

Titulo

Aplicación de unidades y balances energéticos básicos para sistemas abiertos.

Unidades de medida

En todos los procesos físicos y/o químicos las leyes que rigen la materia se expresan mediante ecuaciones de conservación, estas leyes están expresadas involucrando determinadas variables físicas; como por ejemplo: longitudes, áreas, presiones, temperaturas, presiones, densidades, viscosidad, velocidades, etc.

Estas variables (escalares o vectoriales) se especifican a través de un número expresado en un sistema de unidades, dando así sentido físico a las variables en cuestión.

Para establecer un sistema básico de unidades se escogen un conjunto de unidades fundamentales independientes una de la otra; por ejemplo en el sistema **mks** se escogen el metro (m) para la longitud, Kilogramo (Kg) para la masa, segundo (s) para el tiempo el kelvin (°K) para la temperatura. Las demás magnitudes se denominan magnitudes derivadas de ellas y se obtienen de las fundamentales.

Aparte del sistema métrico decimal (**mks**) existen muchos sistemas básicos de unidades, como es el caso del sistema (**cgs**) o el sistema ingles de unidades. En ingeniería en ocasiones se suelen expresar unidades en uno u otro sistema de unidades por razones de estandarización, de comercio o simplemente por razones históricas.

Las unidades que son de más interés energético son las unidades de masa, volumen, superficie (o área), energía, potencia y temperatura. Aunque se presentan detalladamente en el **Capítulo 2** de esta asignatura, a continuación se muestran algunas equivalencias de uso frecuente.

Tabla 1 Unidades de volumen y masa

Nombre	Observaciones
1 m ³	= 6,29 petroleum barrels (U.S.)=1000 l
1 barril (bbl)	= 42 U.S. Gallons=35 Imperial Gallons
1 U.S. Gallon	= 3,75 l
1 uma (Unidad de masa atómica)	= 1,66x10 ⁻²⁴ g
1 lb	= 454 g
1 ton (short)	= 907 kg
1 ton (long)	= 1,017 kg
1 ton (métrica)	= 1,000 kg

Tabla 2 Unidades de superficie.

Nombre	Observaciones
1 ha (hectárea)	= 10.000m ²

Tabla 3 Unidades de energía.

Nombre	Observaciones
1 kWh	= 3,6 MJ
1 BTU (British Thermal Unit)	= 1,054 kJ
1 cal (cal-gramo)	= 4,184 J
1 frigoría	= 1 kcal de frío
1 termia	= 10 ⁶ termias inglesas (therm)=10 ⁵ BTU
1 electrón-voltio	= 1,6x10 ⁻¹⁹ J

Tabla 4 Unidades de potencia.


Nombre	Observaciones
1 CV (caballo de vapor)	= 735,5 W=0.9683 hp
1 hp (horse power)	= 747,7 W

Combustibles de referencia.

Quando se realizan análisis energéticos de información comercial, en ocasiones se quiere comparar varias opciones tecnológicas o varios combustibles comerciales que pudieran competir entre sí o ser sustitutos. Se usan para ello combustibles de referencia para trasladar a unidades de energía basadas en su poder calorífico inferior (*PCI*). Energía que sirve para establecer la equivalencia entre combustibles. Por lo tanto, son unidades de energía:

- Tonelada equivalente de petróleo **tep** (toe en inglés): se define como la cantidad de energía liberada al arder 1 ton (métrica) de petróleo de referencia (*PCI*=41,85 MJ/kg_p).
- Tonelada equivalente de carbón **tec** (tce en inglés): se define como la cantidad de energía liberada al arder 1 ton (métrica) de carbón de referencia (*PCI*=29 MJ/kg_c).
- Barril equivalente de petróleo **bep** (boe en inglés): se define como la cantidad de energía liberada al arder 1 barril de petróleo de referencia (*PCS*=6,12GJ 0 5,4 GJ de *PCI*).

Estas unidades conllevan la ventaja de dar una imagen mental de la “cantidad” requerida o de “cuanto cuesta”.

	Asignatura: Fuentes de Energía	PRACTICA 0
	UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID DPTO. INGENIERÍA TÉRMICA Y DE FLUIDOS, grupo ITEA.	

