

Operaciones Unitarias 1

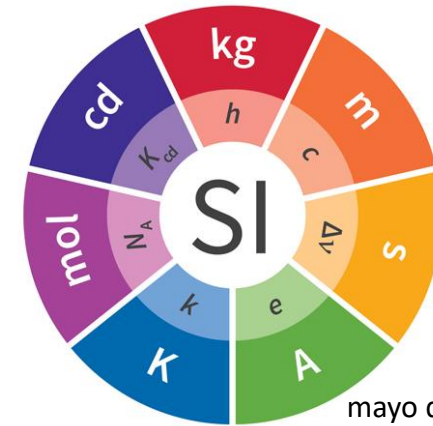
Caracterización de sistemas fluidos

Caracterización de sistemas fluidos Sistema de unidades Internacional (SI)

En la actualidad son de uso común dos sistemas: el sistema inglés, el cual también se conoce como United States Customary System (USCS, sistema de uso común en Estados Unidos), y el sistema métrico SI (por Le Systè \grave{m} e International d' Unités), conocido también como Sistema Internacional.

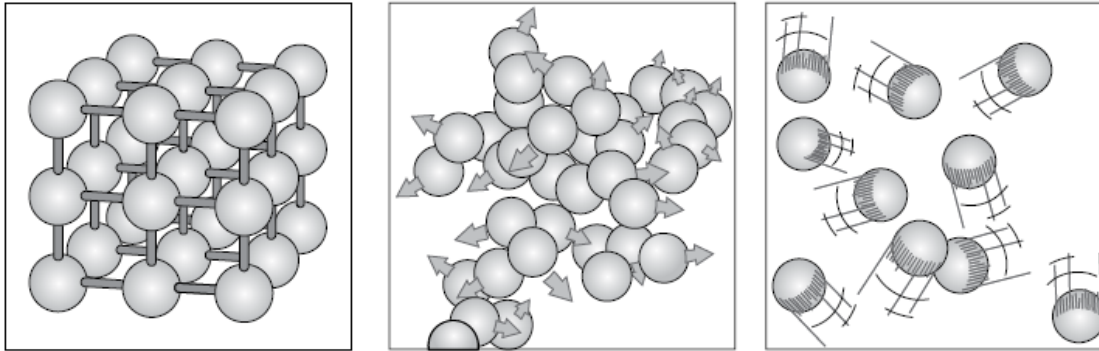
Este último cubre todo el campo de la ciencia y la ingeniería. Es suficiente un subconjunto de unidades SI que comprendan la química, la gravedad, la mecánica y la termodinámica.

Tres de sus unidades fundamentales son la longitud (m), masa (kg) y tiempo (s). A diferencia del otro sistema (y de los mixtos) no incorpora la unidad fundamental de fuerza, por lo que no es necesario el factor de conversión g_c .



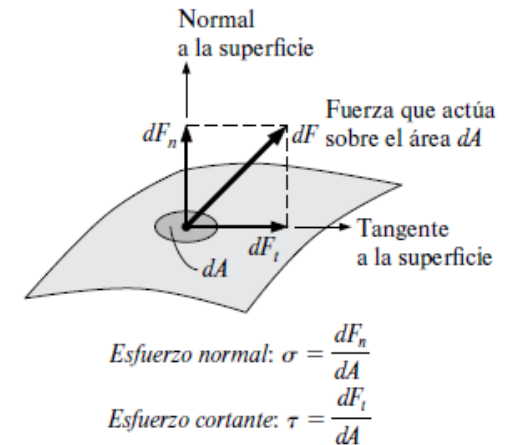
Dimensión	Unidad
Longitud	metro (m)
Masa	kilogramo (kg)
Tiempo	segundo (s)
Temperatura	kelvin (K)
Corriente eléctrica	ampere (A)
Cantidad de luz	candela (cd)
Cantidad de materia	mole (mol)

Caracterización de sistemas fluidos definición de fluido



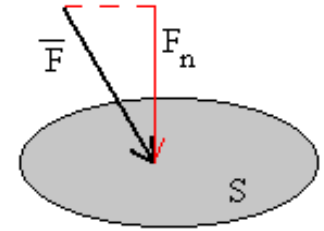
Fluido: una sustancia en fase líquida o gaseosa. En un sentido estricto, se puede considerar un fluido como un conjunto de moléculas distribuidas al azar, que se mantienen unidas a través de fuerzas internas relativamente débiles. Estas fuerzas de cohesión habilitan la formación de superficies de interfase

Un modo de diferenciar entre un sólido y un fluido es con base a la capacidad de la sustancia para oponer resistencia a un esfuerzo cortante (o tangencial) aplicado que tienda a cambiar su forma. Un sólido puede oponer resistencia a un esfuerzo cortante aplicado por medio de la deformación. Un fluido se deforma de manera continua bajo la influencia del esfuerzo cortante, sin importar lo pequeño que sea. En los sólidos, el esfuerzo es proporcional a la deformación, pero en los fluidos el esfuerzo es proporcional al cambio o razón de deformación.



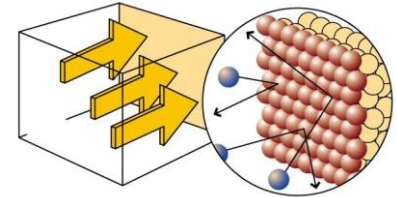
Caracterización de sistemas fluidos Presión

Fuerza normal ejercida por un fluido por unidad de área. Se habla de presión solo cuando se trata de un gas o un líquido. En el caso de sólidos el concepto adecuado es esfuerzo normal.



$$P = \frac{F_N}{S} \left[\frac{N}{m^2} \right] = \left[\frac{kg}{m \cdot s^2} \right] = [Pa]$$

En una bandeja de 1 m x 1 m, 102 gm de agua ejercen una presión de 1 Pa



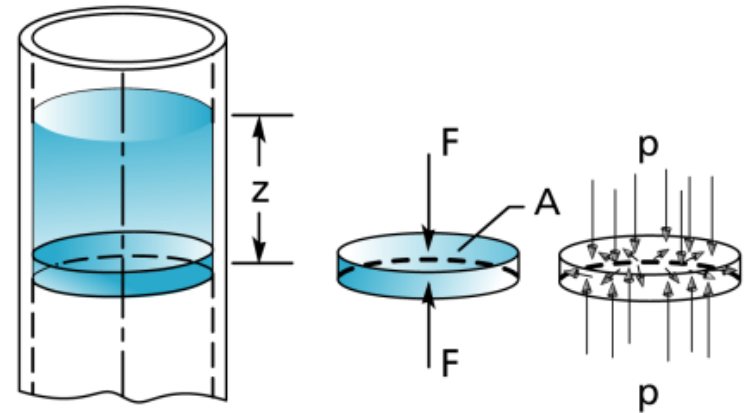
$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 0.1 \text{ MPa} = 100 \text{ kPa}$$

$$1 \text{ atm} = 101\,325 \text{ Pa} = 101.325 \text{ kPa} = 1.01325 \text{ bars}$$

$$1 \text{ kgf/cm}^2 = 9.807 \text{ N/cm}^2 = 9.807 \times 10^4 \text{ N/m}^2 = 9.807 \times 10^4 \text{ Pa}$$

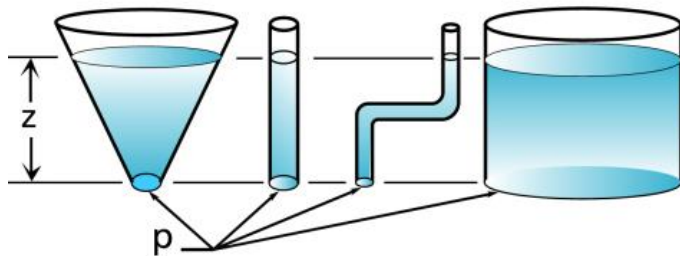
$$= 0.9807 \text{ bar}$$

$$= 0.9679 \text{ atm}$$



$$P = \frac{F}{A} = \rho g z \quad \text{presión}$$

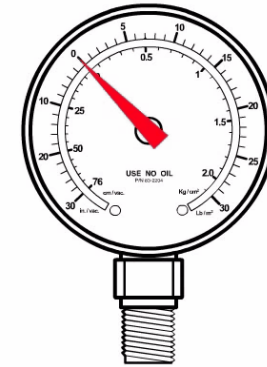
$$P = \frac{P}{\rho g} = z \quad \text{Carga o altura hidrostática}$$



Caracterización de sistemas fluidos Presión

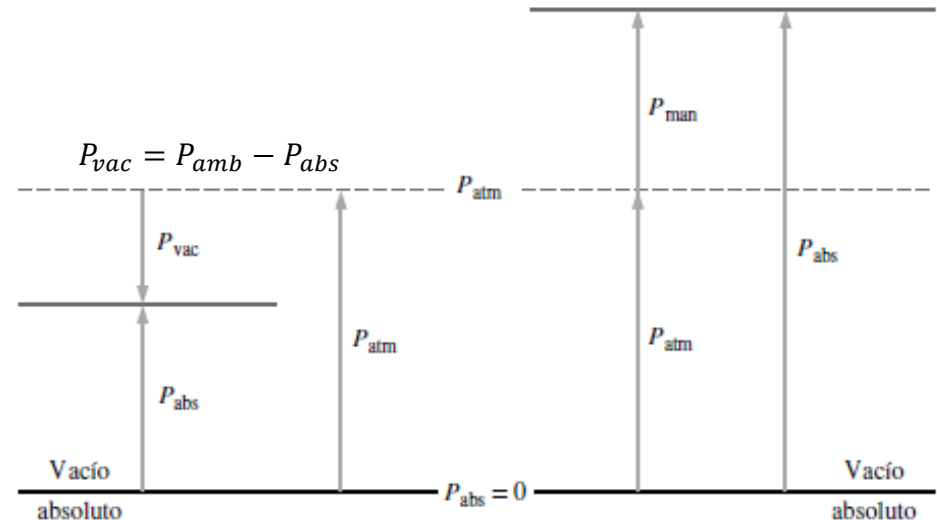
La presión real que se encuentra en una posición dada se llama presión absoluta, P_{abs} , y se mide en relación con el vacío absoluto, es decir ausencia total de colisiones (es decir, presión cero absoluta).

La mayoría de los instrumentos para medir la presión se calibran para que den una lectura de cero en la atmósfera, de modo que indican la diferencia entre la presión absoluta y la presión atmosférica local P_{amb} . Esta diferencia se llama presión manométrica. La P_{man} puede ser positiva o negativa; las presiones por abajo de la atmosférica se conocen como presiones de vacío; los vacuómetros indican la diferencia entre la presión atmosférica y la absoluta.



InstrumentationTools.com

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



Presion barométrica $P_{bar} (msnm) := 103125 \cdot Pa \cdot \exp\left(\frac{-1.1458 \cdot 10^{-4} \cdot msnm}{m}\right)$

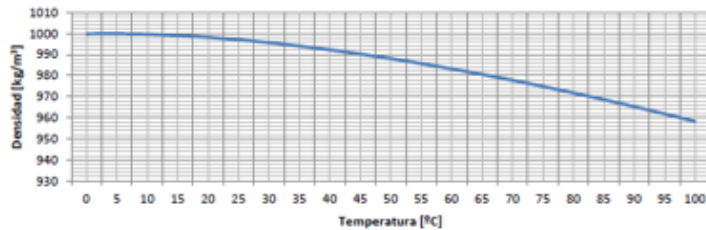
Caracterización de sistemas fluidos densidad, gravedad específica, peso específico

La densidad se define como $\rho = \frac{m}{V} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$. Su recíproco es el volumen específico; en general, $\rho = f(P, T, comp)$;

líquidos y sólidos son incomprensibles $\rho = f(T, comp)$

H₂O (l) pura correlación
$$\rho_w(T) := \frac{999.83952 + 16.945176 \cdot (T) - 7.9870401 \cdot 10^{-3} \cdot (T)^2 - 46.170461 \cdot 10^{-6} \cdot (T)^3 + 105.56302 \cdot 10^{-9} \cdot (T)^4 - 280.54253 \cdot 10^{-12} \cdot (T)^5}{1 + 16.879850 \cdot 10^{-3} \cdot (T)} \cdot \frac{kg}{m^3}$$

Correlación densidad - temperatura



La gravedad específica o densidad relativa se define como $GE = \frac{\rho}{\rho_{H_2O, 4^\circ C}} []$. En unidades SI, el valor numérico de la gravedad específica de una sustancia es exactamente igual a su densidad en $[g \cdot cm^{-3}]$ o $[kg \cdot L^{-1}]$ (o 0,001 multiplicado por la densidad en $[kg \cdot m^{-3}]$) ya que la densidad del agua a 4 °C es 1 $[g \cdot cm^{-3}]$.

