

UC | Chile

Termodinámica (FIS1523)

Balance de entropía

Felipe Isaule
felipe.isaule@uc.cl

Miércoles 11 de Junio de 2025

Resumen clases anteriores

- Revisamos el **trabajo** de un **flujo estacionario reversible**

$$w_{\text{rev}} = - \int_{P_1}^{P_2} \nu dP - \Delta e.c. - \Delta e.p.$$

- Enunciamos **eficiencias isentrópicas** para diversos dispositivos de **flujo estacionario adiabáticos**.

Clase 25: Balance de entropía

- Balance de entropía.
- Transferencia de entropía.

- Bibliografía recomendada:
 - Cengel (7-13).

Clase 25: Balance de entropía

- **Balance de entropía.**
- Transferencia de entropía.

Entropía y segunda ley

- La **entropía** es una **medida** de **desorden** molecular o **aleatoriedad** de un sistema.
- La **segunda ley** establece que la **entropía puede crearse** pero **no destruirse**.
- Por el **principio de incremento de entropía** se tiene que:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Entropía} \\ \text{total de} \\ \text{entrada} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Entropía} \\ \text{total de} \\ \text{salida} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Entropía} \\ \text{total} \\ \text{generada} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Cambio en la} \\ \text{entropía total} \\ \text{del sistema} \end{array} \right)$$

Balance de entropía

- La ecuación anterior la podemos escribir como

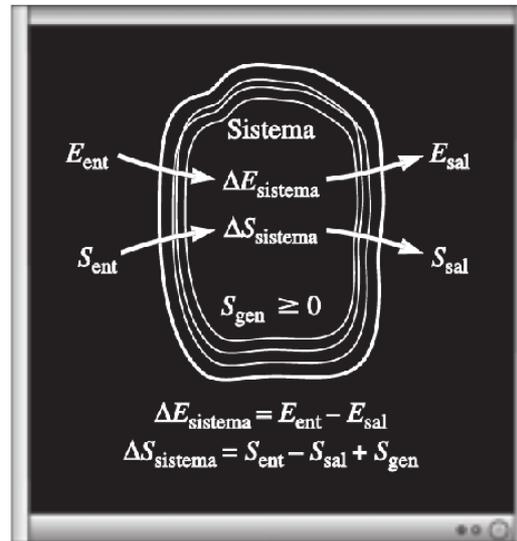
$$S_{\text{entrada}} - S_{\text{salida}} + S_{\text{gen}} = \Delta S_{\text{sistema}},$$

Transferencia
de entropía

Entropía
generada

Cambio de
entropía

- Esta ecuación se conoce como **balance de entropía**.



Balance de entropía

- El **balance de energía** se puede escribir en **forma de tasa**:

$$\dot{S}_{\text{entrada}} - \dot{S}_{\text{salida}} + \dot{S}_{\text{gen}} = dS_{\text{sistema}}/dt.$$

- En **unidad de masa**:

$$s_{\text{entrada}} - s_{\text{salida}} + s_{\text{gen}} = \Delta s_{\text{sistema}}.$$

- El término S_{gen} **sólo** incluye la **entropía generada dentro de las fronteras del sistema**.
- Es decir, un sistema con $S_{\text{gen}}=0$ es **internamente reversible**, pero no necesariamente totalmente reversible.

Cambio de entropía

- La **entropía**, a diferencia de la energía, **no existe en diversas formas**.
- El **cambio de entropía** es simplemente:

$$\Delta S_{\text{sistema}} = S_{\text{final}} - S_{\text{inicial}} = S_2 - S_1.$$

