

Procesos y Máquinas Industriales II

Clase III- Procesos térmicos

Prof. Mariana Suarez

21 de agosto de 2018

Plan de la clase

- ▶ Termodinámica y calor: definiciones
- ▶ Modos de transferencia de calor. Generalidades.
- ▶ Principio de conservación de la energía

Termodinámica y calor

Termodinámica:

- ▶ Interacción entre el sistema y el medio por intercambio de energía (calor, trabajo)
- ▶ Proporciona información sobre estados *finales*

Objetivos:

- ▶ extender el estudio de la termodinámica a los modos de transferencia de calor.
- ▶ desarrollar ecuaciones para calcular velocidades de transferencia de calor.

Termodinámica y calor (cont.)

1. ¿Qué es calor?

Q es energía en tránsito debido a dif. de temperatura

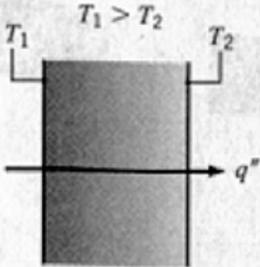
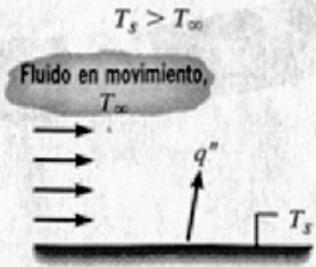
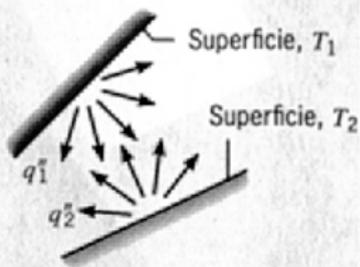
2. ¿Cómo se transfiere?

- ▶ Conducción: gradiente de temperatura en un medio estacionario. (fluído o sólido)
- ▶ Convección: entre superficie y fluído en movimiento, a diferentes temp.
- ▶ Radiación: emisión de energía por radiación electromagnética.

Termodinámica y calor: definiciones

Modos de transferencia de calor. Generalidades.

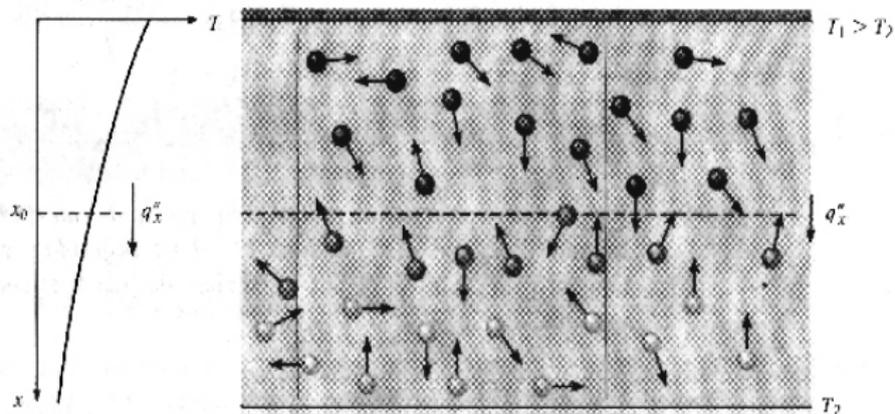
Principio de conservación de la energía

Conducción a través de un sólido o un fluido estacionario	Convección de una superficie a un fluido en movimiento	Intercambio neto de calor por radiación entre dos superficies
 <p>Diagram illustrating heat conduction through a solid block. The left face is at temperature T_1 and the right face is at T_2, with $T_1 > T_2$. A horizontal arrow labeled q'' indicates the direction of heat transfer through the block.</p>	 <p>Diagram illustrating convection from a surface to a moving fluid. The surface is at temperature T_s. The fluid above it is moving to the right and is at temperature T_∞. An arrow labeled q'' indicates the direction of heat transfer from the surface into the fluid.</p>	 <p>Diagram illustrating net heat exchange by radiation between two surfaces. The top surface is labeled "Superficie, T_1" and the bottom surface is labeled "Superficie, T_2". Arrows labeled q_1'' and q_2'' represent the radiative heat fluxes between the surfaces.</p>

Conducción

- ▶ Transferencia de energía desde las partículas más energéticas hacia las menos energéticas de una sustancia, debido a interacción entre partículas.
- ▶ Mecanismo físico: dado un gas donde hay grad de temp., la temperatura en un punto es la energía de las moléculas de gas próximas al mismo.