El peso específico es el peso de una unidad de volumen de una sustancia o densidad de peso, $\gamma_s = \rho g \left[\frac{N}{m^3} \right]$; g es la

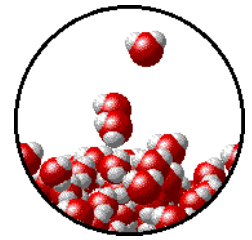
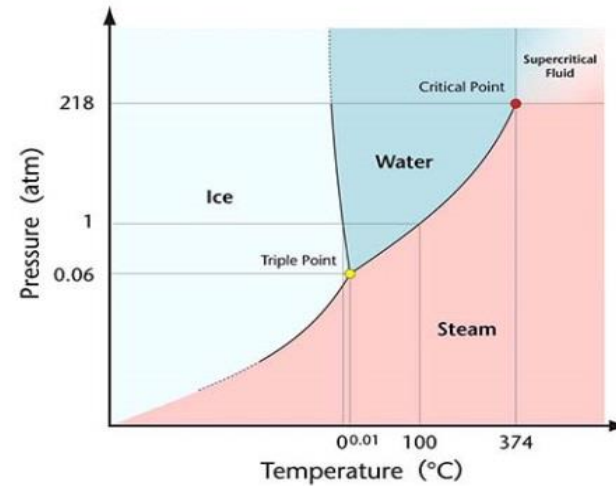
aceleración gravitacional $g = 9,80665 \left[\frac{m}{s^2} \right]$

Caracterización de sistemas fluidos presión de vapor

A una presión determinada, la temperatura a la cual una sustancia **pura** cambia de la fase vapor a una fase condensada (o viceversa) se conoce como temperatura de saturación T^{sat} . De manera semejante, a una temperatura dada, la presión a la cual una sustancia **pura** cambia de la fase vapor a una fase condensada (o viceversa) se llama presión de saturación P^{sat}

La presión de vapor P^v de una sustancia pura se define como la presión ejercida por su vapor en equilibrio de fase con su líquido (o sólido) a una temperatura dada. P^v es una propiedad de la sustancia pura y es idéntica a la presión de saturación P^{sat} ($P^v \equiv P^{sat}$). Se debe tener cuidado en no confundir la presión de vapor con la presión parcial. La presión parcial se define como la presión de un gas o vapor en una mezcla con otros gases

$H_2O(l)$ pura correlación $P^v = f(T \text{ } 0^\circ C - 100^\circ C) = 0,61121 \exp \left[\left(18,678 - \frac{T}{234,5} \right) \left(\frac{T}{257,14+T} \right) \right] [kPa]$ ecuación de Buck

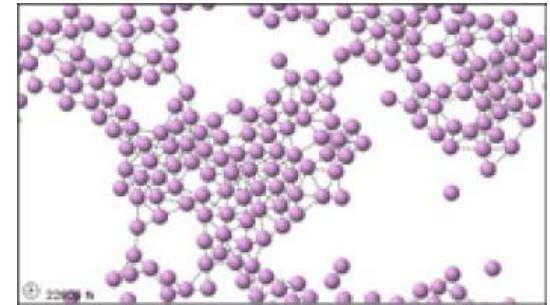
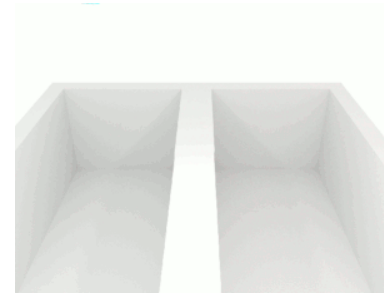
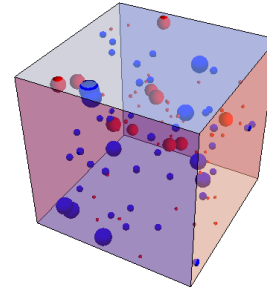


Presión de saturación (o de vapor) del agua a varias temperaturas

Temperatura $T, ^\circ C$	Presión de saturación P_{sat}, kPa
-10	0.260
-5	0.403
0	0.611
5	0.872
10	1.23
15	1.71
20	2.34
25	3.17
30	4.25
40	7.38
50	12.35
100	101.3 (1 atm)
150	475.8
200	1 554
250	3 973
300	8 581

Caracterización de sistemas fluidos viscosidad

- Es una medida de la resistencia del fluido a la deformación por cizallamiento. Está asociada a su resistencia interna a moverse o fluir.
- Esta resistencia es causada por las fuerzas de cohesión entre las moléculas, en los líquidos, y por las colisiones moleculares en los gases. Estas interacciones originan cambios de momento o cantidad de movimiento transferible a través del fluido. Estos cambios se traducen en aceleraciones o desaceleraciones que originan esfuerzos cortantes o tangenciales (Fuerza por unidad de área; 2da Ley de Newton: $F = ma$). Las transferencias de momento no elásticas generan efectos irreversibles o disipativos o de fricción (disipación de energía como calor).
- La viscosidad es la propiedad que relaciona la magnitud y dirección del esfuerzo cortante creado, con el cambio de la velocidad respecto a la distancia perpendicular al área de transferencia del momento o cantidad de movimiento.
- Por lo tanto, está asociada a los fenómenos que ocurren en la interacción sólido – fluido, que crea la condición límite de no deslizamiento .



<https://youtu.be/VvDJyhYSJv8>

Concepto de viscosidad

Caracterización de sistemas fluidos viscosidad; fenómeno de transporte

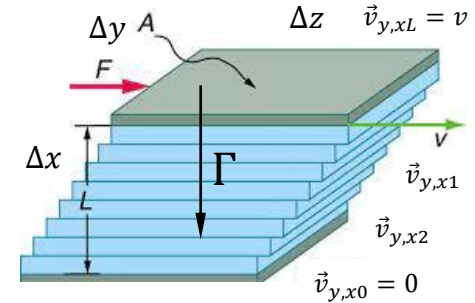
Transporte de una propiedad (transporte molecular unidimensional)

Γ : propiedad por unidad de volumen, [propiedad.m⁻³] (concentración de la propiedad)

$\frac{d\Gamma}{dx}$: tasa de cambio de la propiedad en la dirección de transferencia

Ψ : flujo de la propiedad por unidad de área transversal y tiempo, [propiedad.m⁻².s⁻¹]

$$\Psi = -k \frac{d\Gamma}{dx}$$



$$\Psi = \frac{1}{A} \frac{d(m\vec{v}_y)}{d\theta} \left[\frac{1}{m^2} \right] [kg] \left[\frac{m}{s} \right] \left[\frac{1}{s} \right] = \left[\frac{1}{m^2} \right] \left[\frac{N.s}{s} \right] = \left[\frac{N}{m^2} \right] \text{ donde } A \text{ es el área de flujo de la propiedad } (\Delta y \Delta z) \text{ y } \theta \text{ es el tiempo}$$

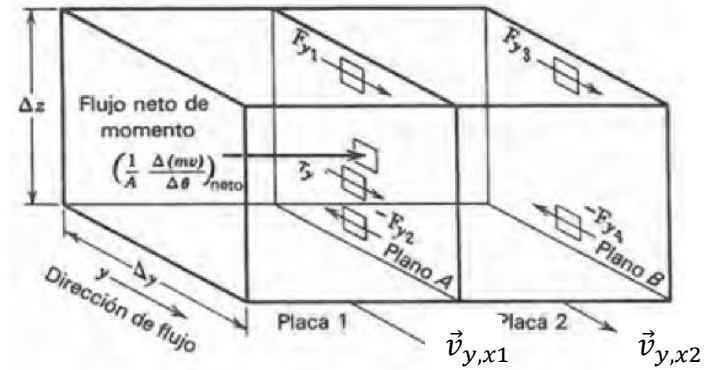
$$\Gamma = \frac{m\vec{v}_y}{\Delta y \Delta z l} = \frac{m\vec{v}_y}{V} = \rho \vec{v}_y \left[\frac{kg}{m^3} \right] \left[\frac{m}{s} \right] = \left[kg \frac{m}{s} \right] \left[\frac{1}{m^3} \right] \text{ donde } m \text{ y } V \text{ son la masa y volumen de cada placa; } \rho \left[\frac{kg}{m^3} \right] \text{ la densidad del fluido}$$

$$\Psi = -k \frac{d\Gamma}{dx} = \frac{1}{A} \frac{d(m\vec{v}_y)}{d\theta} = -v \frac{d(\rho \vec{v}_y)}{dx} \quad \left[\frac{1}{m^2} \right] \left[\frac{N.s}{s} \right] = \left[\frac{m^2}{s} \right] \left[\frac{kg}{m^3} \right] \left[\frac{m}{s} \right] \left[\frac{1}{m} \right]$$

$$\frac{1}{A} \frac{d(m\vec{v}_y)}{d\theta} = -v \frac{d(\rho \vec{v}_y)}{dx} = \frac{\vec{F}_y}{A} \Rightarrow \boxed{\vec{\tau}_{yx} = -v \frac{d(\rho \vec{v}_y)}{dx}}$$

$v \left[\frac{m^2}{s} \right]$ difusividad de la cantidad de movimiento: viscosidad cinemática 1

$$\text{stoke} = \left[\frac{cm^2}{s} \right] = 1 \times 10^{-4} \left[\frac{m^2}{s} \right].$$



dirección de transferencia de la propiedad Γ x \rightarrow

El cambio del momento con el tiempo está asociada a fuerzas de aceleración o desaceleración $\vec{F}_y = \frac{d(m\vec{v}_y)}{d\theta}$ que se manifiestan en el plano frontera entre dos láminas (esfuerzo cortante). El esfuerzo cortante por unidad de área $\frac{\vec{F}_y}{A} = \vec{\tau}_{yx}$ es la tensión cortante

$$\vec{\tau}_{yx} = -v \frac{d(\rho \vec{v}_y)}{dx} = -v\rho \frac{d(\vec{v}_y)}{dx} \Rightarrow \boxed{\vec{\tau}_{yx} = -\mu \frac{d(\vec{v}_y)}{dx}} \quad v = \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{m^2}{s} \right]; \text{ otra unidad de la viscosidad cinemática es}$$

$$\mu \left[\frac{m^2}{s} \right] \left[\frac{kg}{m^3} \right] = \left[\frac{kg}{m.s} \right] \text{ viscosidad absoluta}$$

Caracterización de sistemas fluidos viscosidad, comportamiento newtoniano

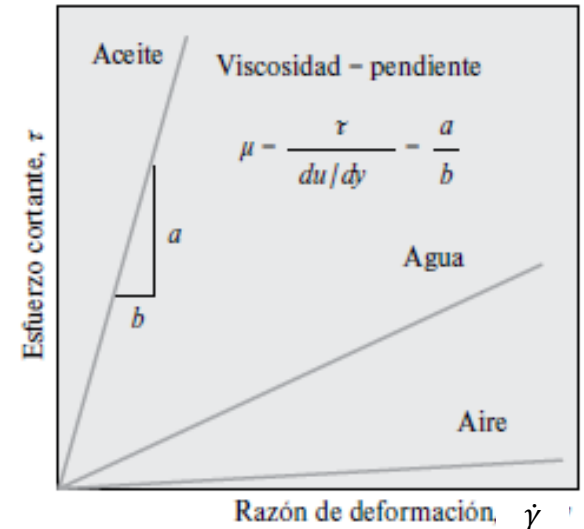
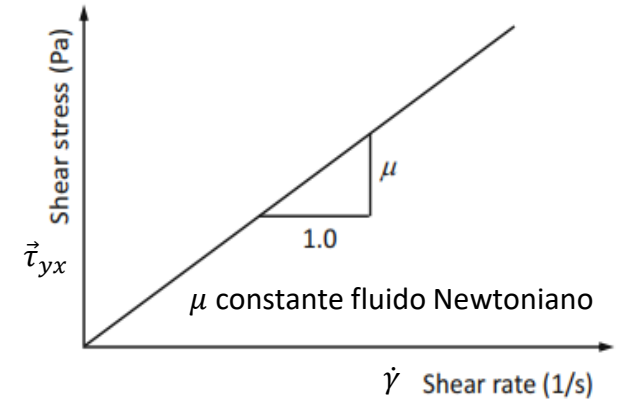
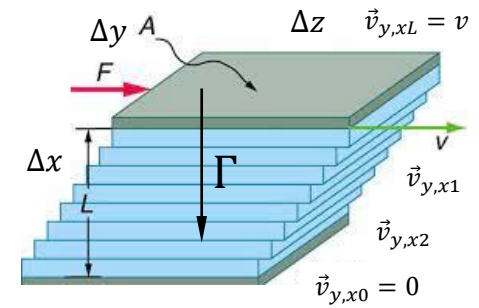
$$\tau_{yx} = -\mu \frac{d(\vec{v}_y)}{dx} \quad \tau_{yx} = \mu \frac{d(\vec{v}_y)}{dx} = \mu \dot{\gamma}; \quad \frac{N}{m^2} = \mu \left[\frac{m}{s} \frac{1}{m} \right] \rightarrow Pa = [Pa \cdot s] \left[\frac{1}{s} \right]$$

La tensión cortante $\vec{\tau}_{yx}$ ejercida en la dirección \vec{y} sobre una porción de fluido que se encuentra en una posición \vec{x} es proporcional al gradiente en \vec{x} de \vec{v}_y : ($\dot{\gamma} = \frac{d(\vec{v}_y)}{dx}$), razón de deformación (*shear rate*). La relación de proporcionalidad es μ viscosidad absoluta o viscosidad dinámica

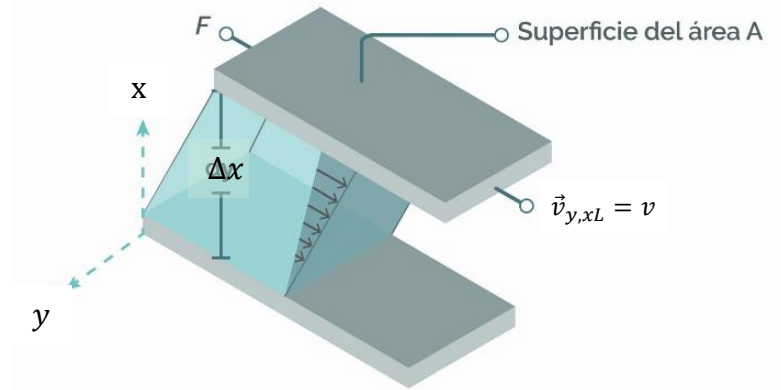
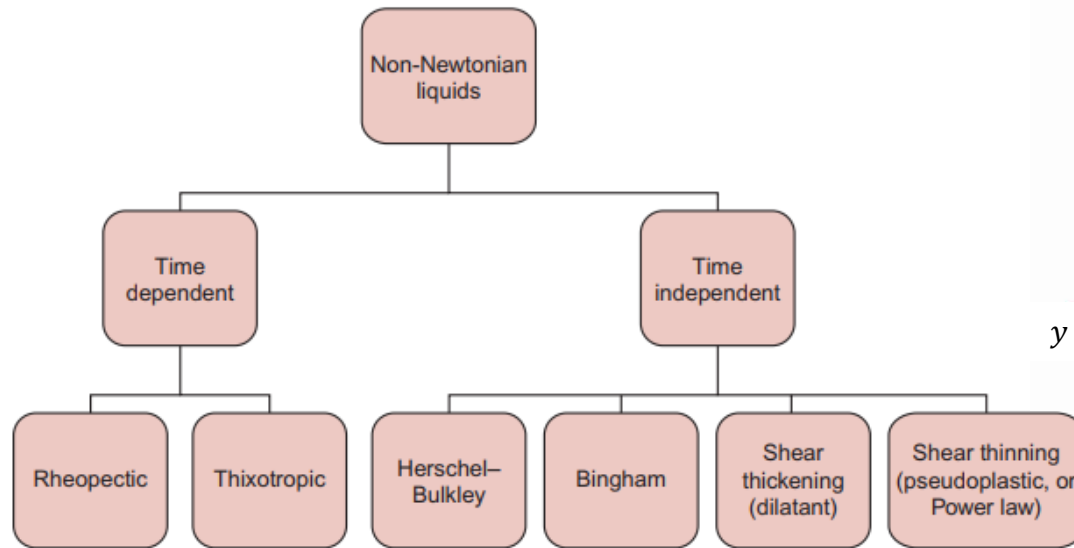
Ley de Newton de la viscosidad: aplicable a fluidos con μ constante (independientes de $\dot{\gamma}$ y del tiempo de aplicación de la tensión cortante) a una dada T. La razón o tasa de deformación $\dot{\gamma}$ es la fuerza impulsora para el transporte de la cantidad de movimiento.

$$\mu \left[\frac{kg}{m \cdot s} \right] \equiv \left[\frac{N \cdot s}{m^2} \right] \equiv [Pa \cdot s]; \text{ unidad utilizada poise} \equiv 0,1 [Pa \cdot s] \text{ y el centipoise} \equiv 0,01 \text{ poise}$$

$$\equiv 1 \times 10^{-3} \left[\frac{kg}{m \cdot s} \right]$$



Caracterización de sistemas fluidos viscosidad, comportamiento **no newtoniano**



$$\vec{\tau}_{yx} = \mu \dot{\gamma} \rightarrow \vec{\tau}_{yx} = \phi(\dot{\gamma}, \theta)$$

↑ fluido newtoniano ↓ fluido no newtoniano

Se clasifican como independientes del tiempo y dependientes del tiempo. Esta clasificación se refiere al comportamiento de la viscosidad:

- que cambia con la tasa de deformación $\dot{\gamma}$ (cambios en la pendiente η);
- o con $\dot{\gamma}$ y el tiempo de aplicación del esfuerzo cortante.