- Notar que **cuando las propiedades** de un sistema **no son uniformes**, la **entropía** se puede determinar a partir de

$$S_{\text{sistema}} = \int s \delta m = \int_V s \rho dV.$$

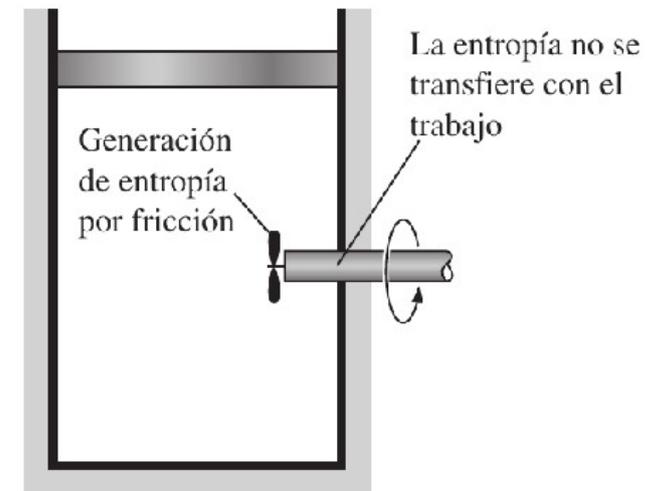
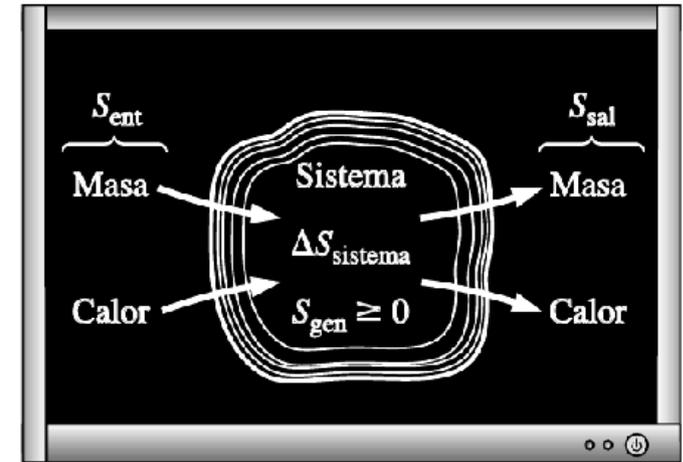
Clase 25: Balance de entropía

- Balance de entropía.
- **Transferencia de entropía.**

Transferencia de entropía

- La entropía puede transferirse por dos mecanismos:
 - Transferencia de calor.
 - Flujo másico.
- No puede transferirse por medio de trabajo.

$$S_{\text{trabajo}} = 0.$$

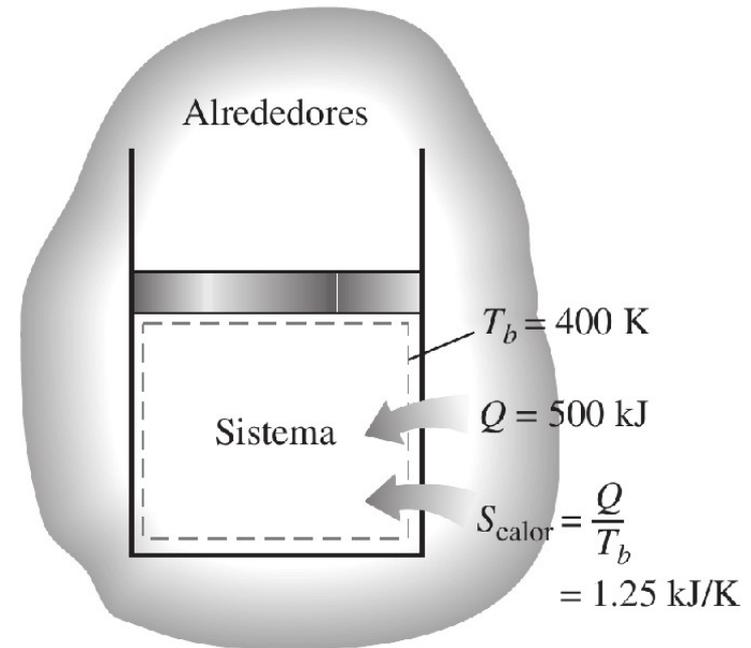


Transferencia de calor

- El **calor** se puede considerar como **energía desorganizada**.
- La **transferencia de calor hacia un sistema aumenta su entropía**.
- La **transferencia de entropía por medio de calor** está dada por

$$S_{\text{calor}} = \frac{Q}{T},$$

donde T es la **temperatura de la frontera**.



