_{static} + kQ^2$.

Punto de operación

Las curvas se cruzan.

Afinidad

$Q \propto N$, $H \propto N^2$, $P \propto N^3$.

NPSH

Evitar la cavitación.

Turbinas

Pelton, Francis, Kaplan.

Cuestionario de autoevaluación

1. La potencia de una bomba escala con la velocidad como...

N

N^2

N^3

$\sqrt{N}$

N^3. Leyes de afinidad.

2. El punto de operación es donde...

la curva de la bomba se cruza con la del sistema

la eficiencia es cero

Q = 0

H = 0

la curva de la bomba se cruza con la del sistema. Equilibrio.

3. Para evitar la cavitación...

NPSH_A > NPSH_R

NPSH_A < NPSH_R

subir la velocidad

bajar la presión de entrada

NPSH_A > NPSH_R. Margen.

4. Poca altura y mucho caudal convienen a una...

Pelton

Francis

Kaplan

bomba de pistón

Kaplan. Turbina de hélice.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

La oficina de eficiencia industrial del DOE afirma que se pueden lograr ahorros espectaculares de energía y costos en los sistemas de bombeo aplicando las mejores prácticas de gestión energética y comprando equipos eficientes, y ofrece gratis la herramienta Pumping System Assessment Tool (PSAT) y el software MEASUR para encontrarlos.

Las leyes de afinidad muestran de dónde sale buena parte de ese ahorro: una bomba frenada un 20 % con un variador de velocidad necesita solo cerca de la mitad de la potencia. La página del DOE sobre almacenamiento por bombeo añade que las bombas-turbinas suben el agua cuando la electricidad es barata y generan cuando se necesita.

En Saving Planets: Soluciones · Circuitos

Fuentes: U.S. DOE: Pump systems (https://www.energy.gov/eere/iedo/pump-systems) · U.S. DOE: Pumped storage hydropower (https://www.energy.gov/eere/water/pumped-storage-hydropower)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engineering-mechanics-ii-spring-2006/): Apuntes sobre bombas.
- MIT OpenCourseWare 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): Clases sobre turbomáquinas.
- U.S. DOE: Pump systems (https://www.energy.gov/eere/iedo/pump-systems): Herramientas gratuitas del DOE para bombas.
- MIT OpenCourseWare 2.25 Advanced Fluid Mechanics (Fall 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-25-advanced-fluid-mechanics-fall-2013/): Tratamiento más profundo.

☐ **Terminé esta unidad**

Flujo externo: capas límite, arrastre y sustentación

Flujo alrededor de cuerpos, capas límite sobre placas planas, arrastre por fricción y por presión, coeficientes de arrastre de esferas, cilindros y cuerpos aerodinámicos, la crisis del arrastre, flujo de Stokes y sedimentación, sustentación, y la potencia disponible en una corriente de viento o de agua.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Calcular el arrastre a partir de un coeficiente de arrastre.
- Explicar el papel del arrastre por fricción y por presión.
- Usar la ley de Stokes para partículas pequeñas.
- Hallar la potencia de una corriente de viento y el límite de Betz.

Conceptos clave

- Arrastre $F_D = C_D \tfrac{1}{2}\rho V^2 A$ y sustentación $F_L = C_L \tfrac{1}{2}\rho V^2 A$, con A un área de referencia. C_D depende de la forma y de Re.
- Los cuerpos aerodinámicos tienen sobre todo arrastre por fricción; los cuerpos romos (esferas, cilindros, camiones) tienen sobre todo arrastre por presión debido a una estela separada.
- Para una esfera lisa $C_D \approx 0.47$ para $10^3 < Re < 2 \times 10^5$; hacia $Re \approx 3 \times 10^5$ la capa límite se vuelve turbulenta, se separa más tarde y C_D cae bruscamente (la crisis del arrastre).
- A Re muy bajo ($Re < 1$), arrastre de Stokes $F = 3\pi\mu V D$; una partícula pequeña sedimenta a $V = (\rho_p - \rho) g D^2/(18\mu)$.
- Una corriente de área A transporta una potencia $\tfrac{1}{2}\rho A V^3$. Ninguna turbina puede captar más de $16/27 \approx 59.3\ \%$ de ella (el límite de Betz).

Ecuaciones clave

$$F_D = C_D \tfrac{1}{2}\rho V^2 A$$

F_D=C_D12ρ V^2A

Resistencia

$$F = 3\pi\mu V D$$

F=3πμ VD

Arrastre de Stokes

$$V_s = \frac{(\rho_p - \rho) g D^2}{18 \mu}$$

V_s=((ρ_p-ρ)gD^2)/(18μ)

Velocidad de sedimentación

$$P = \tfrac{1}{2} \rho A V^3, \;\; C_{P,max} = \frac{16}{27}$$

P=12ρ AV^3,\ \ C_P,max=16/27

Potencia eólica y límite de Betz

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 9.1 Un balón de 0.22 m se mueve a 20 m/s en el aire (C_D = 0.47, valor de ejemplo). Halla Re y el arrastre.