Caracterización de sistemas fluidos viscosidad, comportamiento **no newtoniano** independientes del tiempo

Responden inmediatamente con un flujo tan pronto como se aplica una pequeña cantidad de esfuerzo cortante.

Cambio con el gradiente de velocidad :

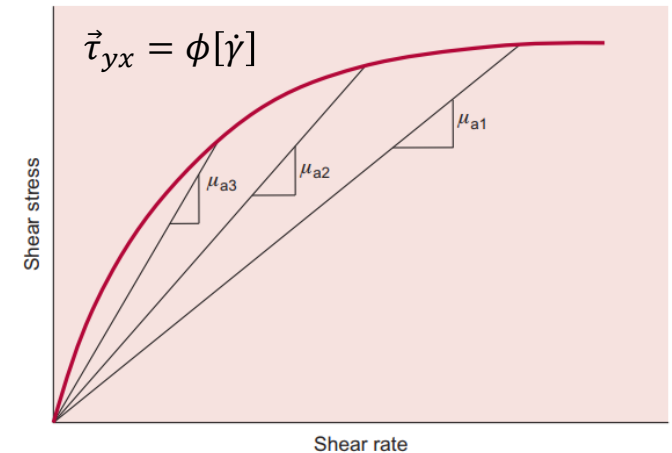
la tensión cortante $\vec{\tau}_{yx}$ es función ϕ **no lineal** de la tasa de deformación

Se define la viscosidad aparente (o efectiva) mediante la relación:

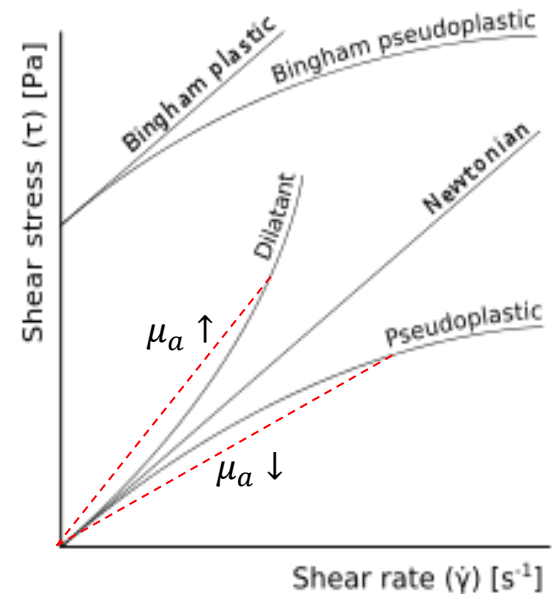
$$\mu_a = \frac{\vec{\tau}_{yx}}{\phi[\dot{\gamma}]} ; \mu_a \text{ es la pendiente de la línea recta que une al origen con cualquier punto sobre la curva de flujo; indica el comportamiento de la tensión cortante con la tasa de deformación}$$

En fluidos no newtonianos es importante establecer a qué $\dot{\gamma}$ se refiere η (o μ_a)

Dos tipos importantes de líquidos no newtonianos independientes del tiempo: fluidos adelgazantes al corte o pseudoplásticos (μ_a disminuye con el incremento de $\dot{\gamma}$) y líquidos espesantes al corte o dilatantes (μ_a aumenta con el incremento de $\dot{\gamma}$).



μ_a depende de la tasa de deformación $\dot{\gamma}$

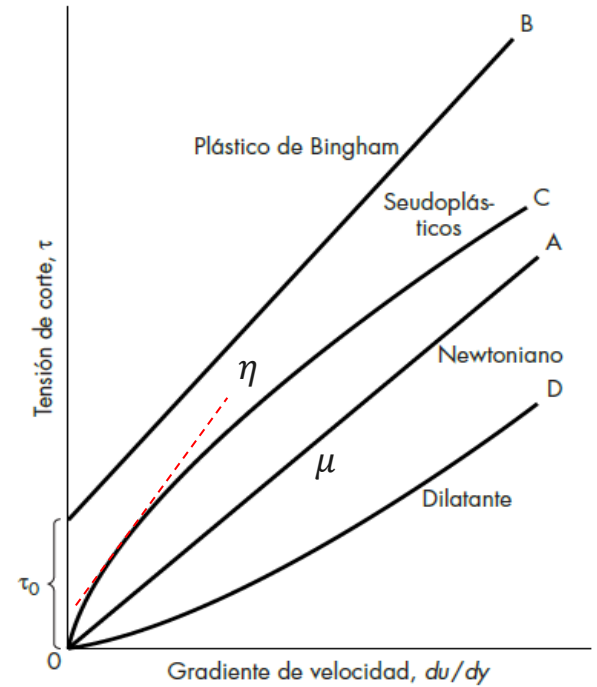


Caracterización de sistemas fluidos viscosidad, comportamiento **no newtoniano** independientes del tiempo

Fluidos No Newtonianos $\vec{\tau}_{yx} = \phi[\dot{\gamma}]$

Pseudoplásticos o adelgazantes al corte (*shear-thinning fluid*): el valor de μ_a disminuye con $\dot{\gamma}$; causa: alineamiento de las estructuras (i.e. macromoléculas en polímeros o partículas en *slurries*) ejemplos: suspensión acuosa de pulpa de papel, leche condensada, mayonesa, mostaza.

Dilatante o espesantes al corte (*shear-thickening fluid*): el valor de μ_a se incrementa con $\dot{\gamma}$; causa: incremento de volumen con $\dot{\gamma}$; ejemplo suspensiones de almidón al 60% (oobleck)

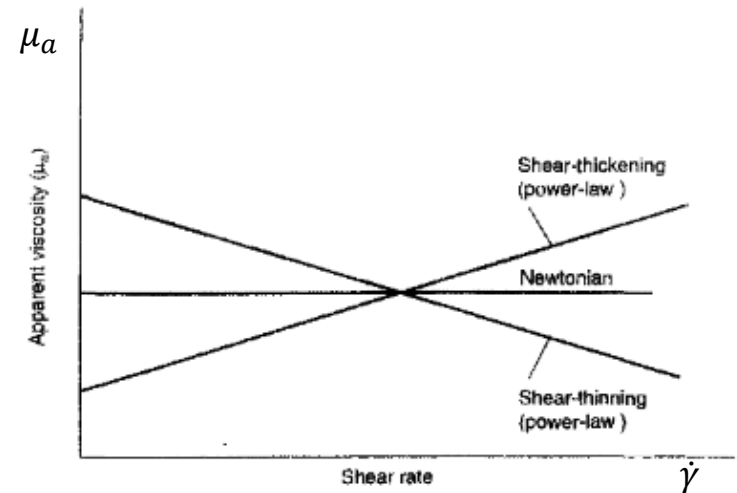


<https://youtu.be/e6VbrjtrGr0>

Como fabricar oobleck

https://youtu.be/2mYHGn_Pd5M

Fluidos No Newtonianos

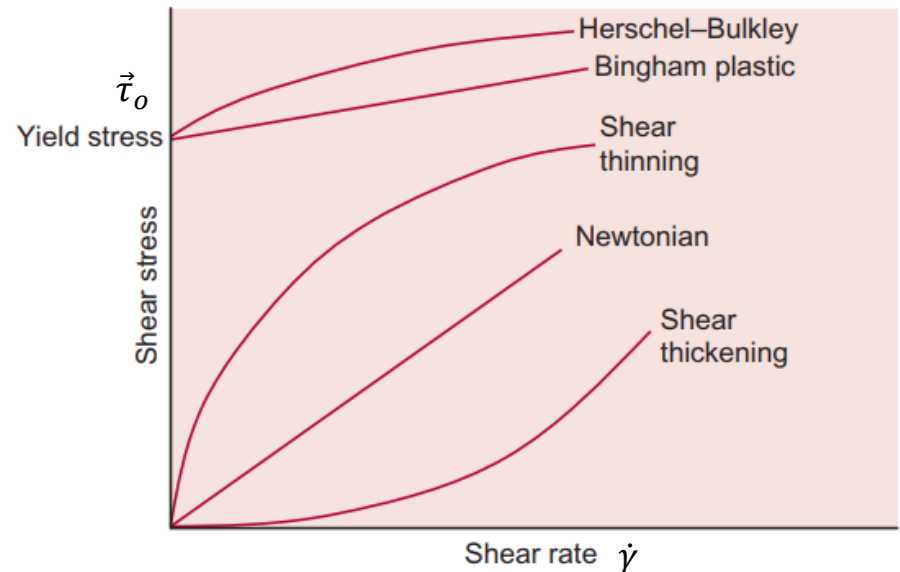


Caracterización de sistemas fluidos viscosidad, comportamiento **no newtoniano** independientes del tiempo

Otra clase importante requiere la aplicación de un valor inicial de $\vec{\tau}_{yx} \equiv \vec{\tau}_0$ antes de cualquier respuesta. Ejemplo: algunos ketchup no fluirán hasta que no se los golpee. Después de la aplicación $\vec{\tau}_0$, la respuesta puede ser similar a la de un líquido newtoniano; en ese caso, se llaman plásticos de Bingham. Por otro lado, si la respuesta es similar a un flujo de adelgazamiento por corte, entonces se llaman fluidos de Herschel Bulkley. Estos fluidos presentan una red intermolecular que resiste la fuerza de cizallamiento de bajo nivel cuando están en reposo. Es solo cuando la tensión aplicada excede las fuerzas que mantienen unida la red que el material comienza a fluir.



Eugene Cook Bingham
1878 -1945; fundador
de la reología



Caracterización de sistemas fluidos viscosidad, comportamiento **no newtoniano** dependientes del tiempo

$$\vec{\tau}_{yx} = \phi[\dot{\gamma}, \theta]$$

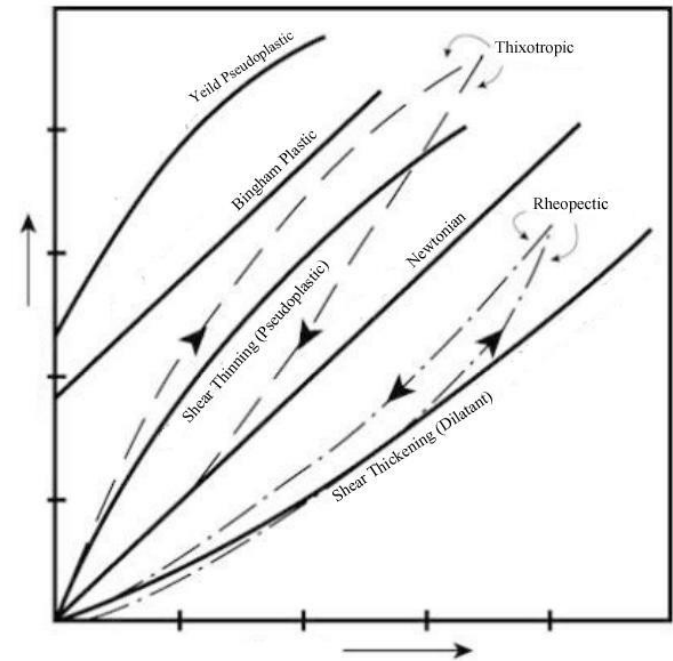
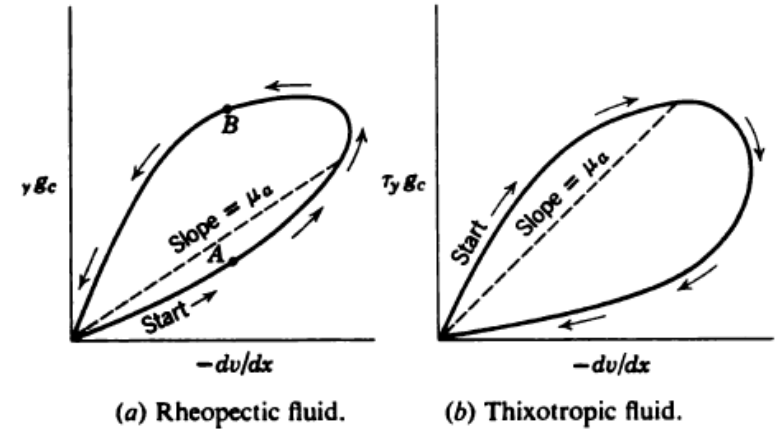
muestran un cambio en la viscosidad aparente con el tiempo de aplicación de $\vec{\tau}_{yx}$

Según el comportamiento de μ_a se clasifican en:

Reopécticos: muestran un *incremento* en la viscosidad aparente durante un tiempo después de que se aplica por primera vez un esfuerzo constante. Las suspensiones de bentonita y algunos soles son reopécticos.