Conducción (cont.)



- ✓ Temp. mayores \rightarrow mayores energías moleculares.
- ✓ Choque de moléculas vecinas \rightarrow transf. desde las de mayor energía a las de menor.

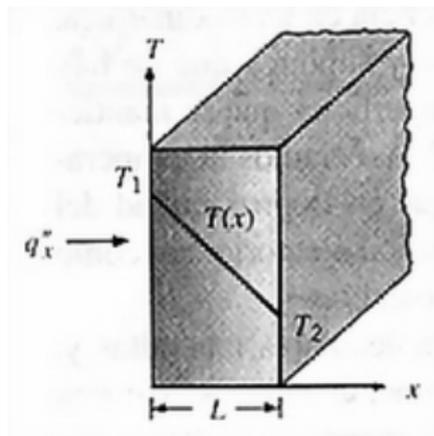
Conducción (cont.)

Ley de Fourier

Pared plana unidimensional:

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx}$$

- ▶ flujo de calor: q''_x [W/m^2], veloc. transf. Q en dirección x por $u.$ de área perpendicular a la direcc. de transf.
- ▶ conductividad térmica: k [$W/m.K$], característica del material de la pared.
- ▶ gradiente de temperatura: $\frac{dT}{dx}$, en dirección x .



Conducción (cont.)

En estado estacionario, el gradiente de temperatura es lineal.

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L}$$

Entonces

$$q''_x = k \frac{\Delta T}{L} \text{ con } \Delta T = T_1 - T_2$$

Velocidad de transf. de Q por conducción

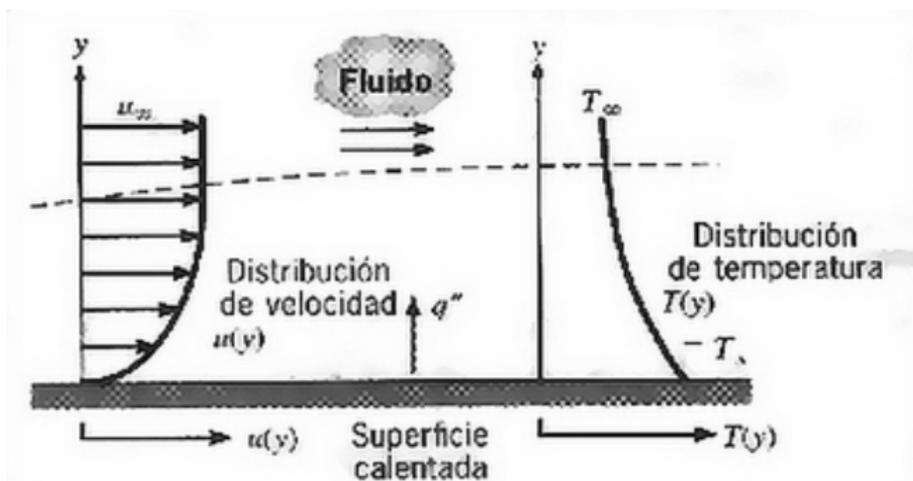
A través de pared plana de área A : q_x [W]

$$q_x = q''_x \cdot A$$

Convección

- ▶ Comprende dos mecanismos
 - ▶ mov. molecular al azar (difusión).
 - ▶ mov. macroscópico del fluido

Transferencia total de calor debida a superposición entre ambos mecanismos.