1. Re = 1.225 × 20 × 0.22/1.789 × 10^{-5} = 3.01 × 10^{5}.
2. F = 0.47 × ½ × 1.225 × 400 × π × 0.11^{2}.

Respuesta: Re = 3.01 × 10^{5} (cerca de la crisis del arrastre); F = 4.38 N.

Ejemplo 9.2 Halla la velocidad de sedimentación de un grano de arena de 50 μm (ρ_p = 2500 kg/m^{3}) en agua.

1. V = (2500 − 998) × 9.81 × $(50 \times 10^{-6})^{2}$/(18 × 1.002 × 10^{-3}).
2. Comprueba Re = 998 × 0.00204 × 50 × 10^{-6}/1.002 × 10^{-3} = 0.102.

Respuesta: V = 2.04 mm/s; Re < 1, así que se cumple la ley de Stokes.

Ejemplo 9.3 Halla la potencia del viento a través de un rotor de 100 m de diámetro a 10 m/s, y el máximo de Betz.

1. A = π × 50^{2} = 7854 m^{2}.
2. P = ½ × 1.225 × 7854 × 1000.
3. P_max = P × 16/27.

Respuesta: P = 4.81 MW; máximo de Betz 2.85 MW.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. Se duplica la velocidad del viento. ¿Potencia del viento?

   8 veces.

2. ¿Por qué los camiones llevan carenados?

   Para reducir el arrastre por presión de la estela.

3. Se reduce a la mitad el diámetro de una partícula. ¿Velocidad de sedimentación de Stokes?

   1/4.

4. ¿Qué es la crisis del arrastre?

   La caída repentina de C_D cuando la capa límite se vuelve turbulenta.

Ideas erróneas comunes

Mito: El arrastre siempre es proporcional a V^2.
En realidad: A Re muy bajo es proporcional a V.

Mito: Una turbina puede extraer toda la potencia del viento.
En realidad: Betz la limita al 59.3 %.

Mito: Las superficies rugosas siempre aumentan el arrastre.
En realidad: En las esferas pueden provocar antes la crisis del arrastre.

Tarjetas de estudio

Resistencia

C_D $\frac{1}{2}\rho V^2 A$.

Arrastre por presión

Estela tras los cuerpos romos.

Crisis del arrastre

C_D cae cerca de Re 3×10^5.

Stokes

$F = 3\pi\mu VD$.

Potencia eólica

Betz

$\frac{1}{2}\rho A V^3$.

59.3%.

Cuestionario de autoevaluación

1. La potencia del viento escala con V como…

V

V^2

V^3

V^4

V^3. $\frac{1}{2}\rho A V^3$.

2. El límite de Betz es aproximadamente…

30%

45%

59%

100%

59%. 16/27.

3. El arrastre de Stokes se aplica cuando Re es…

< 1

$\approx 10^3$

$> 10^5$

cualquiera

< 1. Flujo reptante.

4. El arrastre de un cuerpo romo es sobre todo…

la fricción

la presión

inducido

de ola

la presión. Estela separada.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

El DOE explica que las palas de un aerogenerador funcionan como el ala de un avión o el rotor de un helicóptero: la diferencia de presión a ambos lados de la pala crea sustentación y arrastre, y como la sustentación supera al arrastre, el rotor hace girar un generador. El DOE señala que los aerogeneradores terrestres van de 100 kilovatios a varios megavatios.

La ley $\frac{1}{2}\rho AV^3$ explica por qué los aerogeneradores son cada vez más altos y anchos: duplicar el diámetro del rotor cuadruplica el área, y los bujes más altos alcanzan vientos más rápidos, con una potencia que crece como el cubo de la velocidad. El límite de Betz fija la meta que persigue todo diseñador de palas.

En Saving Planets: Aerodinámica I · Soluciones

Fuentes: DOE de EE. UU.: ¿cómo funcionan los aerogeneradores? (en inglés) (https://www.energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- NASA Glenn: Drag of a sphere (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/dragsphere.html): Página gratuita de la NASA.
- NASA Glenn: Boundary layer (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/boundlay.html): Página gratuita de la NASA.
- MIT OpenCourseWare 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): Clases sobre flujo externo.
- OpenStax UP1, 14.7 Viscosity and turbulence (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-7-viscosity-and-turbulence): Sección de libro de texto gratuita.