Tixotrópicos: muestran un *decremento* de la viscosidad aparente con el tiempo, bajo un esfuerzo constante. Un ejemplo de comportamiento tixotrópico se encuentra en las pinturas. La salsa de tomate y mayonesa pueden presentar ligeros comportamientos tixotrópicos

En reología, se incorporan los fluidos viscoelásticos: presentan recuperación elástica luego de la deformación



Caracterización de sistemas fluidos viscosidad; modelos $\vec{\tau}_{yx} = \phi[\dot{\gamma}]$

Modelo de Ostwald – de Waele o de ley de potencia (LP) $\vec{\tau} = K(\dot{\gamma})^n$

Modelo de Herschel Bulkley $\vec{\tau} = K(\dot{\gamma})^n + \vec{\tau}_o$



Fluid	K	n	$\vec{\tau}_o$	Typical examples
Herschel–Bulkley	>0	$0 < n < \infty$	>0	minced fish paste, raisin paste
Newtonian	>0	1	0	water, fruit juice, honey, milk, vegetable oil
Shear-thinning (pseudoplastic)	>0	$0 < n < 1$	0	applesauce, banana purée, orange juice concentrate
Shear-thickening	>0	$1 < n < \infty$	0	some types of honey, 40% raw corn starch solution
Bingham plastic	>0	1	>0	toothpaste, tomato paste



K , coeficiente de consistencia; n , índice reológico; $n < 1$ para Pseudoplásticos y $n > 1$ para dilatantes

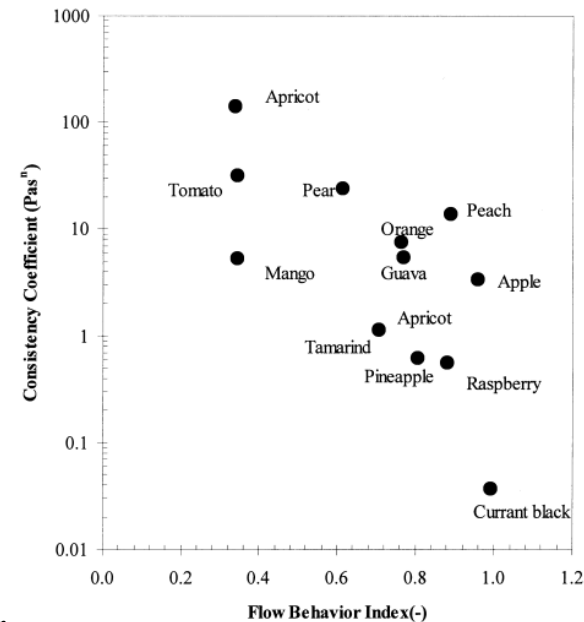
Modelo de Casson $\vec{\tau}^{0,5} = K(\dot{\gamma})^{0,5} + \vec{\tau}_o^{0,5}$



apricot



pinapple



Guava



Raspberry

$$\vec{\tau} = K(\dot{\gamma})^n = [K(\dot{\gamma})^{n-1}]\dot{\gamma} = \mu_a \dot{\gamma}$$

μ_a depende del gradiente de cizallamiento $\dot{\gamma}$

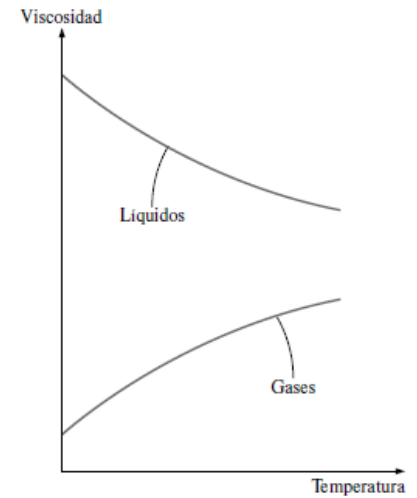
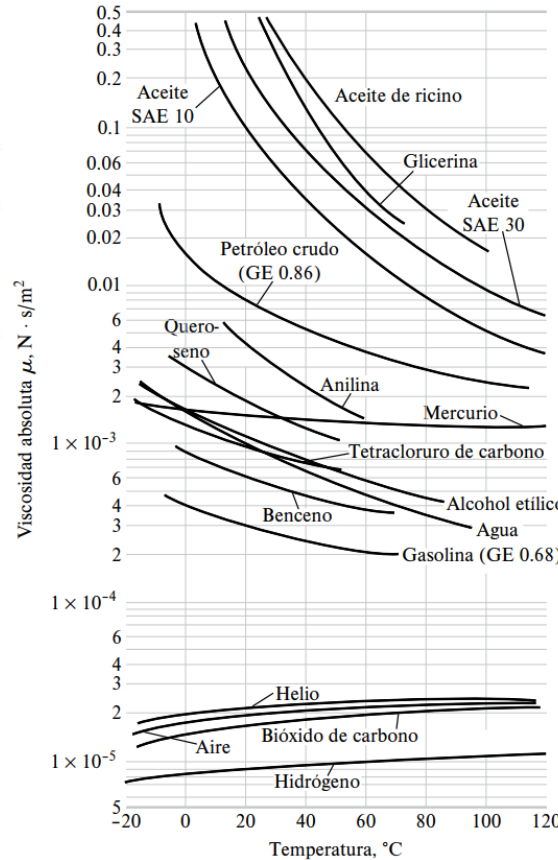
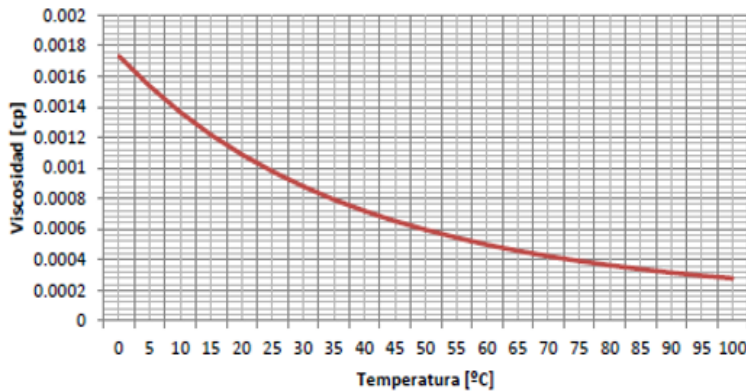
Caracterización de sistemas fluidos viscosidad; correlaciones

Gases $\mu = \frac{aT^{\frac{1}{b}}}{1+\frac{T}{b}}$ (aire: $a = 1,458 \times 10^{-6} \left[\frac{kg}{m \cdot s K^{0,5}} \right]$ $b = 110,4 [K]$)

Líquidos $\mu = a10^{\frac{b}{T-c}}$ (agua: $a = 2,414 \times 10^{-5} \left[\frac{N \cdot s}{m^2} \right]$ $b = 247,8 [K]$ $c = 140 [K]$ $0 < T < 370 [^{\circ}C]$)

Temperatura Del agua (°C)	ν (m ² /s)	Temperatura Del agua (°C)	ν (m ² /s)
5	1.52×10^{-6}	25	0.90×10^{-6}
10	1.31×10^{-6}	30	0.80×10^{-6}
15	1.14×10^{-6}	35	0.73×10^{-6}
20	1.01×10^{-6}	40	0.66×10^{-6}

Correlación viscosidad - temperatura



Viscosidades dinámicas de algunos fluidos a 1 atm y 20 °C (a menos que se indique otra cosa)

Fluido	Viscosidad dinámica μ , kg/m · s
Glicerina:	
-20 °C	134.0
0 °C	10.5
20 °C	1.52
40 °C	0.31
Aceite para motor:	
SAE 10W	0.10
SAE 10W30	0.17
SAE 30	0.29
SAE 50	0.86
Mercurio	0.0015
Alcohol etílico	0.0012
Agua:	
0 °C	0.0018
20 °C	0.0010
100 °C (líquido)	0.00028
100 °C (vapor)	0.000012
Sangre, 37 °C	0.00040
Gasolina	0.00029
Amoniaco	0.00015
Aire	0.000018
Hidrógeno, 0 °C	0.0000088

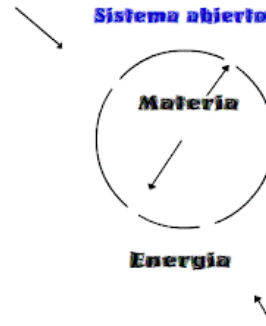
agua $\mu = \exp \left[1,003 - 1,479 \times 10^{-2} \left(\frac{9T}{5} + 32 \right) + 1,892 \times 10^{-5} \left(\frac{9T}{5} + 32 \right)^2 \right]$ $0 < T < 100 [^{\circ}C]$

Operaciones Unitarias 1

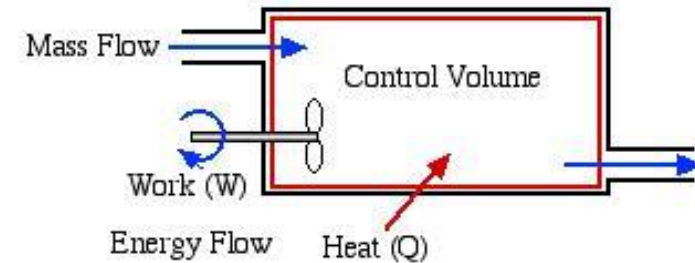
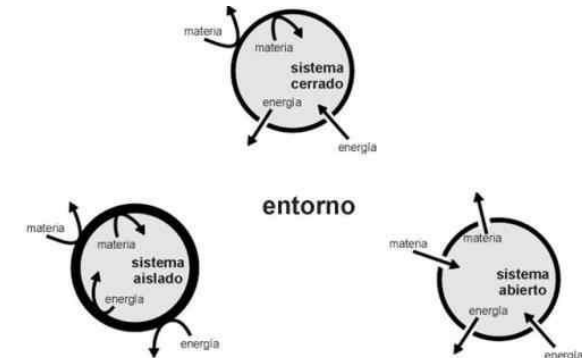
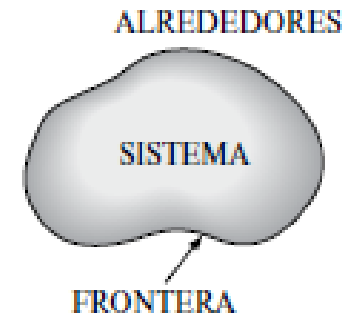
Conceptos termodinámicos asociados al
transporte de fluidos

Conceptos de Termodinámica sistema abierto, volumen y superficie de control

Un sistema termodinámico abierto es aquel que permite a través de sus fronteras, transferencias de masa y de energía (como calor y trabajo), con su entorno

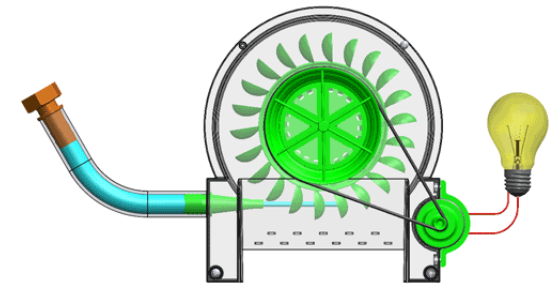
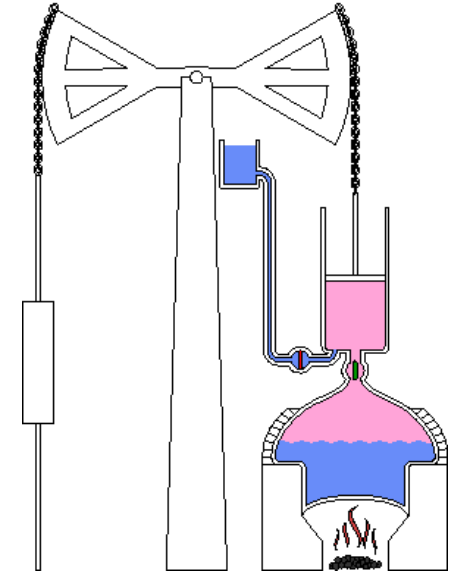


Un volumen de control es una región seleccionada de modo adecuado en el espacio. Encierra un dispositivo de transporte, o de transformación física / química que está asociado con flujo de masa y energía. El flujo por estos sistemas se estudia apropiadamente cuando se selecciona la región que se encuentra dentro de ellos como el volumen de control. Tanto masa como energía pueden cruzar la frontera de un volumen de control. La frontera se constituye en su superficie. Normalmente asociado a un dispositivo o conjunto de dispositivos.



Conceptos de Termodinámica 1er Principio de la Termodinámica en sistemas abiertos

- Energía es el potencial para efectuar un trabajo. Diversas formas de energía: térmica, mecánica, cinética, potencial, eléctrica, magnética, química y nuclear. Su suma es la energía Extensiva \underline{E} [J] (o Intensiva E [J.kg⁻¹]) total de un sistema. En el movimiento de fluidos no son considerados la transformación de energía nuclear, química o térmica en energía mecánica. Asimismo, no incluyen transferencia de calor en cualquier cantidad significativa. Los sistemas se analizan considerando sólo las formas mecánicas de energía y los efectos de irreversibilidad asociados a su pérdida (es decir, a la conversión en energía térmica que no puede usarse para algún propósito útil).
- Las formas de la energía relacionadas con la estructura molecular de un sistema y el grado de actividad molecular se llaman energía microscópica. La suma de las formas microscópicas es la **energía interna** de un sistema y se denota por \underline{U} [J] (o U [J.kg⁻¹]).
- La energía mecánica se define como la forma de energía que se puede transferirse completa y directamente a trabajo mecánico en ambas direcciones, por medio de un dispositivo mecánico.

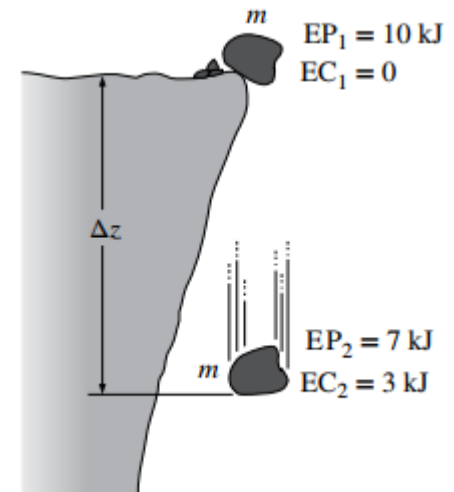
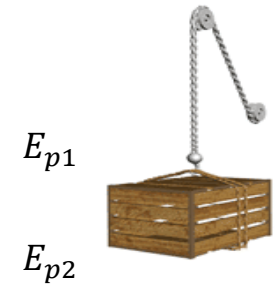


Conceptos de Termodinámica 1er Principio de la Termodinámica en sistemas abiertos

- Las formas comunes de la energía mecánica son la energía cinética y la potencial.
- La energía térmica no es energía mecánica, puesto que no se puede ser convertida en trabajo y viceversa de manera directa y por completo (2do principio de la termodinámica).
- La energía que un sistema tiene como resultado de su movimiento es **energía cinética**. Cuando todas las partes de un sistema se mueven a una velocidad media, la energía cinética por unidad de masa es $E_c = \bar{v}^2 / 2$ [J.kg⁻¹] (\bar{v} denota la velocidad media del sistema en relación con algún marco fijo de referencia).
- La energía que un sistema que tiene como resultado su posición en un campo gravitacional es **energía potencial**, $E_p = gz$ [J.kg⁻¹] donde g es la aceleración gravitacional y z es la elevación del centro de gravedad de un sistema en relación con algún plano de referencia seleccionado de manera arbitraria (*datum*).
- El primer principio de la termodinámica relaciona las diferentes formas de energía.