Convección

✓ Ecuación de veloc. , transf. de calor por convección
(Ley de Newton para el enfriamiento)

$$q'' = h(T_s - T_\infty)$$

✓ h : coef. de transf. de Q por convección.

Depende de las condic. de la capa límite, determinadas por la geometría de la sup. y la naturaleza del mov. del fluido.

Radiación

Radiación térmica:

- ▶ Energía emitida por la materia a temperatura finita.
- ▶ Atribuída a cambios en las config. electrónicas de los átomos que constituyen las moléculas.
- ▶ La energía del campo de radiación es transportada por ondas electromagnéticas.
- ▶ No requiere de un medio, se transfiere con mayor eficiencia en el vacío.

Radiación (cont.)

Máxima Potencia emisiva:

$$E_n = \sigma T_s^4$$

(radiador ideal o cuerpo negro)

. donde

- ▶ σ : constante de Stefan-Boltzmann [$W/m^2.K^4$]
- ▶ T_s : temperatura absoluta de la superficie

Radiación (cont.)

Densidad de flujo de calor emitida por un cuerpo real:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4$$

donde

ε : emisividad, propiedad radiactiva de la superficie. $0 \leq \varepsilon \leq 1$

Irradiación (G):

Radiación incidente en una superficie desde el medio.

Porción absorbida por la superficie por u. de área superf.:

$$G_{abs} = \alpha G$$

donde

α : absorptividad, propiedad radiactiva de la superficie.

$0 \leq \alpha \leq 1$

Radiación (cont.)

Caso especial:

Intercambio de radiación entre una pequeña superficie a T_s y una superficie mucho mayor a T_{amb} , isotérmica, que la rodea. La irradiación puede aproximarse como la emisión de un cuerpo negro a T_{amb} .

$$G = \sigma T_{amb}^4$$

Suponemos $\alpha = \varepsilon$.

$$q''_{rad} = \frac{q}{A} = \varepsilon E_n(T_s) - \alpha G = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{amb}^4)$$

Radiación (cont.)

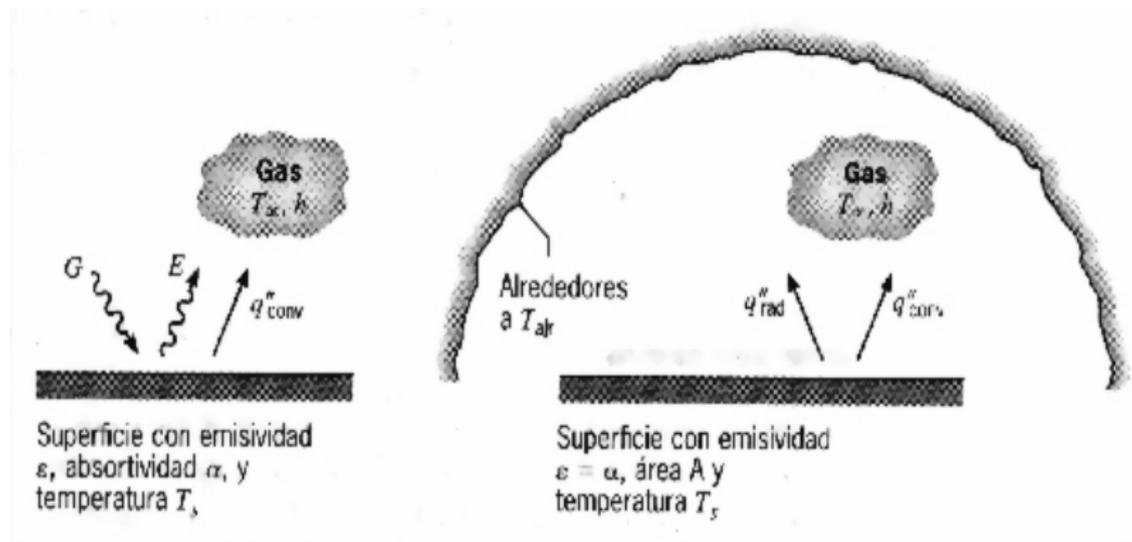
Para modelar la radiación en forma análoga a la convección, la ecuación anterior suele "linealizarse".

$$q_{rad} = h_r A (T_s - T_{amb})$$

Donde el coeficiente de transferencia de calor por radiación h_r ha sido definido como sigue.