☐ **Terminé esta unidad**

UNIDAD 10 · SEMANAS 14–15

Flujo en canales abiertos: ríos, canales y resaltos hidráulicos

Canales abiertos, radio hidráulico, número de Froude y flujo subcrítico, crítico y supercrítico, energía específica y profundidad crítica, flujo uniforme y ecuación de Manning, resaltos hidráulicos y disipación de energía, y vertedores para medir caudales.

Objetivos de aprendizaje

Al terminar esta unidad podrás:

- Clasificar el flujo en canales con el número de Froude.
- Hallar la profundidad crítica y la energía específica.
- Usar la ecuación de Manning para flujo uniforme.
- Calcular la profundidad tras un resalto hidráulico y la energía que se pierde en él.

Conceptos clave

- En los canales abiertos la gravedad impulsa el flujo y la superficie libre está a presión atmosférica. El radio hidráulico es R_h = A/P (perímetro mojado).
- Número de Froude Fr = V/√(gy): Fr < 1 subcrítico (lento, profundo), Fr = 1 crítico, Fr > 1 supercrítico (rápido, poco profundo). Las ondas superficiales solo pueden viajar aguas arriba en flujo subcrítico.
- Energía específica E = y + V²/(2g). Para un caudal por unidad de ancho q, el mínimo de E ocurre a la profundidad crítica y_c = (q²/g)^(1/3).
- Flujo uniforme (Manning, SI): V = (1/n) R_h^(2/3) S^(1/2), con rugosidad n (cerca de 0.013 para concreto acabado) y pendiente del fondo S.
- Un resalto hidráulico convierte el flujo supercrítico en subcrítico: $y_2/y_1 = \tfrac{1}{2}(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1)$, y disipa la altura h_L = $(y_2 - y_1)^3/(4y_1y_2)$. Los vertedores de demasías usan resaltos para proteger el lecho de los ríos bajo las presas.

Ecuaciones clave

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}}$$

Número de Froude

$$E = y + \frac{V^2}{2g}, \;\; y_c = \left(\frac{q^2}{g}\right)^{1/3}$$

E=y+(V^2)/(2g),\ \ y_c=((q^2)/(g))^1/3

Energía específica y profundidad crítica

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2}$$

V=1n R_h^2/3S^1/2

Ecuación de Manning (SI)

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2}\left(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1\right)$$

(y_2)/(y_1)=12(1+8Fr_1^2-1)

Resalto hidráulico

Ejemplos resueltos paso a paso

Ejemplo 10.1 Un canal de concreto de 2 m de ancho (n = 0.013) lleva agua a 1 m de profundidad con una pendiente de 0.001. Halla V y Q.

1. A = 2 m², P = 4 m, R_h = 0.5 m.
2. V = (1/0.013) × 0.5^(2/3) × 0.001^0.5.
3. Q = VA.

Respuesta: V = 1.53 m/s; Q = 3.06 m³/s.

Ejemplo 10.2 El agua fluye a 0.5 m de profundidad y 6 m/s al pie de un vertedor. Halla Fr, la profundidad tras un resalto hidráulico y la altura perdida.

1. Fr = 6/√(9.81 × 0.5) = 2.71.
2. y_2 = 0.25 × (√(1 + 8 × 2.71²) − 1).
3. h_L = (y_2 − y_1)³/(4$y_1$$y_2$).

Respuesta: Fr = 2.71; y_2 = 1.68 m; h_L = 0.491 m.

Ejemplo 10.3 Halla la profundidad crítica para q = 2 m²/s.

1. y_c = (4/9.81)^(1/3).

Respuesta: y_c = 0.742 m.

Problemas de práctica

Resuelve cada uno primero en papel y luego comprueba.

1. ¿V = 3 m/s a 1 m de profundidad es subcrítico o supercrítico?

   Fr = 0.958, subcrítico.

2. Halla E para y = 1 m, V = 3 m/s.

   1 + 9/19.62 = 1.459 m.

3. ¿Qué profundidad llevaría q = 2 m²/s a V = 1.53 m/s?

   2/1.532 = 1.31 m.

4. ¿Por qué construir un tanque amortiguador bajo una presa?

   Para forzar un resalto que disipe energía.

Ideas erróneas comunes

Mito: El flujo rápido siempre es supercrítico.
En realidad: Compara V con √(gy).

Mito: Un resalto gana energía.
En realidad: Pierde energía.

Mito: La n de Manning es igual en todas partes.
En realidad: Depende de la superficie.

Tarjetas de estudio

Froude

V/√(gy).

Radio hidráulico

A/P.

Energía específica

$y + V^2/2g$.

Profundidad crítica

$(q^2/g)^{(1/3)}$.

Manning

(1/n)R^(2/3)S^(1/2).

Resalto

$y_2/y_1 = ½(\sqrt{(1 + 8Fr^2)} - 1)$.