Transferencia de calor

- Debido a que T es siempre positivo, la **entropía** tiene el **mismo signo** que el **calor**.
- Es decir, la **entropía aumenta** en la **dirección** que se **transfiere el calor**.
- Cuando la **temperatura no es constante**, podemos escribir

$$S_{\text{calor}} = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \approx \sum_k \frac{Q_k}{T_k},$$

donde k denota un sitio en la frontera.

- De estas ecuaciones, es fácil ver que **sistemas adiabáticos no pueden intercambiar entropía** por medio de **calor**.

Sistemas cerrados

- El **cambio de entropía** en un **sistema cerrado** sólo se debe a **intercambios de calor** y **generación de entropía** dentro de las fronteras.
- El **balance de entropía** lo podemos escribir como

$$\sum_k \frac{Q_k}{T_k} + S_{\text{gen}} = \Delta S_{\text{sistema}} = S_2 - S_1.$$

- Para un **proceso adiabático** en un **sistema cerrado**:

$$S_{\text{gen}} = \Delta S_{\text{sistema}}.$$

Sistemas cerrados

- Notar que un **sistema y sus alrededores** se puede **considerar** como un **sistema adiabático** en su **conjunto**.
- En este caso, el **balance de energía** se puede escribir como

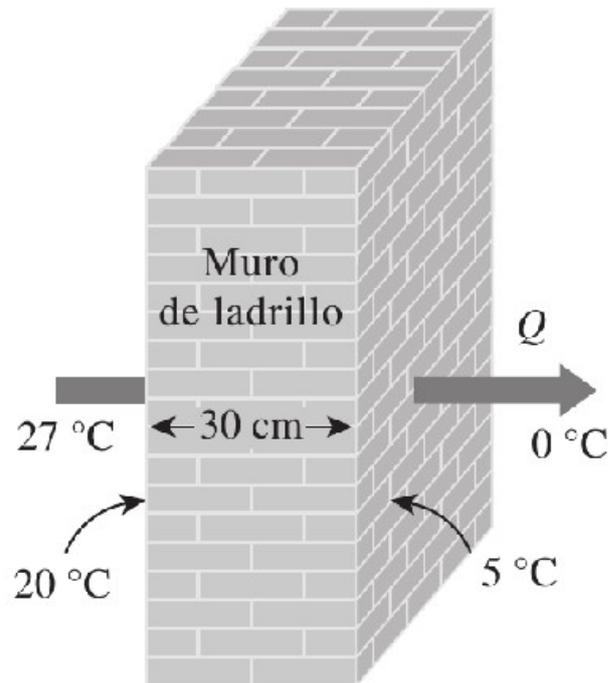
$$S_{\text{gen}} = \Delta S_{\text{sistema}} + \Delta S_{\text{alrededores}},$$

donde $\Delta S_{\text{sistema}} = m(s_2 - s_1)$ y

$$\Delta S_{\text{alrededores}} = Q_{\text{alrededores}} / T_{\text{alrededores}}.$$

Ejemplo 1:

- En una casa ocurre **transferencia estacionaria de calor** a través de un **muro de ladrillo** de **5x7 m** cuyo **espesor** es de **30 cm**. En un día en el que la **temperatura exterior** es de **0 °C**, la **casa se mantiene a 27 °C**, mientras que las **temperaturas** de las **superficies interior y exterior del muro** han sido medidas en **20 °C y 5 °C**, respectivamente, con una **tasa de transferencia de calor** a través de la pared de **1035 W**. Determine la **tasa de generación de entropía en el muro** y la de **generación de entropía total** asociada con este proceso de transferencia de calor.