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_s^2 + T_{amb}^2) (T_s + T_{amb})$$

Precaución: h_r es fuertemente dependiente de la temperatura.



Radiación (cont.)

En las figuras anteriores, para considerar la transferencia de calor total desde la superficie:

$$q = q_{rad} + q_{conv} = \varepsilon \sigma A \left(T_s^4 - T_{amb}^4 \right) + hA(T_s - T_\infty)$$

Principio de conservación de la energía

Aplicación del *Primer principio de la Termodinámica* a la transferencia de calor

Conservación de la energía en un volumen de control: Pasos.

1. Identificación del volumen de control
2. Elección de una base de tiempo:

- ▶ instantánea: balance entre tasas de energía. [J/seg]

$$\dot{E}_e + \dot{E}_g - \dot{E}_s = \frac{dE_a}{dt} = \dot{E}_a$$

- ▶ a lo largo de un Δt : balance entre cantidades de energía. [J]

$$E_e + E_g - E_s = \Delta E_a$$

Conservación de la energía en un volumen de control



- ▶ Térm. de entrada y salida: fenómenos de superficie. (proporc. al área superf.)
- ▶ Térm. de gener. de energía: fenómeno volumétrico (proporc. al vol. de control)
- ▶ Térm. de acumulación: fenómeno volumétrico

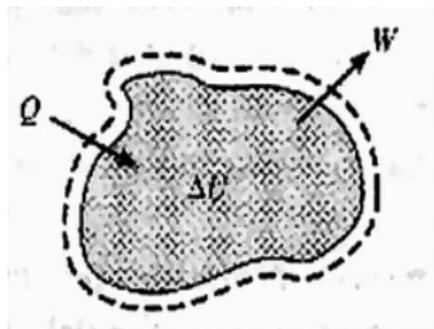
$$\Delta E_a = \Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p$$

Aplicaciones del primer principio de la Termodinámica

Aplicación del Primer principio de la Termodinámica a distintos sistemas.

Las ecuaciones de balance pueden escribirse:

Sistema cerrado, masa cte.



Aplicaciones del primer principio de la Termodinámica (cont.)

1. Sin generación de energía ($E_g = 0$)
2. ΔE_c , ΔE_p despreciables.

en un Δt

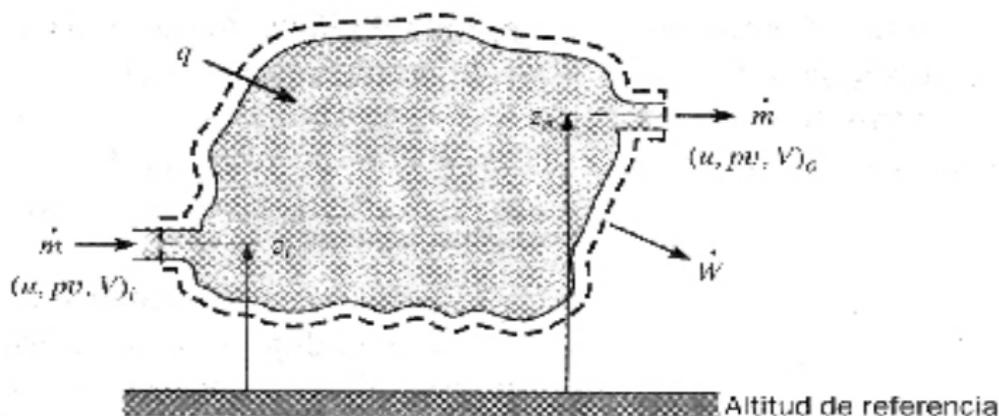
$$Q - W = \Delta U$$

en un instante t

$$q - \dot{W} = \frac{dU}{dt}$$

Aplicaciones del primer principio de la Termodinámica (cont.)