Cuestionario de autoevaluación

1. El flujo supercrítico es...

Fr < 1

Fr = 1

Fr > 1

Fr = 0

Fr > 1. Rápido, poco profundo.

2. El radio hidráulico es...

A/P

P/A

4A/P

y

A/P. Definición.

3. La energía específica es mínima a...

la profundidad crítica

profundidad cero

la profundidad normal

cualquier profundidad

la profundidad crítica. dE/dy = 0.

4. Un resalto hidráulico...

disipa energía

añade energía

es reversible

acelera el flujo

disipa energía. Mezcla turbulenta.

Repetir este cuestionario

Cómo ayuda esto a salvar el planeta

El DOE describe una central hidroeléctrica de derivación, o de pasada, como una instalación que desvía parte de un río por un canal y/o una tubería forzada, aprovechando el descenso natural del cauce para producir energía, a veces sin presa. Diseñar ese canal es un problema de flujo en canal abierto: la ecuación de Manning lo dimensiona para el caudal y el desnivel fija la altura.

El DOE añade que las descargas de los embalses pueden servir al paso de peces y a la calidad del agua. Los ingenieros usan el número de Froude y los resaltos hidráulicos para dar forma a vertedores y canales que protegen el lecho de los ríos y mantienen caudales seguros para la fauna.

En Saving Planets: Océanos · Observación de la Tierra

Fuentes: U.S. DOE: Types of hydropower plants (https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-plants) · U.S. DOE: How hydropower works (https://www.energy.gov/eere/water/how-hydropower-works)

Recursos de aprendizaje gratuitos

- MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engineering-mechanics-ii-spring-2006/): Apuntes sobre canales abiertos.
- MIT OpenCourseWare 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): Flujos de superficie libre.
- NOAA: Currents tutorial (https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_currents/05conveyor1.html): Tutorial gratuito de la NOAA.
- MIT OpenCourseWare 2.25 Advanced Fluid Mechanics (Fall 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-25-advanced-fluid-mechanics-fall-2013/): Tratamiento más profundo.

☐ **Terminé esta unidad**

Problemas

Estos problemas están dentro de cada unidad. Hazlos en papel y luego abre la respuesta.

1. Propiedades de los fluidos: densidad, viscosidad y tensión superficial
   4 problemas

2. Estática de fluidos, manómetros y flotación
   4 problemas
3. Bernoulli, alturas y la ecuación de la energía
   4 problemas
4. Cantidad de movimiento integral: chorros, álabes, codos y turbinas
   4 problemas
5. Análisis diferencial: continuidad, Navier–Stokes y flujos exactos
   4 problemas
6. Análisis dimensional, semejanza y ensayos con modelos
   4 problemas
7. Flujo en tuberías: fricción, el diagrama de Moody y pérdidas menores
   4 problemas
8. Bombas, turbinas y sistemas de bombeo
   4 problemas
9. Flujo externo: capas límite, arrastre y sustentación
   4 problemas
10. Flujo en canales abiertos: ríos, canales y resaltos hidráulicos
    4 problemas

El laboratorio (Fluid mechanics lab)

El laboratorio es la parte práctica del curso. Aquí es gratuito y solo para practicar, sin créditos.

Cada práctica puede hacerse en una simulación gratuita o con objetos de la cocina y el jardín. Trabaja sobre un fregadero o al aire libre, limpia los derrames de inmediato para evitar resbalones, usa solo agua fría del grifo y mantén el agua lejos de enchufes y aparatos eléctricos.

Referencia de seguridad: OSHA: Walking-working surfaces (slip, trip and fall hazards) (https://www.osha.gov/walking-working-surfaces)

Práctica A: Densidad y flotación pesando

SEMANA 3

Objetivo: Hallar el volumen y la densidad de un objeto a partir de su peso en el aire y su peso aparente en el agua, con el principio de Arquímedes.

$$V = \frac{m_{air} - m_{water}}{\rho_w}, \quad \rho = \frac{m_{air}}{V}$$

```
V=_air-m_waterρ_w,\ \ ρ=_airV
```

Principio de Arquímedes

Procedimiento

1. Explora PhET Buoyancy: cambia la densidad del objeto y la del fluido y observa las fuerzas.
2. En casa: pesa un objeto pequeño y denso (una piedra o una cuchara de metal) en una báscula de cocina.
3. Cuélgalo de un hilo totalmente sumergido en una jarra apoyada en la báscula (tara primero), o usa una báscula colgante de equipaje; anota la masa aparente.
4. Calcula el volumen y la densidad.

Tabla de datos

Magnitud	Valor
Masa en el aire	200 g
Masa aparente en el agua	120 g
Volumen	80 cm³
Densidad	2500 kg/m³

Valores de ejemplo (típicos de piedra o vidrio).