Ejemplo 1:

- En una casa ocurre **transferencia estacionaria de calor** a través de un **muro de ladrillo** de **5x7 m** cuyo **espesor** es de **30 cm**. En un día en el que la **temperatura exterior** es de **0 °C**, la **casa se mantiene a 27 °C**, mientras que las **temperaturas** de las **superficies interior y exterior del muro** han sido medidas en **20 °C y 5 °C**, respectivamente, con una **tasa de transferencia de calor** a través de la pared de **1035 W**. Determine la **tasa de generación de entropía en el muro** y la de **generación de entropía total** asociada con este proceso de transferencia de calor.

Podemos considerar el muro como un sistema cerrado.

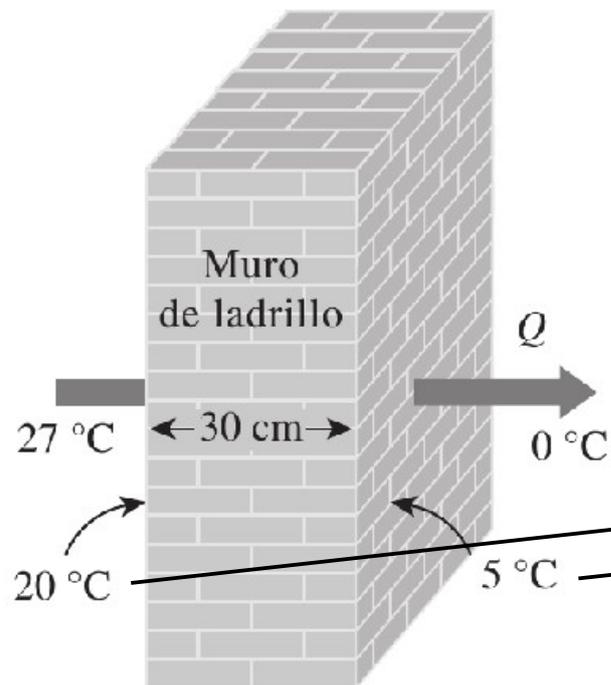
El balance de entropía para el **muro** en forma de tasa:

$$\dot{S}_{\text{entrada}} - \dot{S}_{\text{salida}} + \dot{S}_{\text{gen}} = \cancel{dS_{\text{sistema}}/dt}^0$$

$$(\dot{Q}/T)_{\text{entrada}} - (\dot{Q}/T)_{\text{salida}} + \dot{S}_{\text{gen}} = 0$$

$$\frac{1035 \text{ W}}{(273 + 20)^\circ\text{K}} + \frac{1035 \text{ W}}{(273 + 5)^\circ\text{K}} + \dot{S}_{\text{gen}} = 0$$

$$\rightarrow \boxed{\dot{S}_{\text{gen,muro}} = 0.191 \text{ W}/^\circ\text{K}}$$



Ejemplo 1:

- En una casa ocurre **transferencia estacionaria de calor** a través de un **muro de ladrillo** de **5x7 m** cuyo **espesor** es de **30 cm**. En un día en el que la **temperatura exterior** es de **0 °C**, la **casa se mantiene** a **27 °C**, mientras que las **temperaturas** de las **superficies interior y exterior del muro** han sido medidas en **20 °C y 5 °C**, respectivamente, con una **tasa de transferencia de calor** a través de la pared de **1035 W**. Determine la **tasa de generación de entropía en el muro** y la de **generación de entropía total** asociada con este proceso de transferencia de calor.

Ahora realizamos el balance de entropía del **muro y sus alrededores**.