**Kinetic Energy
= Motion**



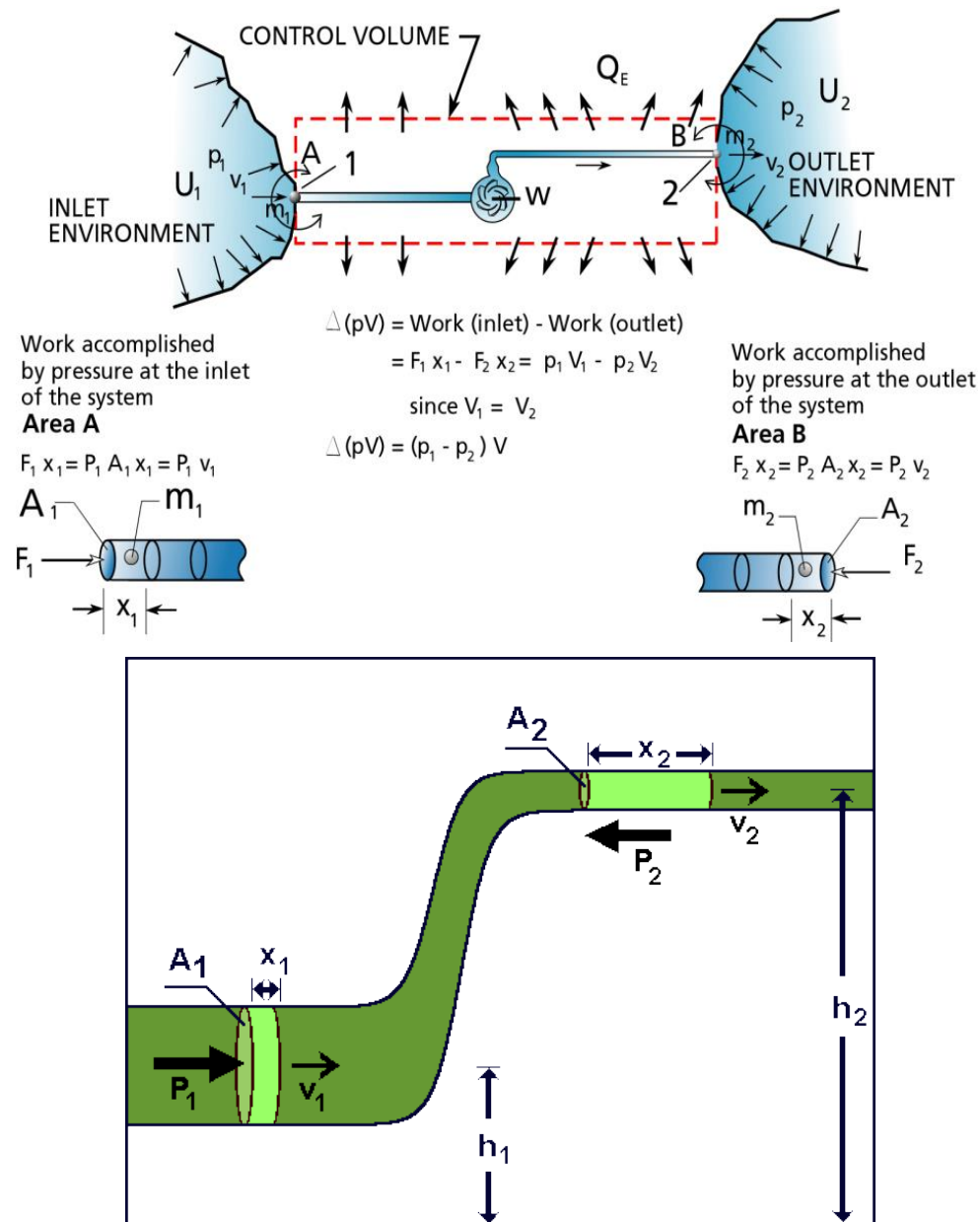
Conceptos de Termodinámica 1er Principio de la Termodinámica en sistemas abiertos

➤ La presión de un fluido que escurre está asociada con su energía mecánica. La unidad de presión Pa es equivalente a $Pa = N \cdot m^{-2} = N \cdot m \cdot m^{-3} = J \cdot m^{-3}$, (energía por unidad de volumen); el producto $P \cdot V$, o su equivalente $P \cdot \rho^{-1}$, tiene la unidad de $J \cdot kg^{-1}$, (energía por unidad de masa).

➤ La presión no es una forma de energía; está asociada a una cantidad de energía potencial almacenada por unidad de volumen. Una fuerza de presión ($P \cdot dA_c$) que actúa sobre un fluido a lo largo de una distancia produce **trabajo del flujo** o energía de flujo por unidad de masa, (P/ρ) .

$$E_{mec} = \frac{P}{\rho} + E_c + E_p = \frac{P}{\rho} + \frac{\bar{v}^2}{2} + gz \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$E_{flujo} = U + E_{mec} = U + \frac{P}{\rho} + \frac{\bar{v}^2}{2} + gz \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$



Conceptos de Termodinámica 1er Principio de la Termodinámica en sistemas abiertos

➤ $U + PV = U + \frac{P}{\rho} = H$, es la entalpía. Es **a veces** conveniente tratar el trabajo de flujo como parte de la energía del fluido y representar la energía microscópica de una corriente de fluido por la entalpía H .

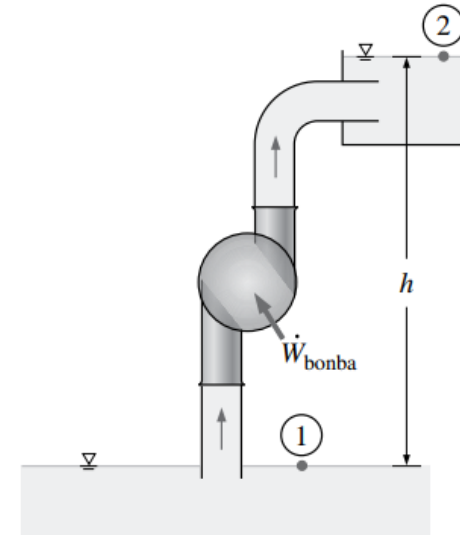
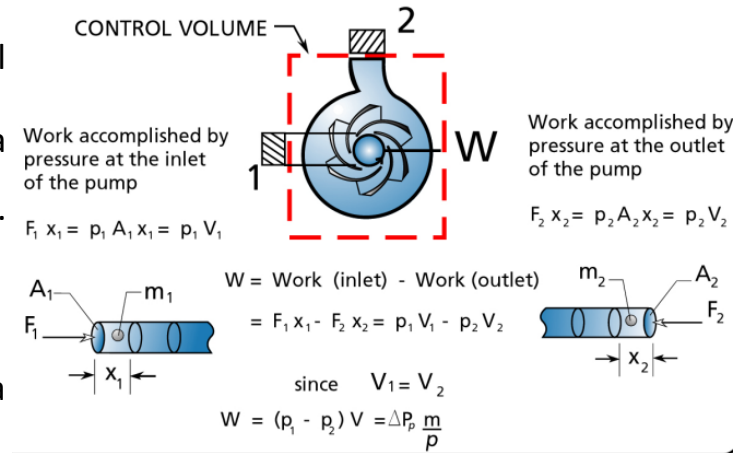
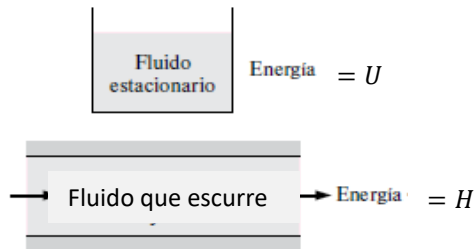
$$E_{flujo} = H + \frac{\bar{v}^2}{2} + gz$$

➤ En mecánica de fluidos, donde sólo interesa para el transporte la energía mecánica, el tratamiento es $E_{flujo} = U + E_{mec} = U + \frac{P}{\rho} + \frac{\bar{v}^2}{2} + gz$ y los cambios, según el principio de conservación, implica la reconversión (muy parcial) de U nuevamente en energía mecánica. El resto es disipación térmica (o irreversibilidad)

➤ El cambio de la energía mecánica (en ausencia de irreversibilidad)

$$\Delta E_{mec} = \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta \bar{v}^2}{2} + g\Delta z = w_s \quad \text{es trabajo mecánico que debe ser}$$

entregado ($w_s > 0$) o extraído del sistema ($w_s < 0$) mediante un dispositivo mecánico.



Flujo estacionario

$$V_1 = V_2 \approx 0$$

$$z_2 = z_1 + h$$

$$P_1 = P_2 = P_{atm}$$

$$\dot{E}_{mec, ent} = \dot{E}_{mec, sal} + \dot{E}_{mec, pérdida}$$

$$\dot{W}_{bomba} + \dot{m}gz_1 = \dot{m}gz_2 + \dot{E}_{mec, pérdida}$$

$$\dot{W}_{bomba} = \dot{m}gh + \dot{E}_{mec, pérdida}$$

Conceptos de Termodinámica 1er Principio de la Termodinámica en sistemas abiertos

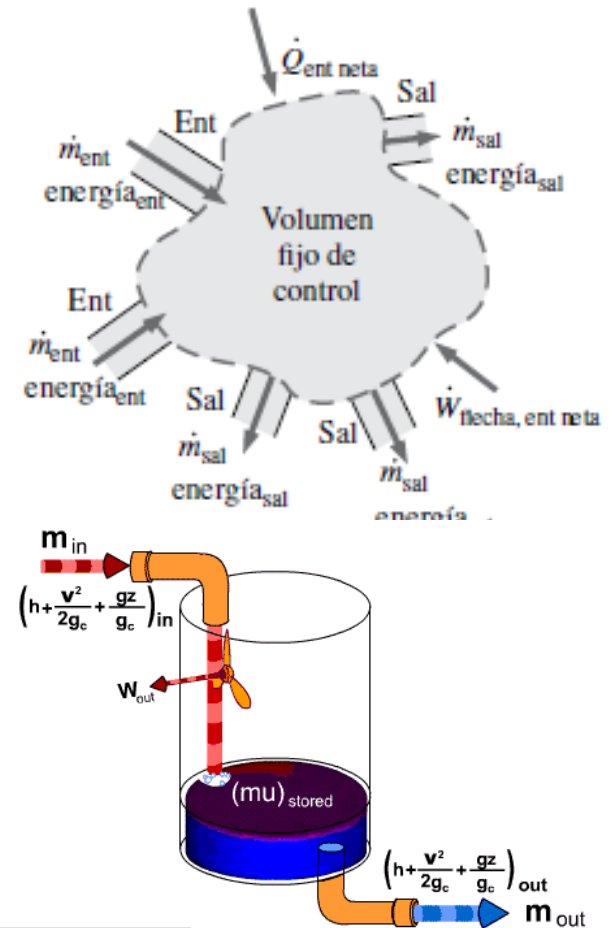
$$\dot{Q}_{neta} + \dot{W}_{neta} = \frac{d}{dt} \int_{VC} E \rho dV + \sum_{sal} \dot{m} \left(\frac{P}{\rho} + U + \frac{v^2}{2} + gz \right) - \sum_{ent} \dot{m} \left(\frac{P}{\rho} + U + \frac{v^2}{2} + gz \right) [J \cdot s^{-1}]$$

Donde: $\dot{m} [kg \cdot s^{-1}]$ flujo másico; $\dot{Q}_{neta} = \dot{Q}_{ent} - \dot{Q}_{sal} [J \cdot s^{-1}]$ es la tasa de transferencia neta de calor hacia o desde el sistema. $\dot{W}_{neta} = \dot{W}_{ent} - \dot{W}_{sal}$ es la transferencia neta de potencia de eje (el eje o flecha atraviesa la superficie de control) hacia o desde el sistema

$E = U + \frac{v^2}{2} + gz [m^2 \cdot s^{-2}] \equiv [J \cdot kg^{-1}]$ contenido de energía interna ($U [J \cdot kg^{-1}]$), cinética ($\frac{v^2}{2} [m^2 \cdot s^{-2}]$) y potencial ($gz [m^2 \cdot s^{-2}]$) por unidad de masa de fluido. $\frac{P}{\rho} [J \cdot kg^{-1}]$ es el trabajo de flujo o trabajo PV, el trabajo relacionado con empujar un fluido hacia adentro o hacia afuera de un volumen de control por unidad de masa.

$$H = U + PV = U + \frac{P}{\rho} \text{ entalpia específica}$$

$$\dot{Q}_{neta} + \dot{W}_{neta} = \frac{d}{dt} \int_{VC} E \rho dV + \sum_{sal} \dot{m} \left(H + \frac{v^2}{2} + gz \right) - \sum_{ent} \dot{m} \left(H + \frac{v^2}{2} + gz \right) [J \cdot s^{-1}]$$



Conceptos de Termodinámica 1er Principio de la Termodinámica en sistemas abiertos

$$\dot{Q}_{neta} + \dot{W}_{neta} = \sum_{sal} \dot{m} \left(H + \frac{v^2}{2} + gz \right) - \sum_{ent} \dot{m} \left(H + \frac{v^2}{2} + gz \right) [J \cdot s^{-1}] \text{ en estado estacionario}$$

Para dispositivos de una sola corriente

$$\dot{Q}_{neta} + \dot{W}_{neta} = \dot{m} \left(H_2 - H_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right) [J \cdot s^{-1}]$$