Cálculo de ejemplo

1. V = (200 − 120)/1.00 = 80 cm³.
2. ρ = 200/80 = 2.50 g/cm³ = 2500 kg/m³.

> **Seguridad**
>
> - Limpia los derrames de inmediato.

Alternativa en casa o virtual

- Es una práctica casera.

PhET: Buoyancy (https://phet.colorado.edu/en/simulations/buoyancy) · PhET: Density (https://phet.colorado.edu/en/simulations/density)

Vínculo con el planeta: La NOAA explica que las diferencias de densidad debidas a la temperatura y la salinidad impulsan la cinta transportadora oceánica profunda. NOAA National Ocean Service: Thermohaline circulation (https://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_currents/05conveyor1.html)

☐ **Completé este laboratorio (real o virtual)**

Práctica B: La botella de Torricelli

SEMANA 4

Objetivo: Comprobar la ley de Torricelli midiendo hasta dónde llega un chorro de agua que sale de un agujero en una botella.

$$V = \sqrt{2gh}, \quad x = 2\sqrt{hY}$$

V=2gh,\ \ x=2

Velocidad y alcance del chorro desde la altura Y

Procedimiento

1. Haz un pequeño agujero en el costado de una botella de plástico cerca del fondo; tápalo con cinta.
2. Llena la botella y colócala sobre una caja encima de un fregadero o al aire libre, con el agujero a Y = 0.3 m sobre la superficie de caída.
3. Quita la cinta; cuando el nivel del agua esté a h = 0.2 m sobre el agujero, marca dónde cae el chorro.
4. Compara con la predicción; repite con otras profundidades.

Tabla de datos

Magnitud	Valor
Altura h	0.20 m
Velocidad del chorro	1.98 m/s
Altura de caída Y	0.30 m
Alcance previsto	0.49 m

Valores previstos; los chorros reales caen un poco antes por las pérdidas en el agujero.

Cálculo de ejemplo

1. V = √(2 × 9.81 × 0.2) = 1.98 m/s.
2. x = 2√(0.2 × 0.3) = 0.49 m.

> **Seguridad**
>
> - Hazlo sobre un fregadero o al aire libre; seca el agua para evitar resbalones.
> - Usa una brocheta con cuidado, apuntando lejos de tu mano.

Alternativa en casa o virtual

- Es una práctica casera.

PhET: Fluid Pressure and Flow (https://phet.colorado.edu/en/simulations/fluid-pressure-and-flow) · PhET: Under Pressure (https://phet.colorado.edu/en/simulations/under-pressure)

Vínculo con el planeta: El DOE señala que la producción hidroeléctrica crece con la altura; la velocidad del chorro de la botella crece con √h por la misma razón. U.S. DOE: How hydropower works (https://www.energy.gov/eere/water/how-hydropower-works)

☐ **Completé este laboratorio (real o virtual)**

Práctica C: Medir el caudal y el número de Reynolds

SEMANA 7

Objetivo: Medir el caudal de un grifo o una manguera con una cubeta y un cronómetro, y decidir si el flujo interior es laminar o turbulento.

$$Q = \frac{V_{bucket}}{t}, \quad Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

Q=_buckett,\ \ Re=(ρ VD)/(μ)

Caudal y número de Reynolds

Procedimiento

1. Cronometra cuánto tarda una manguera o un grifo en llenar 10 L.
2. Mide el diámetro interior de la manguera o de la salida del grifo.
3. Calcula Q, la velocidad media y Re.
4. Cierra el grifo hasta que el chorro se vea liso y cristalino, y repite.

Tabla de datos

Magnitud	Valor
10 L en	25 s
Q	0.4 L/s
Diámetro interior de la manguera	16 mm
V	1.99 m/s
Re	31,700

Valores de ejemplo; un Re muy por encima de 4000 indica flujo turbulento dentro de la manguera.

Cálculo de ejemplo

1. V = 0.0004/(π × 0.008²) = 1.99 m/s.
2. Re = 998 × 1.99 × 0.016/1.002 × 10^{-3} = 31,700.

> **Seguridad**
>
> - Cierra el grifo al terminar; cuidado con el suelo resbaladizo.

Alternativa en casa o virtual

- Es una práctica casera.

PhET: Fluid Pressure and Flow (https://phet.colorado.edu/en/simulations/fluid-pressure-and-flow)

Vínculo con el planeta: La EPA sugiere revisar tu medidor de agua durante dos horas sin usar agua; cualquier cambio indica una fuga. U.S. EPA WaterSense: Fix a Leak Week (https://www.epa.gov/watersense/fix-leak-week)

- [ ] **Completé este laboratorio (real o virtual)**

Práctica D: Hoja de cálculo de fricción en tuberías

SEMANA 10

Objetivo: Construir una hoja de cálculo del número de Reynolds, el factor de fricción y la pérdida de carga frente a la velocidad, y ver cómo crecen las pérdidas.