Usando estas equivalencias es posible, por ejemplo, calcular cuanto petróleo haría falta para atender un sector de la industria que consume carbón, o una combinación de distintas fuentes de energía primaria o de energía final.

Tabla 5 Equivalencias entre unidades de referencia.

Nombre		Observaciones
1 tec	=	0,69 tep
1.000 m ³ gas natural (condiciones normales de presión y temp.)	=	0,93 tep
1 MWh de electricidad (hidráulica, eólica, solar no térmica)	=	0,086 tep
1 MWh (producida térmicamente, se asume η=0,33)	=	0,2606 tep

NOTA: Observe la diferencia entre la equivalencia de la electricidad, según haya sido producida.

Balances de para un sistema abierto.

Un sistema termodinámico contenido dentro de una frontera (fronteras de control) se dice que es abierto, o que es un volumen de control, cuando existe intercambio de masa con el exterior (entrando por n aperturas y/o saliendo por m aperturas a través de unas partes de la frontera, que sean permeable al flujo), ver Fig. 1.

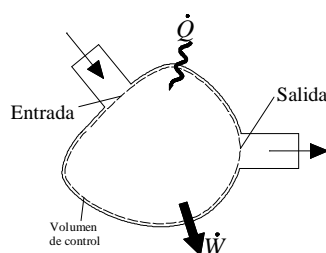


Figura 1 Volumen de control o un sistema abierto con una única entrada y única salida.

La conservación de la masa nos permite considerar que la variación de la masa contenida en el volumen de control se debe a la diferencia entre entradas y salidas:

$$\underbrace{\frac{dm}{dt}}_{\text{Aumento de masa en la unidad de tiempo}} = \sum_{i=1}^n \underbrace{\dot{m}_i}_{\text{Caudal másico}} - \sum_{e=1}^m \dot{m}_e \quad (1)$$

Energéticamente esta masa intercambiada o transferida puede transportar energía (energía interna, cinética y potencial), así mismo, a través de las superficies de control puede existir intercambio energético con el exterior en forma de calor y/o trabajo, aumentando así el nivel energético del mismo, de modo que si realizamos un balance de energía tendríamos que:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum_{i=1}^n \underbrace{\dot{m}_i}_{\text{Caudal másico}} \left(\underbrace{u_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i}_{\text{Energía específica } e} \right) - \sum_{e=1}^m \dot{m}_e \left(u_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) \quad (2)$$

Aumento del nivel energético del sistema p. u. de tiempo.
 $E = U + \frac{V^2}{2} + gz$

Potencia de la transferencia de calor
>0 si es potencia hacia el exterior

Potencia transportada por las corrientes de fluido que entran a través de las superficies de control

Potencia transportada por las corrientes de fluido que salen a través de las superficies de control

Donde \dot{m} es el flujo másico (en el sistema mks viene expresada en kg/s), V es la velocidad (en el sistema mks viene expresada en m/s), g es la constante de gravedad ($\approx 9,81 \text{ m/s}^2$), z es la altura geográfica, E es la energía total (en el sistema mks viene expresada en J) y u es la energía interna específica (en el sistema mks viene expresada en J/kg). La energía interna es la suma de la térmica y la de formación.

El trabajo total se puede descomponer como la suma del trabajo en un eje sin variación de volumen (p. e. una turbomáquina), por variación de volumen (p. e. con pistón) y el que se realiza sobre las superficies permeables del volumen de control a causa del intercambio de masa, denominado trabajo de flujo, pudiéndose escribir como:

$$\dot{W} = \dot{W}_{vc} + \underbrace{A_e P_e}_{\text{Fuerza}} V_e v_e \rho_e - A_i P_i V_i v_i \rho_i ; AV\rho = \dot{m} \quad (3)$$

Para facilitar los cálculos, la energía interna u se puede combinar para formar la entalpía $h = u + Pv$. Sustituyendo las Ec. (3) y la expresión de la entalpía en la Ec. (2) se tiene que:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}_{vc} + \sum_{i=1}^n \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) - \sum_{e=1}^m \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) \quad (4)$$

Como ejemplo de aplicación de un balance energía se propone el siguiente problema:

- Se tiene un compresor (fig 2) que trasiega aire como fluido de trabajo (suponga el aire como un gas ideal). Las condiciones de entrada son $P_i = 1 \text{ bar}$, $T_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $V_i = 6 \text{ m/s}$, $A_i = 0,08 \text{ m}^2$ y las condiciones de salida son $P_e = 6 \text{ bar}$, $T_e = 220 \text{ }^\circ\text{C}$, $V_e = 2 \text{ m/s}$. Suponga que el proceso es estacionario, adiabático y si que se desprecia el cambio de energía potencial. Se pide calcular la potencia necesaria en el compresor para cumplir con las condiciones de entrada y salida.

Solución.

Por un lado se tiene que de acuerdo a que se supuso condiciones estacionarias por conservación de masa se cumple $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$ y y que el proceso es adiabático, la Ec. (4) se puede simplificar como:

$$\underbrace{\frac{dE}{dt}}_{\text{Regimen estacionario}} = \underbrace{\dot{Q}}_{\text{Proceso adiabático}} - \dot{W}_{vc} + \sum_{i=1}^n \dot{m}_i \cdot \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + g z_i \right) - \sum_{e=1}^m \dot{m}_e \cdot \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + g z_e \right)$$

$$\Rightarrow -\dot{W}_{vc} + \dot{m} \cdot \left(h_i - h_e + \frac{V_i^2}{2} - \frac{V_e^2}{2} \right) = 0$$

$$\Rightarrow \dot{W}_{vc} = \dot{m} \cdot \left(h_i - h_e + \frac{V_i^2}{2} - \frac{V_e^2}{2} \right) \quad (5)$$

Calculamos el caudal másico como si se tratara de un gas ideal:

$$\dot{m} = \frac{V_1 \cdot A_1}{v_1} = \frac{PM \cdot P}{R \cdot T} V_1 A = \frac{(28,9 \text{ g/mol})(1\text{kg} / 1000 \text{ g})(10^5 \text{ N/m}^2)}{(8,314 \text{ J/Kmol})(293,15 \text{ K})} \cdot (6 \text{ m/s})(0,08 \text{ m}^2) = 0,5691 \text{ kg/s}$$

Hallamos la entalpía de los dos estados en una tabla termodinámica, p. e. [FluidPROP](#).

$$\left. \begin{matrix} T_i = 20^\circ\text{C} \\ P_i = 1 \text{ bar} \end{matrix} \right\} \Rightarrow h_i = 293,31 \text{ kJ/kg} \quad \left. \begin{matrix} T_e = 220^\circ\text{C} \\ P_e = 6 \text{ bar} \end{matrix} \right\} \Rightarrow h_e = 495,97 \text{ kJ/kg}$$

Si aproximamos a gas ideal caloríficamente perfecto en el intervalo de temperaturas, sería:


$$\left. \begin{matrix} h = u + pv = c_v T + \frac{R}{PM} T + cte. \\ c_p - c_v = \frac{R}{PM} = R_g \end{matrix} \right\} \Rightarrow h_i - h_e = c_p (T_i - T_e) = \underbrace{1,013}_{A \ 120^\circ\text{C}} \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} (-200 \text{ K}) = -202,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Véase que para un gas ideal, la entalpía resulta función exclusiva de la temperatura, en este caso media entre la entrada y la salida.

Hemos usado el calor específico en http://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d_156.html. Finalmente calculamos la potencia.

$$\dot{W}_{vc} = \dot{m} \cdot \left(h_i - h_e + \frac{V_i^2}{2} - \frac{V_e^2}{2} \right) = 0,5691 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left[\left(\frac{293,31 - 495,97}{-202,66 \text{ kJ/kg}} \right) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + \left(\frac{6^2}{2} - \frac{2^2}{2} \right) \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \right] = -106,228 \text{ W}$$

Puede comprobarse la buena aproximación que proporciona el modelo de gas ideal en este caso.

	Asignatura: Fuentes de Energía	PRACTICA 0
	UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID DPTO. INGENIERÍA TÉRMICA Y DE FLUIDOS, grupo ITEA.	