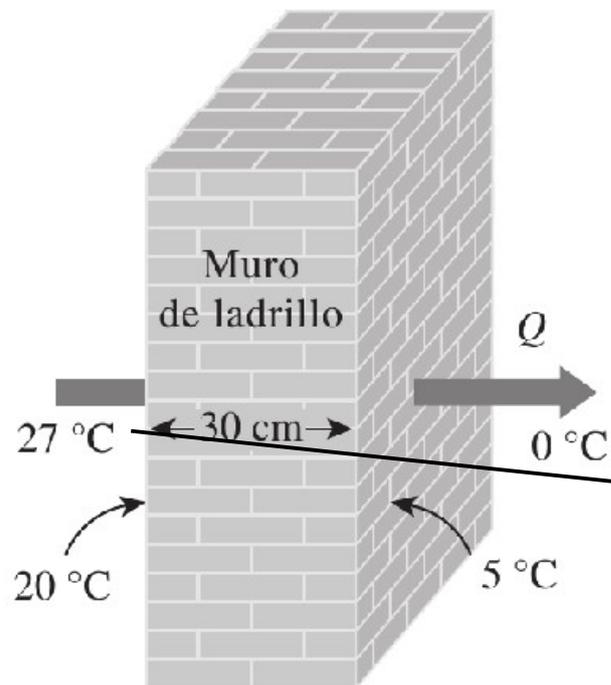
El único cambio son las temperaturas:

$$\dot{S}_{\text{entrada}} - \dot{S}_{\text{salida}} + \dot{S}_{\text{gen}} = \cancel{dS_{\text{sistema}}/dt}$$

$$(\dot{Q}/T)_{\text{entrada}} - (\dot{Q}/T)_{\text{salida}} + \dot{S}_{\text{gen}} = 0$$

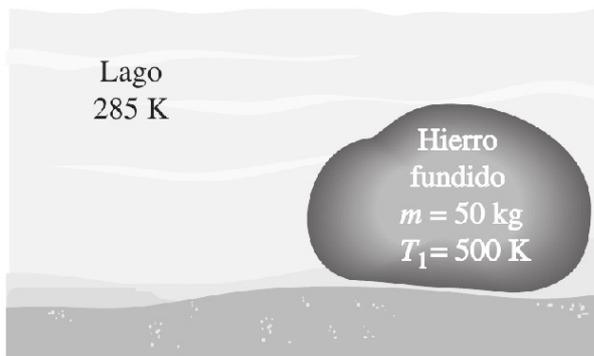
$$\frac{1035 \text{ W}}{(273 \rightarrow 27)^\circ\text{K}} + \frac{1035 \text{ W}}{(273 \rightarrow 0)^\circ\text{K}} + \dot{S}_{\text{gen}} = 0$$

$$\rightarrow \boxed{\dot{S}_{\text{gen,total}} = 0.341 \text{ W}/^\circ\text{K}}$$



Ejemplo 2:

- Un **bloque de hierro fundido** de **50 kg** a **500 °K** es lanzado hacia un **lago grande** que se encuentra a una **temperatura** de **285 °K**. El **bloque de hierro** eventualmente **alcanza el equilibrio térmico** con el **agua del lago**. Si se supone un **calor específico promedio** de **0.45 kJ/kg°K** para el **hierro**, determine
 - El **cambio de entropía** del **bloque de hierro**.
 - El **cambio de entropía** del **agua del lago**.
 - La **entropía generada** durante este proceso.

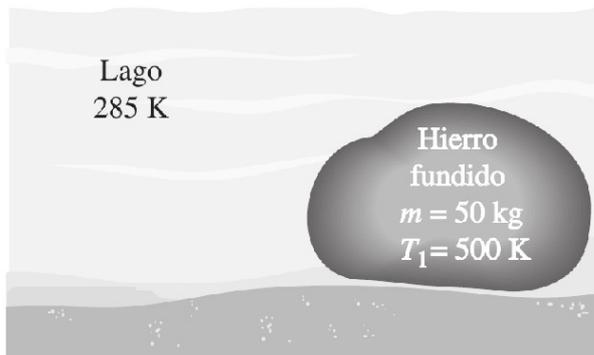


Ejemplo 2:

- Un **bloque de hierro fundido** de **50 kg** a **500 °K** es lanzado hacia un **lago grande** que se encuentra a una **temperatura** de **285 °K**. El **bloque de hierro** eventualmente **alcanza el equilibrio térmico** con el agua del lago. Si se supone un **calor específico promedio** de **0.45 kJ/kg°K** para el **hierro**, determine
 - El **cambio de entropía del bloque de hierro**.