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

`h_L=fL/D(V^2)/(2g)`

Darcy–Weisbach

Procedimiento

1. Toma D = 50 mm, L = 100 m, ε = 0.045 mm, agua a 20 °C.
2. Calcula Re y el f de Haaland para V de 0.5 a 3 m/s.
3. Calcula h_L y grafícalo frente a V.
4. Ajusta h_L ∝ V^n y halla n.

Tabla de datos

V (m/s)	Re	f	h_L (m)
1	49,800	0.0235	2.39
2	99,600	0.0216	8.82
3	149,400	0.0209	19.2

Valores calculados; n sale un poco por debajo de 2 porque f baja lentamente al subir Re.

Cálculo de ejemplo

1. h_L(2 m/s) = 0.0216 × 2000 × 4/19.62 = 8.82 m.
2. Triplicar V multiplica h_L por 19.2/2.39 = 8.0.

> **Seguridad**
>
> - Solo ordenador.

Alternativa en casa o virtual

- Sirve cualquier hoja de cálculo.

MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engineering-mechanics-ii-spring-2006/)

Vínculo con el planeta: El DOE dice que las buenas prácticas en sistemas de bombeo ahorran muchísima energía; menos pérdidas significan bombas más pequeñas. U.S. DOE: Pump systems (https://www.energy.gov/eere/iedo/pump-systems)

- [ ] **Completé este laboratorio (real o virtual)**

Práctica E: Sedimentación de arena en agua

SEMANA 13

Objetivo: Observar cómo se asienta arena fina y gruesa en un vaso alto de agua y comparar con la ley de Stokes.

$$V_s = \frac{(\rho_p - \rho) g D^2}{18 \mu}$$

`V_s=((ρ_p-ρ)gD^2)/(18μ)`

Sedimentación de Stokes

Procedimiento

1. Llena de agua un vaso alto o una botella transparente.
2. Deja caer una pizca de arena fina y cronometra cuánto tardan los granos en bajar 0.2 m.
3. Repite con arena más gruesa.
4. Compara las velocidades con la ley de Stokes y anota cuándo deja de aplicarse.

Tabla de datos

Diámetro del grano	Velocidad de Stokes	Re
50 µm	2.04 mm/s	0.102
100 µm	8.17 mm/s	0.81

Calculado para granos tipo cuarzo (ρ = 2500 kg/m³); los granos más gruesos, con Re por encima de aproximadamente 1, caen más despacio de lo que predice Stokes.

Cálculo de ejemplo

1. V(50 µm) = 1502 × 9.81 × 2.5 × 10^{-9}/(18 × 1.002 × 10^{-3}) = 2.04 mm/s.
2. Duplicar D multiplica la velocidad por 4.

> **Seguridad**
>
> - Usa arena de juego limpia; lávate las manos después.

Alternativa en casa o virtual

- Es una práctica casera.

NASA Glenn: Drag of a sphere (https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/dragsphere.html)

Vínculo con el planeta: El DOE señala que las descargas de los embalses atienden la calidad del agua; la sedimentación decide cómo se llenan los embalses y cómo los ríos arrastran limo. U.S. DOE: Types of hydropower plants (https://www.energy.gov/eere/water/types-hydropower-plants)

- [ ] **Completé este laboratorio (real o virtual)**

Práctica F: Sistema de bombeo y velocidad variable

SEMANA 11

Objetivo: Hallar el punto de operación de una bomba y usar las leyes de afinidad para comparar el estrangulamiento con frenar la bomba.

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3$$

`(P_2)/(P_1)=((N_2)/(N_1))^3`

Ley de afinidad para la potencia

Procedimiento

1. Introduce la curva de la bomba H = 40 − 7000Q² y la curva del sistema H = 10 + 5000Q².
2. Halla el punto de operación y la potencia en el eje.
3. Aplica las leyes de afinidad a 1500 y 1200 rpm al punto de 1800 rpm (0.05 m³/s, 30 m).
4. Compara las potencias necesarias.

Tabla de datos

N (rpm)	Q (m³/s)	H (m)	Relación de potencias
1800	0.050	30.0	1.000
1500	0.0417	20.8	0.579
1200	0.0333	13.3	0.296

Escalado de afinidad ideal; la elevación estática del sistema limita cuánto puede frenarse una bomba real.

Cálculo de ejemplo

1. Q(1200) = 0.05 × 2/3 = 0.0333 m³/s.
2. Relación de potencias = (2/3)³ = 0.296.

> **Seguridad**
>
> - Solo ordenador.