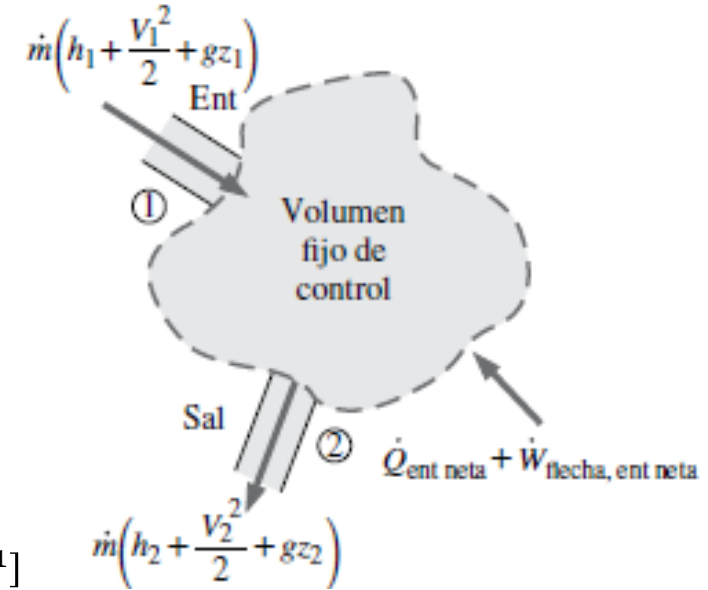
$$q_{neta} + w_{neta} = H_2 - H_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) [J \cdot kg^{-1}]$$

un nuevo reordenamiento conveniente:

$$w_{neta} + \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2} + gz_2 + (U_2 - U_1 - q_{neta}) [J \cdot kg^{-1}]$$

para flujo ideal (sin irreversibilidad) $U_2 - U_1 - q_{neta} = 0$; sin pérdida de energía mecánica $U_2 - U_1 = q_{neta}$

Si $q_{neta} = 0$ (situación común en los sistemas de transporte) entonces $U_2 = U_1$



Conceptos de Termodinámica 2do Principio de la Termodinámica en sistemas abiertos

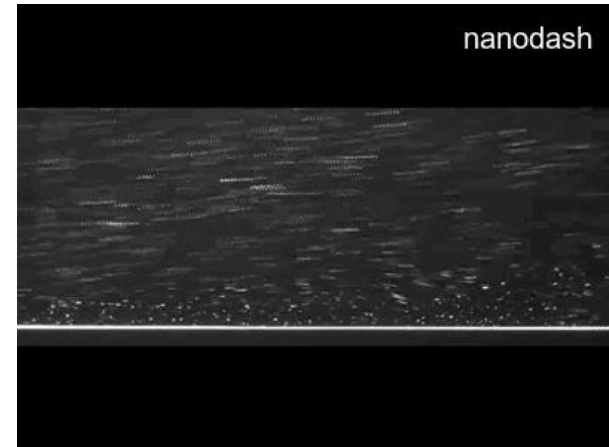
El fenómeno de irreversibilidad aparece cuando $U_2 - U_1 > 0$; implica un incremento de energía interna entre los puntos 1 y 2

Causas de la irreversibilidad (o de las pérdidas por “fricción” o pérdidas de carga)

El escurrimiento de la porción de fluido inmediatamente en contacto con una superficie sólida es nulo (condición de no deslizamiento o de estancamiento). Se originan regiones de fluido con diferencias en su velocidad. Estas diferencias se traducen como transferencia de cantidad de movimiento.

Desde el punto de vista microscópico, esta transferencia está asociada al movimiento al azar o asociados a remolinos (turbulencia) en direcciones diferentes a la observada en el flujo macroscópico de las especies moleculares existentes y supone la colisión **inelástica** de las mismas. Las moléculas más lentas siempre ralentizan el movimiento masivo de las moléculas más rápidas. Esto genera compresión y, desde un punto de vista termodinámico, incremento local de temperatura (y eventualmente presión).

Como consecuencia de estos incrementos, la energía interna aumenta $U_2 > U_1$



fricción o irreversibilidad?

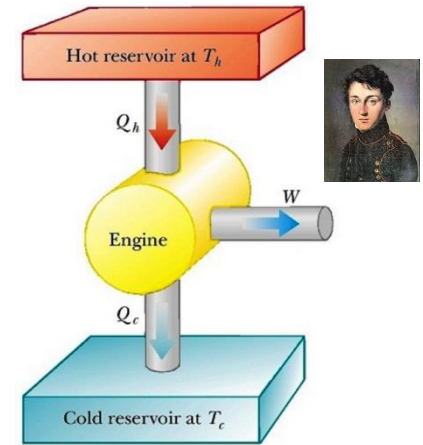
Conceptos de Termodinámica 2do Principio de la Termodinámica en sistemas abiertos

¿Puede esta energía interna reconvertirse nuevamente y completamente en energía mecánica? Según el 2do Principio de la Termodinámica, **no**

Una consecuencia de este principio es que la energía mecánica puede ser convertida completamente en energía térmica, pero no la conversión inversa.

De hecho, la eficiencia no puede ser mayor que la obtenida mediante un motor térmico ideal y está definida en términos de las temperaturas de los reservorios caliente y frío. Por ejemplo, por cada 1°C que cada porción de fluido incrementa su temperatura a partir de la temperatura ambiente (25°C), como consecuencia de los fenómenos de estancamiento y compresión, la cantidad de energía que podría ser reconvertida en trabajo (energía mecánica utilizable para el flujo) no puede ser mayor al 0,334 %. A los fines prácticos, la reconversión es despreciable, por lo que el incremento en energía interna asociado a los fenómenos de estancamiento y compresión es disipado como transferencia de calor (o energía térmica) al medio ambiente y no es recuperable como energía útil para el flujo del fluido; es considerada, por lo tanto, pérdida de energía mecánica, por unidad de masa e_L .

$$w_{pump} + \frac{P_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2} + gz_2 + w_{turbina} + e_L \text{ [J.kg}^{-1}\text{]} \quad e_L \text{ es energía mecánica pérdida por unidad de masa}$$



No toda la energía térmica entregada por un reservorio caliente puede ser convertida en capacidad de efectuar trabajo mecánico

$$\varepsilon = 1 - \frac{T_c}{T_h}$$

Operaciones Unitarias 1

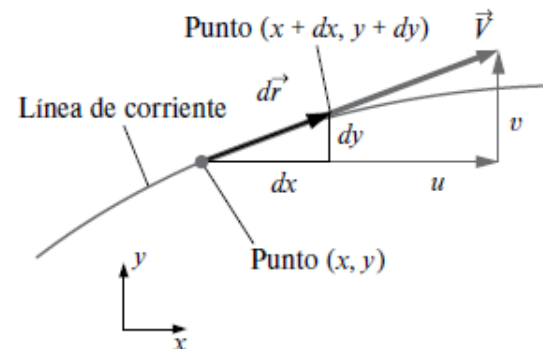
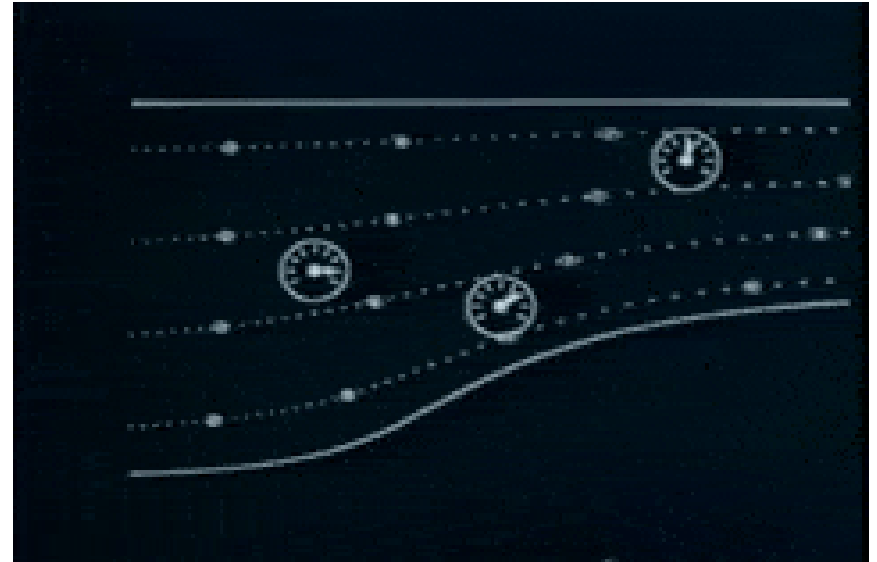
Elementos de la mecánica de fluidos

Elementos de la Mecánica de Fluidos Flujo estacionario

Mecánica de Fluidos es la ciencia que trata el comportamiento de los fluidos en reposo o en movimiento, así como de la interacción con sólidos u otros fluidos, en las fronteras o interfaces.

Flujo estacionario

- En un flujo estacionario, una variable no cambia con el tiempo en una posición especificada.
- Sin embargo, su valor puede cambiar de una posición a otra.
- En este tipo de flujo, todas las partículas que pasan por el mismo punto siguen la misma trayectoria (línea de corriente); los vectores velocidad permanecen tangentes a la trayectoria en cada punto.



Elementos de la Mecánica de Fluidos Flujo másico o gasto

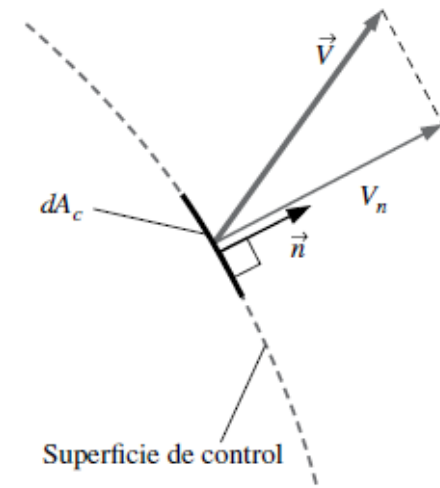
El flujo diferencial de un fluido con densidad ρ que fluye a través de un elemento de área dA_c en una sección transversal de ducto, con una componente de velocidad normal v_n al elemento de área es:

$$\delta \dot{m} = \rho v_n dA_c \quad \left[\frac{kg}{m^3} \right] \left[\frac{m}{s} \right] [m^2] = [kg \cdot s^{-1}]$$

El flujo másico que cruza toda el área de la sección transversal de un ducto es:

$$\dot{m} = \int_{A_c} \delta \dot{m} = \int_{A_c} \rho v_n dA_c$$

En un flujo incompresible ρ puede extraerse fuera de la integral. Sin embargo, la velocidad nunca es uniforme en la sección transversal en un ducto, debido a la condición de no deslizamiento en las paredes



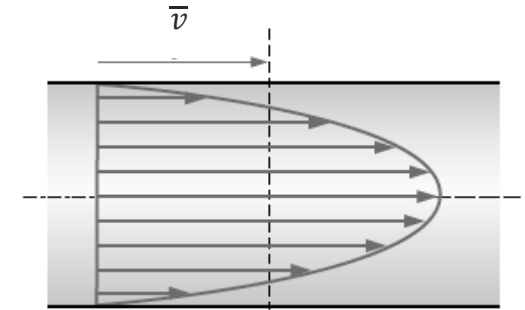
Elementos de la Mecánica de Fluidos Flujo másico o gasto

Dada una función $y = f(x)$, se define como valor medio de \bar{y} como $\bar{y}\Delta x = \int_{x_1}^{x_2} y dx$.

A_c denota el área de la sección transversal normal a la dirección del flujo.

Se define la velocidad promedio como $\bar{v}A_c = \int_{A_c} v_n dA_c \rightarrow \bar{v} = \frac{1}{A_c} \int_{A_c} v_n dA_c$

$$\dot{m} = \int_{A_c} \rho v_n dA_c = \rho \underbrace{\int_{A_c} v_n dA_c}_{\bar{v}A_c} \rightarrow \dot{m} = \rho \bar{v} A_c \quad \left[\frac{kg}{m^3} \right] \left[\frac{m}{s} \right] [m^2] = [kg \cdot s^{-1}]$$



Ecuación válida para flujo incomprensible (ρ ctte) o compresible (ρ ctte en A_c);

Elementos de la Mecánica de Fluidos Flujo volumétrico, velocidad de masa

Flujo volumétrico o caudal

El caudal o flujo volumétrico se define como el volumen del fluido que fluye a través de una sección transversal por unidad de tiempo

$$\dot{Q}_V = \int_{A_c} v_n dA_c = \bar{v} A_c \quad \left[\frac{m}{s} \right] [m^2] = [m^3 \cdot s^{-1}]$$

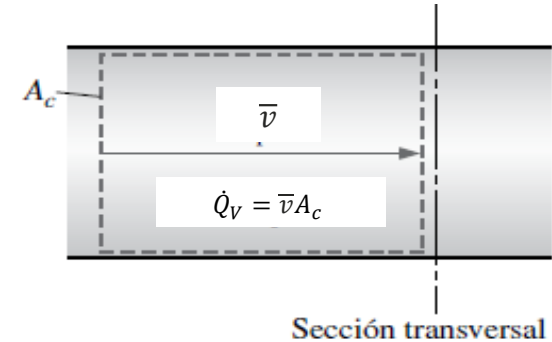
El flujo másico y el flujo están relacionados por la ecuación $\dot{m} = \rho \dot{Q}_V$

Velocidad de masa (G) o masa velocidad

$$\dot{m} = \rho \bar{v} A_c \quad \left[\frac{kg}{m^3} \right] \left[\frac{m}{s} \right] [m^2] = [kg \cdot s^{-1}] \rightarrow \frac{\dot{m}}{A_c} = \rho \bar{v} = G [kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}]$$

La ventaja de utilizar G es independiente de la temperatura y la presión cuando el flujo es estacionario (\dot{m} constante) y la sección transversal no varía (A_c constante).

Este hecho es especialmente útil, cuando se consideran fluidos compresibles, en los cuales tanto \bar{v} como ρ varían con la temperatura y la presión.



Elementos de la Mecánica de Fluidos Principios de conservación

- Conservación de la masa
- Conservación de la energía
- Conservación de la cantidad de movimiento o momento lineal

Conservación de la masa

Para un **sistema cerrado** la conservación de la masa se expresa como:

$$m_{sist} = \text{constante} \text{ o } \frac{dm_{sist}}{dt} = 0$$

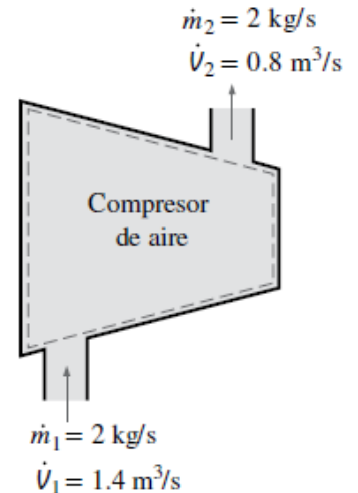
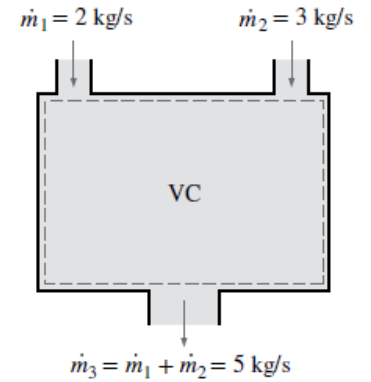
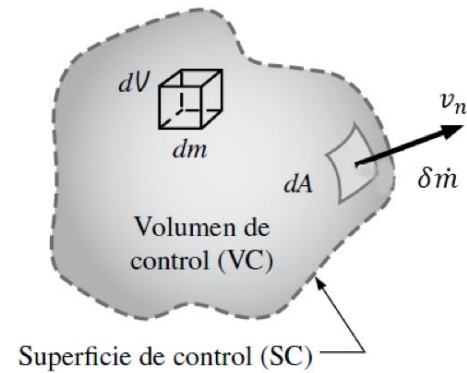
Para un **sistema abierto**, en el que se define un volumen de control (VC) de volumen \underline{V} y masa es m_{VC} :

$$\frac{dm_{VC}}{dt} = \sum_{ent} \dot{m}_{ent} - \sum_{sal} \dot{m}_{sal}$$

\dot{m}_{ent} y \dot{m}_{sal} [$kg \cdot s^{-1}$] son los flujos másicos hacia dentro y hacia fuera del volumen de control

$\frac{dm_{VC}}{dt}$ es la tasa de cambio de la masa en el interior de ese volumen.