Sistema abierto.

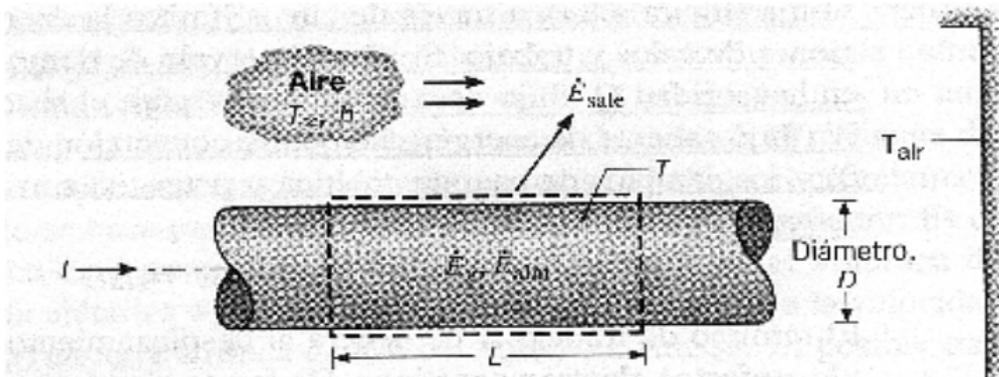


Aplicaciones del primer principio de la Termodinámica (cont.)

1. Sin generación de energía ($E_g = 0$)
2. En estado estacionario ($\dot{E}_a = 0$)

$$\dot{m} \left(u + pv + \frac{V^2}{2} + gz \right)_e - \dot{m} \left(u + pv + \frac{V^2}{2} + gz \right)_s + \dot{q} - \dot{W} = 0$$

Ejemplo: Aplicación a una barra conductora



- ▶ barra conductora larga, diámetro D .
- ▶ Resistencia eléctrica por u. de long. R'_e
- ▶ Cond. inicial: equilibrio térmico con el ambiente.
- ▶ A un cierto t , pasa una corriente eléctrica I

Derivar ecuación para la variación de temperatura a lo largo del tiempo

Ejemplo: Aplicación a una barra conductora (cont.)

Hipótesis:

1. $\forall t$ la temp. de la barra es uniforme.
2. Propiedades constantes (ρ , c , $\varepsilon = \alpha$)
3. Intercambio por radiación entre la sup. ext. de la barra y el ambiente:
entre sup. pequeña y medio que la rodea.

Ejemplo: Aplicación a una barra conductora (cont.)

Análisis:

- ▶ Transf. de calor por radiación y convección.
- ▶ Generación de energía, Ley de Ohm
- ▶ Variación de energía térmica almacenada.
- ▶ Ec. instantánea

Ecuación de energía:

$$\dot{E}_e + \dot{E}_g - \dot{E}_s = \dot{E}_a \Rightarrow \dot{E}_g - \dot{E}_s = \dot{E}_a$$

Ejemplo: Aplicación a una barra conductora (cont.)

Identificación de los términos de la ecuación:

$$\dot{E}_g = I^2 R'_e L$$

$$\dot{E}_s = h(\pi DL)(T - T_\infty) + \varepsilon\sigma(\pi DL)(T^4 - T_{amb}^4)$$

$$\dot{E}_a = \frac{dU_t}{dt} = \frac{d}{dt}(\rho VcT)$$

$$V = \left(\frac{\pi D^2}{4}\right)L$$

Ejemplo: Aplicación a una barra conductora (cont.)