Asignación (calificación máxima)

- 1) Para cubrir la demanda energética de un edificio se requieren 280 MBTU por año,. Determine que cantidad de petróleo o de carbón se requiere para cubrir esta demanda. (0,75 puntos).
- 2) Una industria consume 100 MWh de electricidad al año. Esta electricidad proviene de una central térmica convencional que consume carbón. Determine cuantos barriles equivalentes de petróleo necesitan considerarse que equivalgan en energía primaria a ese consumo de electricidad. Use el rendimiento de conversión por defecto. (0,75 puntos).
- 3) A través de una válvula de expansión perfectamente aislada circula refrigerante R-22 a razón de 100 pies/min de velocidad media, las conexiones de la válvula son para tubo de 7/8 pulgadas de diámetro externo (0,045 pulgadas. de espesor de pared). La presión de entrada es de 250 psia (lbs/pulg² absoluta) y la caída de presión en la válvula es de 200 psia (lbs/pulg²). Si suponemos que el refrigerante entra en condiciones de saturación, se pide: calcular la temperatura de salida del refrigerante. Indique las hipótesis simplificativas que asuma. (2,5 puntos).
- 4) Cierta equipo necesita un intercambiador de calor de tubos concéntricos como el mostrado en la Fig 2. Por el circuito **(A-B)** de este intercambiador circulan 2 GPM (galones por minuto). En la sección de entrada **(A)** el agua se encuentra a 80°C y 2 bar de presión absoluta. En la sección de salida **(B)** la temperatura del agua es 30 °C y su presión 2 bar (se desprecia la caída de presión). Por el otro circuito (circuito 1-2) entra agua por la sección **(1)** a 10 °C y se espera que dicho fluido se caliente hasta alcanzar 25 °C, saliendo por la sección **(2)**. Si la geometría del equipo solo permite que el intercambiador mida como máximo 3 pies de longitud, determine si este intercambiador de calor es viable con las condiciones de entrada y salida dadas. (4 puntos).

Para la resolución de este problema asuma que no hay pérdidas de calor al exterior, que la densidad del agua es constante $\rho = 1.000 \text{ kg/m}^3$, coeficiente global convectivo $U = 30 \text{ W/m}^2\text{K}$ referido a la superficie exterior A del tubo y desprecie el salto térmico por la conducción de calor en el tubo. Así mismo para la ley de transferencia por convección en cambiadores de calor use la diferencia de temperaturas media logarítmica ([LMTD](#)) o [más aquí](#)) como la media efectiva de las diferencias de temperaturas para usar un U constante a lo largo del tubo.

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left[\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right]} = \frac{(T_A - T_1) - (T_B - T_2)}{\ln \left[\frac{(T_A - T_1)}{(T_B - T_2)} \right]}; \quad \dot{Q} = U \cdot A \cdot LMTD$$

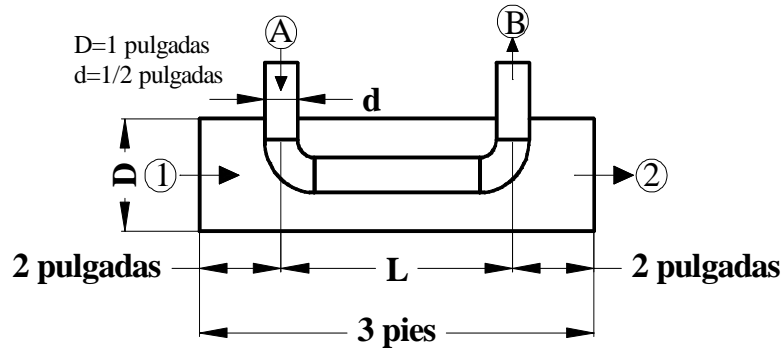


Fig 2 Intercambiador de calor

5) Con los resultados del problema anterior:

En caso de que el intercambiador **sea viable** ¿cuál será el flujo másico máximo (sección **A-B**) con el que podrá trabajar el intercambiador? y en el caso que **NO sea viable** ¿Cuál será la temperatura mínima con la que deberá salir el fluido por la sección (**2**) para cumplir con las especificaciones geométricas?. (2 puntos)