Para sistemas con una única entrada y salida: $\dot{m}_{ent} - \dot{m}_{sal} = \frac{dm_{VC}}{dt}$



Elementos de la Mecánica de Fluidos conservación de la masa, ecuación de continuidad

En un **flujo estacionario**, la cantidad total de masa contenida dentro de un volumen de control no cambia con el tiempo.

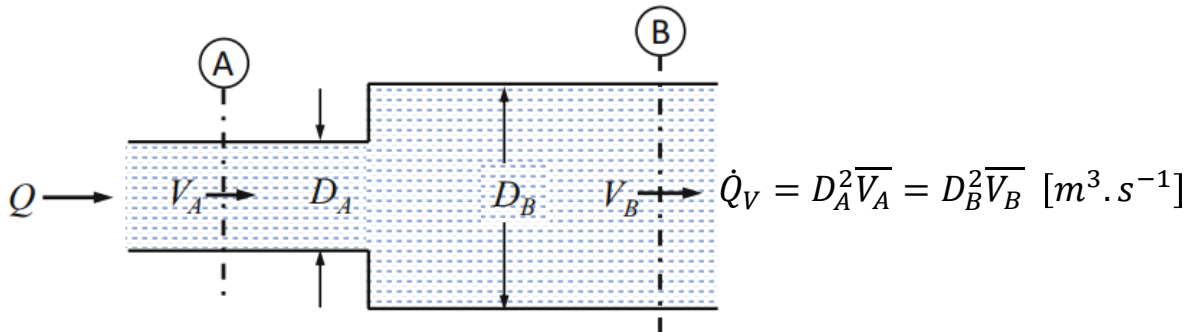
$$\frac{dm_{VC}}{dt} = 0 \rightarrow \sum_{ent} \dot{m} = \sum_{sal} \dot{m}$$

➤ flujo estacionario; una sola corriente: $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \rightarrow \rho_1 \bar{v}_1 A_1 = \rho_2 \bar{v}_2 A_2$ [$kg \cdot s^{-1}$] **Ecuación de continuidad**

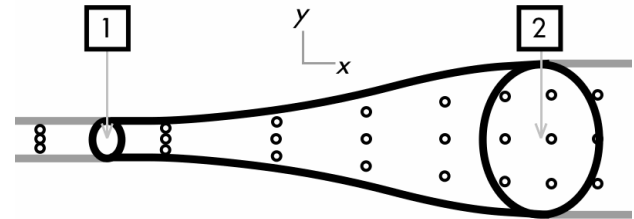
➤ flujo incompresible estacionario; una sola corriente: $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \rightarrow \rho \bar{v}_1 A_1 = \rho \bar{v}_2 A_2$ [$kg \cdot s^{-1}$] $\rightarrow \dot{Q}_{V1} = \dot{Q}_{V2}$ [$m^3 \cdot s^{-1}$]

$\bar{v}_1 A_1 = \bar{v}_2 A_2$ [$m^3 \cdot s^{-1}$] **Ecuación de continuidad para fluido incompresible**

En ductos circulares, fluido incompresible $\dot{Q}_{VA} = \frac{\pi D_A^2}{4} \bar{V}_A = \frac{\pi D_B^2}{4} \bar{V}_B = \dot{Q}_{VB}$ [$m^3 \cdot s^{-1}$]



Area A increases



Speed v decreases

Elementos de la Mecánica de Fluidos conservación de la cantidad de movimiento

El producto de la masa y de la velocidad de un cuerpo se llama momento lineal o cantidad de movimiento del cuerpo, y la cantidad de movimiento de un cuerpo rígido de masa m con velocidad \vec{v} es $m\vec{v}$.

2da Ley de Newton: La suma de fuerzas aplicada a una porción de fluido en la dirección de una línea de corriente s :

$$\sum F_s = ma_s$$

La razón de cambio de la cantidad de movimiento de un cuerpo es igual a la fuerza neta que actúa sobre ese

cuerpo.
$$\sum F_s = ma_s = m \frac{d\vec{v}_s}{dt} = \frac{d(m\vec{v}_s)}{dt}$$

La cantidad de movimiento de un sistema permanece constante cuando la fuerza neta que actúa sobre él es cero (se conserva la cantidad de movimiento de esos sistemas). Esto se conoce como el **principio de conservación de la cantidad de movimiento**.

La ecuación de Bernoulli (**estricta**) es establecida a partir de este principio; es una **relación aproximada** entre la presión, la velocidad y la elevación, **y es válida en regiones de flujo estacionario en donde las fuerzas netas de fricción son despreciables**,

Elementos de la Mecánica de Fluidos Ecuación de Bernoulli (**estricta**)

- No hay transferencia de energía como calor o trabajo
- No hay variación en la velocidad del fluido a través de la sección transversal
- Las fuerzas significativas que actúan en la dirección s son la presión (que actúa sobre ambos lados) y la componente del peso de la partícula en la dirección s , (W_s).

Originalmente formulada para escurrimientos ideales (o reversibles), la ecuación se extiende a flujos irreversibles potenciados por dispositivos mecánicos (ecuación de Bernoulli **ampliada**). En esta última formulación, la ecuación de Bernoulli es considerada como el balance **mecánico** de energía.

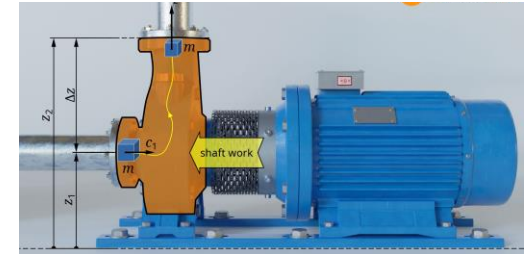
En este enfoque, los efectos térmicos debido a la irreversibilidad son tratados como pérdidas o disipación de energía.

La hipótesis clave en la formulación original es que los efectos viscosos son despreciablemente pequeños en comparación con los efectos de inercia, gravitacionales y de la presión.

Puesto que todos los fluidos tienen viscosidad (no existe un “fluido no viscoso”), esta aproximación no puede ser válida para un campo completo de flujo de interés práctico.



Daniel Bernoulli (1700-1782), matemático suizo formuló en 1738 el comportamiento en un texto escrito, cuando estaba trabajando en San Petersburgo, Rusia.



Elementos de la Mecánica de Fluidos Ecuación de Bernoulli (ideal o estricta)



En regiones del flujo en donde las fuerzas netas de fricción son despreciables, no hay bomba o turbina, y no hay transferencia de calor a lo largo de la línea de corriente, las fuerzas significativas que actúan en la dirección s son la presión (que actúa sobre ambos lados) y la componente del peso de la partícula en la dirección s . →

$$\sum F_s = ma_s \quad \sum F_s = PdA - (P + dP)dA - W \sin\theta$$

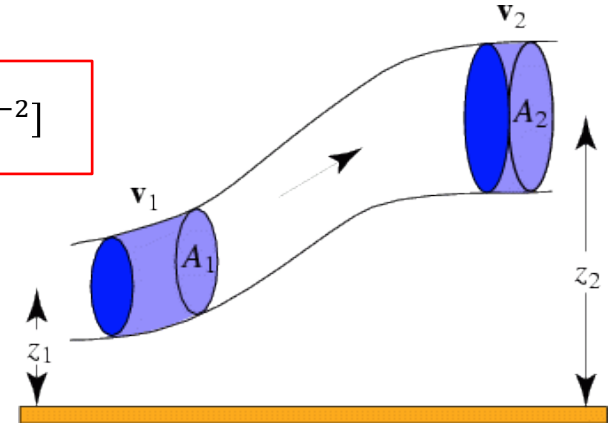
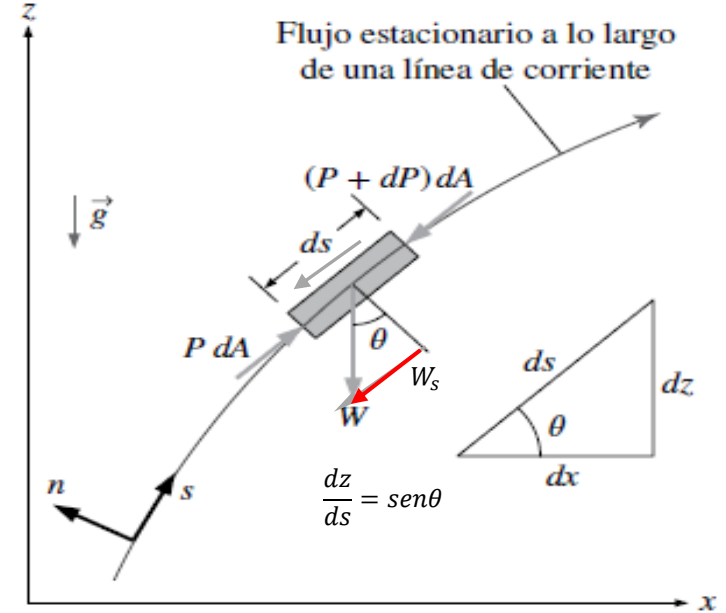
$$ma_s = m \frac{dv}{dt} = m \frac{dv}{ds} \frac{ds}{dt}$$

$$\frac{dz}{ds} = \sin\theta$$

$$PdA - (P + dP)dA - W \sin\theta = mv \frac{dv}{ds} \Rightarrow -dPdA - (\rho ds dA)g \frac{dz}{ds} = (\rho ds dA)v \frac{dv}{ds} \Rightarrow -dP - \rho g dz = \rho v dv$$

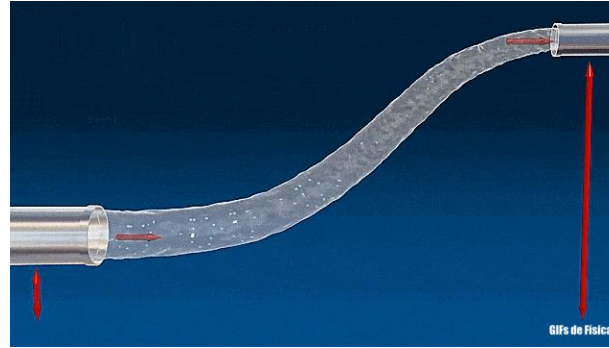
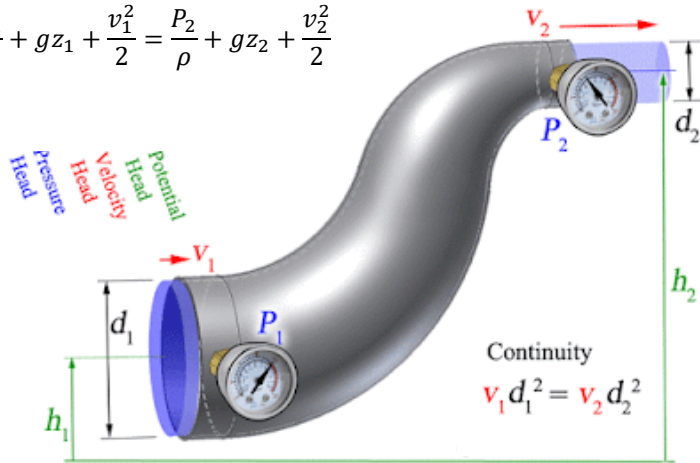
$$-\frac{dP}{\rho} - g dz = v dv \Rightarrow \frac{dP}{\rho} + g dz + v dv = 0 \quad [J \cdot kg^{-1}] \equiv [m^2 \cdot s^{-2}]$$

$$\int_1^2 \frac{dP}{\rho} + g \Delta z + \frac{\Delta(v^2)}{2} = 0$$



Elementos de la Mecánica de Fluidos Ecuación de Bernoulli

$$\frac{P_1}{\rho} + gz_1 + \frac{v_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho} + gz_2 + \frac{v_2^2}{2}$$



$$\int_1^2 \frac{dP}{\rho} + g\Delta z + \frac{\Delta(v^2)}{2} = 0$$

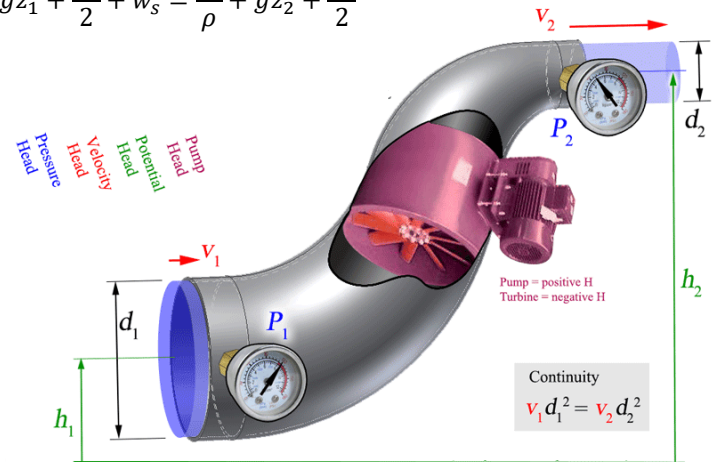
Cada término representa cambios en energía que pueden ser convertidos en cualquiera de los otros. $\int_1^2 \frac{dP}{\rho}$ es la diferencia de energía PV (o trabajo de expansión compresión) entre los puntos 1 y 2 ; $g\Delta z$ es diferencia en energía potencial (o de posición en un campo gravitatorio) y $\frac{\Delta(v^2)}{2}$ es diferencia en energía cinética. La integración para un fluido incompresible: $\frac{P}{\rho} + gz + \frac{v^2}{2} = ctte$