Alternativa en casa o virtual

- Sirve cualquier hoja de cálculo.

U.S. DOE: Pump systems (https://www.energy.gov/eere/iedo/pump-systems)

Vínculo con el planeta: Las herramientas gratuitas PSAT y MEASUR del DOE ayudan a las plantas a encontrar justo estos ahorros en bombas. U.S. DOE: Pump systems (https://www.energy.gov/eere/iedo/pump-systems)

- [ ] **Completé este laboratorio (real o virtual)**

Series de práctica para exámenes

Cronométrate: unos 10 minutos por problema. Luego compara con las soluciones completas.

Ejercicios de práctica para el parcial (unidades 1–5)

1. Halla el esfuerzo cortante en agua entre placas separadas 0.5 mm cuando una se mueve a 1 m/s.
    1. $\tau = 1.002 \times 10^{-3} \times 1/0.0005$.

    Respuesta: 2.00 Pa.
2. Halla la presión manométrica a 25 m de profundidad en agua de mar (1025 kg/m³).
    1. $1025 \times 9.81 \times 25$.

    Respuesta: 251.4 kPa.
3. Halla la potencia de una central hidroeléctrica con Q = 20 m³/s, H = 40 m, $\eta = 0.88$ ($\rho = 1000$).
    1. $0.88 \times 1000 \times 9.81 \times 20 \times 40$.

    Respuesta: 6.91 MW.
4. Un chorro de agua de 0.01 m³/s a 25 m/s es desviado 180° por un álabe fijo. ¿Fuerza?
    1. $2\rho QV = 2 \times 1000 \times 0.01 \times 25$.

    Respuesta: 500 N.
5. Halla el Q laminar en un tubo de 2 mm de radio, $\Delta p/L = 200$ Pa/m, agua.
    1. $\pi \times 0.002^4 \times 200/(8 \times 1.002 \times 10^{-3})$.

    Respuesta: 1.25×10^{-6} m³/s.

Serie de práctica final (todas las unidades)

1. Un modelo de barco a escala 1:25 se escala por Froude. Velocidad real 10 m/s. ¿Velocidad del modelo?
    1. $10/5$.

Respuesta: 2 m/s.

2. Halla h_L en 200 m de tubería de 0.1 m con f = 0.02 a 1.5 m/s.

    1. 0.02 × 2000 × 2.25/19.62.

    Respuesta: 4.59 m.

3. Una bomba a 1200 rpm da 25 m de altura. ¿Altura a 1500 rpm?

    1. 25 × (1.25)².

    Respuesta: 39.1 m.

4. Halla la potencia del viento a través de un rotor de 80 m a 8 m/s (ρ = 1.225).

    1. ½ × 1.225 × π × 40² × 512.

    Respuesta: 1.58 MW.

5. Halla Fr para un flujo de 4 m/s a 0.4 m de profundidad.

    1. 4/√(9.81 × 0.4).

    Respuesta: 2.02, supercrítico.

6. Halla y_c para q = 3 m²/s.

    1. (9/9.81)^(1/3).

    Respuesta: 0.972 m.

Hoja de fórmulas

$$\tau = \mu\, du/dy,\ \nu = \mu/\rho$$

$$p = p_0 + \rho g h,\ F = \rho g h_c A,\ F_B = \rho g V$$

$$Q = AV,\ p/\rho g + V^2/2g + z = \text{const}$$

$$P = \eta \rho g Q H,\ V = \sqrt{2gh}$$

$$\sum F = \sum \dot{m} V_{out} - \sum \dot{m} V_{in},\ F = \rho Q V(1 - \cos$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0,\ Q = \pi R^4 \Delta p/(8\mu L)$$

$$Re = \rho V L/\mu,\ Fr = V/\sqrt{gL}$$

$$h_L = f(L/D)V^2/2g,\ f_{lam} = 64/Re$$

$$h_m = KV^2/2g,\ D_h = 4A/P$$

$$P = \rho g Q h/\eta,\ Q \propto N,\ H \propto N^2,\ P \propto N^3$$

$$F_D = C_D \tfrac{1}{2}\rho V^2 A,\ P_{wind} = \tfrac{1}{2}\rho A V^3$$

$$V = (1/n) R_h^{2/3} S^{1/2},\ y_c = (q^2/g)^{1/3}$$

$$y_2/y_1 = \tfrac{1}{2}(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1)$$