Sustituyendo las ec. en el balance de energía,

$$I^2 R'_e L - h(\pi DL)(T - T_\infty) - \varepsilon \sigma (\pi DL)(T^4 - T_{amb}^4) = \rho c \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) L \frac{dT}{dt}$$

Entonces

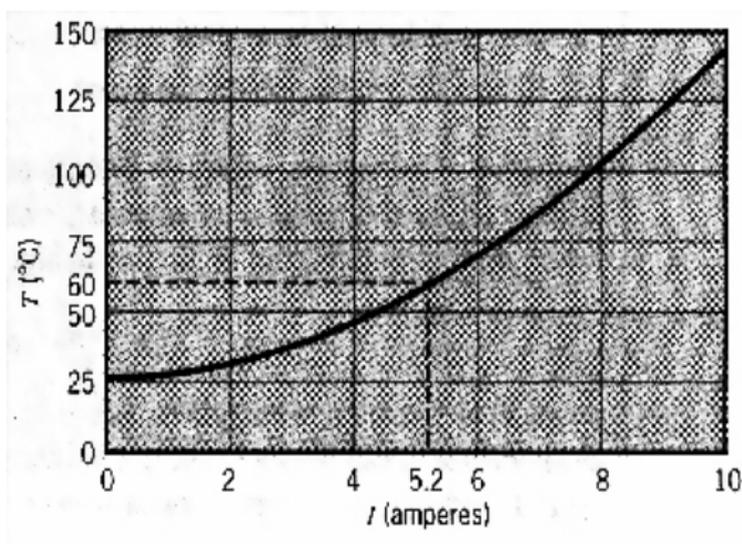
$$\frac{I^2 R'_e - h(\pi D)(T - T_\infty) - \varepsilon \sigma (\pi D)(T^4 - T_{amb}^4)}{\rho c \left(\frac{\pi D^2}{4} \right)} = \frac{dT}{dt}$$

En el estado estacionario, $\frac{dT}{dt} = 0$

$$h(\pi D)(T - T_\infty) + \varepsilon \sigma (\pi D)(T^4 - T_{amb}^4) = I^2 R'_e$$

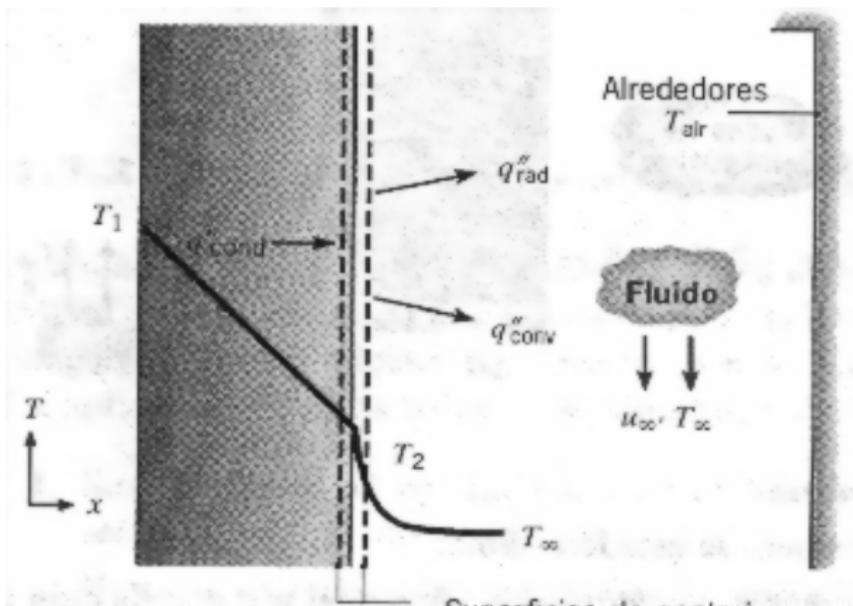
Ejemplo: Aplicación a una barra conductora (cont.)

Gráfica de la temperatura alcanzada por la barra en estado estacionario en función de la intensidad de corriente circulante



El balance de energía superficial

Consideremos una superficie de control como la señalada en la figura.



El balance de energía superficial (cont.)

Conservación de la energía en la superficie de control

$$\dot{E}_e - \dot{E}_s = 0$$

De donde se obtiene

$$q''_{cond} - q''_{conv} - q''_{rad} = 0$$