Recordando que el bloque es un sólido:

$$\begin{aligned}\Delta S_{\text{sistema}} &= mc_{\text{prom}} \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \\ &= 50 \text{ kg} \cdot 0.45 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{°K}} \ln \left(\frac{285 \text{ °K}}{500 \text{ °K}} \right)\end{aligned}$$



$$\longrightarrow \boxed{\Delta S_{\text{sistema}} = -12.65 \text{ kJ}/\text{°K}}$$

Ejemplo 2:

- Un **bloque de hierro fundido** de **50 kg** a **500 °K** es lanzado hacia un **lago grande** que se encuentra a una **temperatura** de **285 °K**. El **bloque de hierro** eventualmente **alcanza el equilibrio térmico** con el agua del lago. Si se supone un **calor específico promedio** de **0.45 kJ/kg°K** para el **hierro**, determine
 - El **cambio de entropía** del **agua** del lago.

Para calcular Q/T primero debemos encontrar el calor transferido al lago. Utilizando conservación de la energía para el bloque de hierro:

$$E_{\text{entrada}} - E_{\text{salida}} = \Delta E_{\text{sistema}}$$

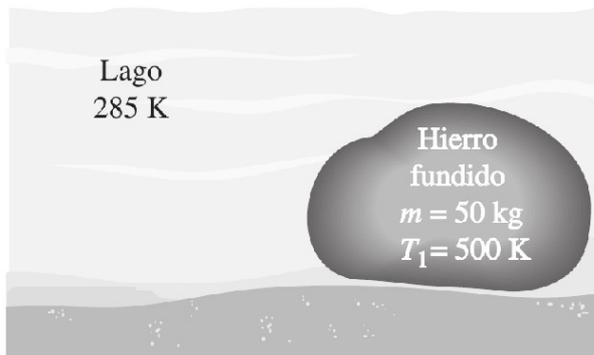
$$-Q_{\text{salida}} = \Delta U = mc_{\text{prom}}(T_2 - T_1)$$

$$-Q_{\text{salida}} = 50 \text{ kg} \cdot 0.45 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}} (285 - 500) ^\circ\text{K}$$

$$\longrightarrow Q_{\text{salida}} = 4838 \text{ kJ}$$

Entonces, el cambio de entropía del lago:

$$\Delta S_{\text{lago}} = \frac{Q_{\text{lago}}}{T_{\text{lago}}} = \frac{4838 \text{ kJ}}{285 ^\circ\text{K}} \longrightarrow \boxed{\Delta S_{\text{lago}} = 16.97 \frac{\text{kJ}}{^\circ\text{K}}}$$



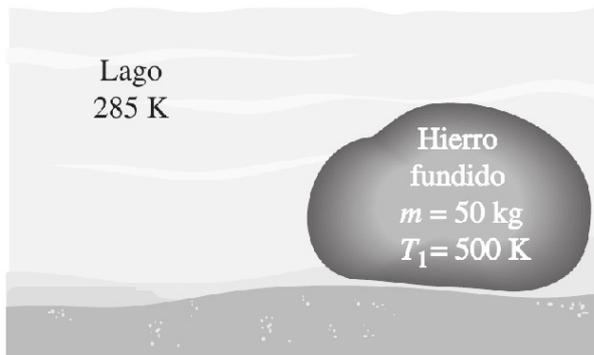
Ejemplo 2:

- Un **bloque de hierro fundido** de **50 kg** a **500 °K** es lanzado hacia un **lago grande** que se encuentra a una **temperatura de 285 °K**. El **bloque de hierro** eventualmente **alcanza el equilibrio térmico con el agua del lago**. Si se supone un **calor específico promedio de 0.45 kJ/kg°K** para el **hierro**, determine
 - La **entropía generada** durante este proceso.