Constantes

Constante	Valor
Agua a 20 °C (valores de libro de texto)	ρ = 998 kg/m³, μ = 1.002 × 10⁻³ kg/(m·s), ν = 1.004 × 10⁻⁶ m²/s, tensión superficial σ = 0.0728 N/m
Aire a 15 °C (valores de libro de texto)	ρ = 1.225 kg/m³, μ = 1.789 × 10⁻⁵ kg/(m·s)
Agua de mar y hielo (valores de libro de texto)	ρ_sea = 1025 kg/m³, ρ_ice = 917 kg/m³
Mercurio (valor de libro de texto)	ρ = 13,600 kg/m³
La gravedad	g = 9.81 m/s²
1 galón estadounidense	3.785 L

Fuente: NIST Guide to the SI, Appendix B.9: conversion factors (https://www.nist.gov/pml/special-publication-811/nist-guide-si-appendix-b-conversion-factors/nist-guide-si-appendix-b9)

Textos y simulaciones gratuitos

Usa estas clases, secciones de libros y simulaciones gratuitas junto con el curso.

- MIT OpenCourseWare 2.06 Fluid Dynamics (Spring 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-06-fluid-dynamics-spring-2013/): Apuntes y problemas gratuitos del MIT.
- MIT OpenCourseWare 1.060 Engineering Mechanics II (Spring 2006) (https://ocw.mit.edu/courses/1-060-engineering-mechanics-ii-spring-2006/): Curso gratuito del MIT de fluidos para ingeniería civil.
- MIT OpenCourseWare 2.25 Advanced Fluid Mechanics (Fall 2013) (https://ocw.mit.edu/courses/2-25-advanced-fluid-mechanics-fall-2013/): Tratamiento más profundo del MIT.
- OpenStax University Physics Volume 1, Chapter 14: Fluid mechanics (https://openstax.org/books/university-physics-volume-1/pages/14-1-fluids-density-and-pressure): Capítulo de libro gratuito.
- PhET: Fluid Pressure and Flow (https://phet.colorado.edu/en/simulations/fluid-pressure-and-flow): Presión y flujo de forma interactiva.
- PhET: Buoyancy (https://phet.colorado.edu/en/simulations/buoyancy): La flotación de forma interactiva.

Glosario

Capa límite

Capa delgada junto a una pared donde importa la viscosidad.

Flotación
Fuerza hacia arriba igual al peso del fluido desplazado.

Cavitación
Burbujas de vapor que se forman donde la presión cae a la presión de vapor.

Continuidad
Conservación de la masa en un flujo.

Coeficiente de arrastre
Arrastre dividido entre $\frac{1}{2}\rho V^2 A$.

Número de Froude
$V/\sqrt{(gL)}$, inercia entre gravedad.

Altura
Energía por unidad de peso de fluido, en metros.

Pérdida de carga
Energía mecánica perdida por fricción, por unidad de peso.

Resalto hidráulico
Cambio brusco de flujo supercrítico a subcrítico.

Radio hidráulico
Área de flujo entre perímetro mojado.

Flujo laminar
Flujo suave, en capas, a bajo número de Reynolds.

Manómetro
Tubo con líquido para medir diferencias de presión.

Ecuaciones de Navier–Stokes
Ecuaciones de cantidad de movimiento de un fluido viscoso.

Punto de operación
Donde la curva de la bomba se cruza con la curva del sistema.

Número de Reynolds
$\rho VL/\mu$, inercia entre fuerzas viscosas.

Densidad relativa
Densidad relativa al agua.

Flujo de Stokes
Flujo reptante a Re mucho menor que 1.

Tensión superficial
Fuerza por unidad de longitud a lo largo de una superficie líquida.

Flujo turbulento
Flujo caótico y de mezcla a alto número de Reynolds.

Viscosidad
Resistencia de un fluido a la cizalla.

Rúbrica de autoevaluación

No se otorga nota ni crédito. Úsala para valorar con honestidad dónde estás en cada unidad.

Nivel	Cómo se ve
4 · Dominio	Dibuja volúmenes de control, elige la ley correcta (hidrostática, Bernoulli, energía, cantidad de movimiento, Navier–Stokes), comprueba Re y Fr, mantiene las unidades en orden y hace las prácticas con seguridad.
3 · Competente	Resuelve los problemas de práctica con errores ocasionales de unidades o signos.
2 · En desarrollo	Sigue los ejemplos resueltos pero aplica Bernoulli a través de bombas o ignora las pérdidas.
1 · Inicial	Sustituye números en fórmulas sin un esquema; necesita repasar la unidad.

Ponderación sugerida si quieres una nota

Parte	Peso
Problemas de práctica	20%
Prácticas	25%
Serie de práctica de mitad de curso	25%
Serie de práctica final	30%

Apunta al nivel 3 o superior en cada unidad antes de pasar al siguiente curso.

Cursos relacionados

- Termodinámica ENGR 320
- Actuaciones de aeronaves AERO 320
- Aerodinámica I AERO 310
- Todos los cursos