Con transferencia de energía como trabajo

$$\frac{P_1}{\rho} + gz_1 + \frac{v_1^2}{2} + w_s = \frac{P_2}{\rho} + gz_2 + \frac{v_2^2}{2}$$

$$\frac{dP}{\rho} + g dz + v dv = w_s \quad [J \cdot kg^{-1}] \equiv [m^2 \cdot s^{-2}]$$

$$\int_1^2 \frac{dP}{\rho} + g\Delta z + \frac{\Delta(v^2)}{2} = w_s$$





Elementos de la Mecánica de Fluidos Ecuación de Bernoulli, su relación con el 1er y 2do principio

Ecuación de energía:

$$q_{neta} + w_{neta} = H_2 - H_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) [J.kg^{-1}] \quad \text{En forma diferencial: } \delta q + \delta w = dH + vdv + gdz$$

Flujo estacionario ideal (en ausencia de irreversibilidades)

Procesos **cuasiestáticos** $\delta q = TdS$

$$dH = TdS + VdP$$

$$\delta q + \delta w = dH + vdv + gdz \rightarrow TdS = vdv + gdz + dH - \delta w$$

$$0 = vdv + gdz + VdP - \delta w \rightarrow \delta w = VdP + vdv + gdz \rightarrow \delta w = \frac{dP}{\rho} + vdv + gdz \quad \text{Ecuación de Bernoulli ideal}$$

Flujo estacionario no ideal

Procesos **irreversibles** $\delta q < TdS$

$$dH = TdS + VdP$$

$$\delta q + \delta w = dH + vdv + gdz \rightarrow TdS > vdv + gdz + dH - \delta w$$

$$0 > vdv + gdz + VdP - \delta w \rightarrow \delta w > VdP + vdv + gdz \rightarrow \delta w > \frac{dP}{\rho} + vdv + gdz$$

$$\delta w = vdv + gdz + VdP + de_L \rightarrow \delta w = \frac{dP}{\rho} + vdv + gdz + de_L \quad \text{Ecuación de Bernoulli no ideal}$$

Los términos δw y de_L son cambios unidireccionales; de_L siempre toma energía de los otros términos y es equivalente a $\delta q < TdS$ (2do Principio)

Elementos de la Mecánica de Fluidos Ecuación de Bernoulli (ampliada)



$$\delta w = \frac{dP}{\rho} + vdv + gdz + de_L$$

$$w_s = \int_1^2 \frac{dP}{\rho} + g\Delta z + \frac{\Delta(v^2)}{2} + e_L \quad J \cdot kg^{-1}$$

Principio de la conservación de la energía mecánica

Flujo **ideal e incompresible** y $w_s = 0$ $\frac{P}{\rho} + gz + \frac{\alpha v^2}{2} = ctte$

Flujo **incompresible** $w_s = \frac{\Delta P}{\rho} + g\Delta z + \frac{\Delta(v^2)}{2} + e_L \rightarrow \frac{P_1}{\rho} + gz_1 + \frac{v_1^2}{2} + w_s = \frac{P_2}{\rho} + gz_2 + \frac{v_2^2}{2} + e_L$

Flujo **compresible** $w_s = \int_1^2 \frac{dP}{\rho} + g\Delta z + \frac{\Delta(v^2)}{2} + e_L$

Flujo **compresible** isotérmico, gas ideal. Si $\rho = \frac{P}{RT} \rightarrow \int \frac{dP}{\rho} = RT \int \frac{dP}{P} = RT \ln P \Rightarrow w_s = RT \ln \frac{P_2}{P_1} + g\Delta z + \frac{\Delta(v^2)}{2} + e_L$

Flujo **compresible** politrópico, gas ideal. Si $\frac{P}{\rho^k} = C = ctte$; $1 < k \leq \gamma = \frac{c_P}{c_V} \rightarrow \rho = C^{-\frac{1}{k}} P^{\frac{1}{k}} \rightarrow \int \frac{dP}{\rho} = \int C^{\frac{1}{k}} P^{-\frac{1}{k}} dP$

γ coeficiente de dilatación adiabática

$$\left[\frac{k}{k-1} \right] C^{\frac{1}{k}} \left(P_2^{-\frac{1}{k+1}} - P_1^{-\frac{1}{k+1}} \right) = \left[\frac{k}{k-1} \right] C^{\frac{1}{k}} P_1^{-\frac{1}{k+1}} \left(\frac{P_2^{-\frac{1}{k+1}}}{P_1^{-\frac{1}{k+1}}} - 1 \right) = \left[\frac{k}{k-1} \right] \frac{P_1}{\rho_1} \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \Rightarrow$$

$$w_s = \left[\frac{k}{k-1} \right] \frac{P_1}{\rho_1} \left(\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) + g\Delta z + \frac{\Delta(v^2)}{2} + e_L$$

Número de Mach $Ma = \frac{v}{v_{sound}} = \frac{v}{\sqrt{\frac{RT\gamma}{M}}} \rightarrow$ si $Ma < 0,3$, la ecuación difiere respecto a la ecuación de flujo incompresible en menos de un 2%

Aire, $\gamma \cong 1,4$; $M = 0,029 \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$. Para aire, a 25°C , la máxima velocidad admitida es menor a $104 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

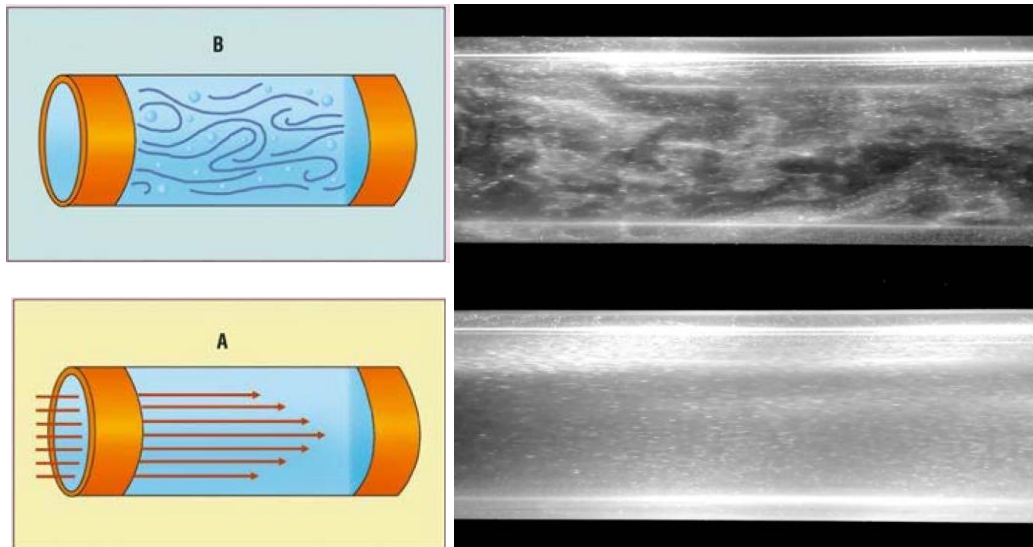
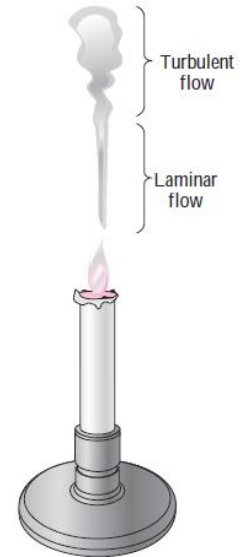


Elementos de la Mecánica de Fluidos flujo laminar y flujo turbulento

El movimiento ordenado de un fluido, caracterizado por capas no alteradas de éste, se conoce como **laminar**. La palabra laminar proviene del movimiento de partículas juntas adyacentes del fluido, en “láminas”.

El movimiento desordenado de un fluido, que es común se presente a velocidades altas y se caracteriza por fluctuaciones en la velocidad, se llama **turbulento**.

Un flujo que se alterna entre laminar y turbulento se conoce como de **transición**



Elementos de la Mecánica de Fluidos flujo laminar y flujo turbulento, el experimento de Reynolds

Los experimentos de Osborn Reynolds en la década de 1880 dieron como resultado el establecimiento del número adimensional de Reynolds, (Re), como el parámetro clave para determinar el régimen de flujo de un fluido newtoniano.

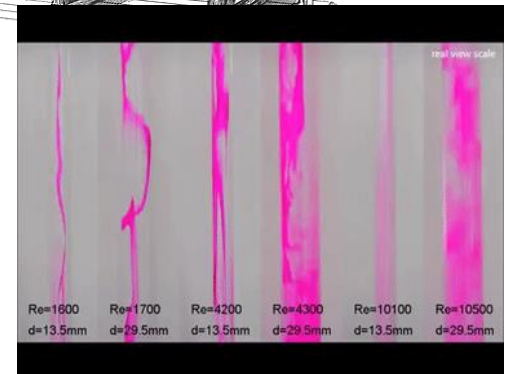
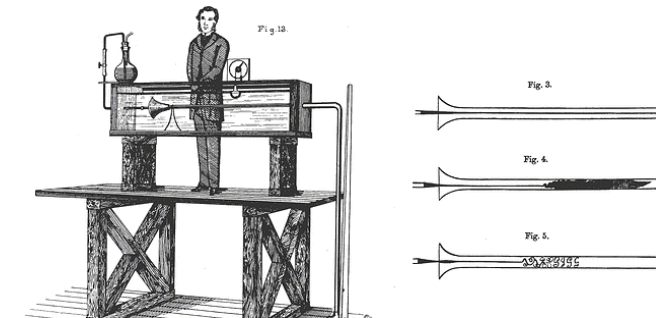
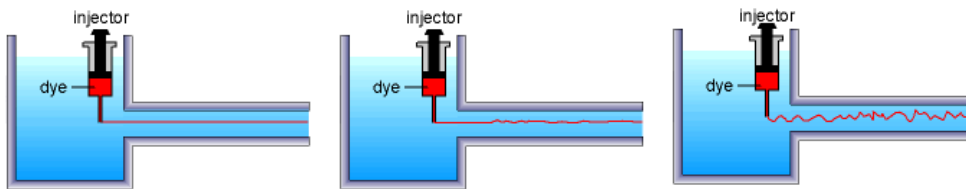


Osborne Reynolds
1842-1912

Estudió las condiciones bajo las cuales un tipo de flujo cambia a otro; encontró que la velocidad crítica, a la cual el flujo laminar cambia a flujo turbulento, depende de cuatro variables: el diámetro del tubo D (o una propiedad dimensional equivalente), μ , ρ \bar{v} . Estos cuatro factores se combinan formando el grupo adimensional Re ; el cambio en el tipo de flujo ocurre para un valor definido del mismo.

$Re = \frac{D\bar{v}\rho}{\mu} = \frac{D\bar{v}}{\nu}$ $[m] \left[\frac{m}{s}\right] \left[\frac{kg}{m^3}\right] \left[\frac{m.s}{kg}\right] = []$; $Re \leq 2100$ flujo o régimen laminar; $2100 \leq Re \leq 4000$ región de transición; $Re \geq 4000$ flujo o régimen turbulento

D : propiedad geométrica con dimensión de longitud

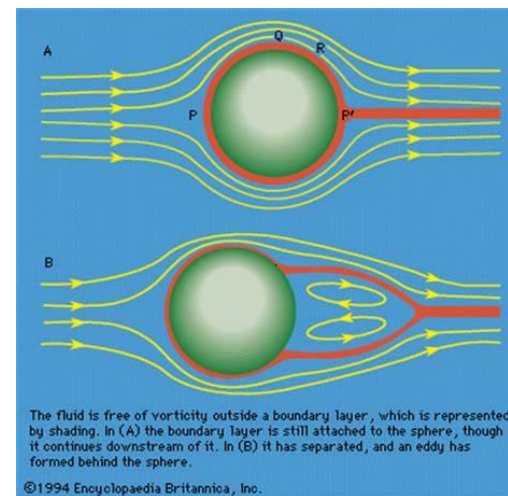


Asimismo, se define un número de Reynolds para fluidos no newtonianos

<https://youtu.be/pae5WrmDzUU>

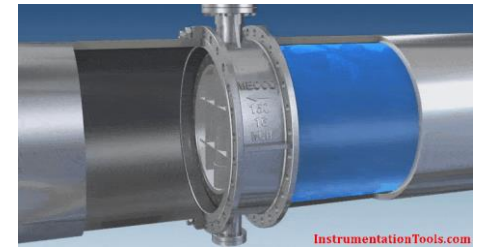
Elementos de la Mecánica de Fluidos la condición límite de no-deslizamiento

- El flujo de fluidos es afectado por superficies sólidas. El fluido en movimiento llega a detenerse por completo en la superficie
- Una capa de fluido en contacto directo con un sólido se adhiere a la superficie debido a los efectos viscosos (fuerzas de cohesión) y no hay deslizamiento. Esta característica es la **condición de no deslizamiento**. La capa que adhiere a la superficie desacelera la capa adyacente, y ésta a la siguiente sucesivamente.
- La condición de no-deslizamiento es responsable del desarrollo de un perfil de velocidad. La región del fluido adyacente a la pared, en la cual los efectos viscosos (y, por consiguiente, los gradientes de velocidades) son significativos se llama **capa límite**.
- Otra consecuencia de la condición de no-deslizamiento es el arrastre de superficie: es la fuerza que ejerce un fluido sobre una superficie en la dirección de flujo. Cuando se fuerza a un fluido a moverse sobre una superficie curva, con una velocidad suficientemente elevada, la capa límite ya no puede permanecer adherida a la superficie y, en algún punto, se separa de ella; este fenómeno se conoce como separación del flujo.



Elementos de la Mecánica de Fluidos flujo interno, flujo externo

➤ El flujo en un tubo o ducto es **flujo interno** si el fluido queda limitado por superficies sólidas; están dominados por la influencia de la viscosidad en todo el campo de flujo.



➤ *Flujo externo*: el flujo alrededor de cuerpos que están inmersos en un fluido. Un flujo externo **no está limitado** por una superficie. Los efectos viscosos están confinados a una porción del campo de flujo, limitados a la capa límite cercana a las superficies sólidas y a las regiones de la estela, corriente abajo de los cuerpos. Estas regiones están rodeadas por una región externa de flujo caracterizada por bajos gradientes de velocidad y temperatura. De la interacción resultan dos tipos de fuerzas: de sustentación (*Lift*) y arrastre (*Drag*).