Para encontrar la entropía generada simplemente podemos sumar los cambios de entropía:

$$\begin{aligned} S_{\text{gen}} &= \Delta S_{\text{sistema}} + \Delta S_{\text{lago}} \\ &= (-12.65 + 16.97) \text{ kJ}/^{\circ}\text{K} \end{aligned}$$

$$\longrightarrow \boxed{S_{\text{gen}} = 4.32 \text{ kJ}/^{\circ}\text{K}}$$



Flujo másico

- La **masa contiene tanto energía como entropía**.
- Cuando una **masa m entra o sale de un sistema**, con una **entropía específica s** , se transfiere:

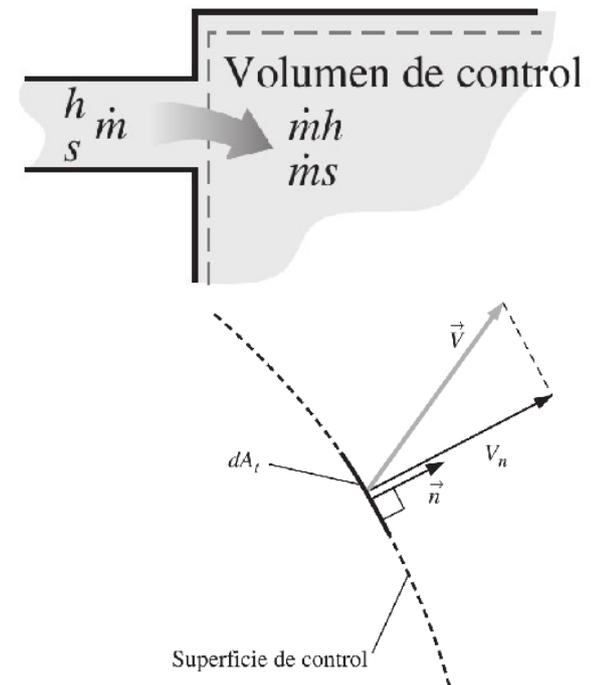
$$S_{\text{masa}} = ms,$$

- Cuando las **propiedades de la masa cambian durante el proceso**, utilizamos

$$\dot{S}_{\text{masa}} = \int_{A_t} s \rho v_n dA_t,$$

$$S_{\text{masa}} = \int s \delta m = \int \dot{S}_{\text{masa}} dt.$$

- **Sólo sistemas abiertos pueden intercambiar entropía por flujo másico.**



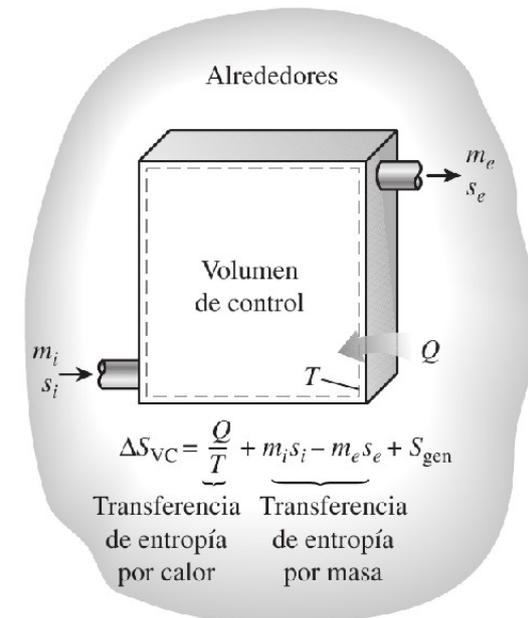
Volúmenes de control

- En un **volumen de control** debemos incluir **intercambio de entropía por flujo másico**.
- El **balance de entropía** queda

$$\sum \frac{Q_k}{T_k} + \sum m_i s_i - \sum m_e s_e + S_{\text{gen}} = (S_2 - S_1)_{\text{CV}},$$

y en forma de tasa

$$\sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k} + \sum \dot{m}_i s_i - \sum \dot{m}_e s_e + \dot{S}_{\text{gen}} = \frac{dS_{\text{SV}}}{dt}.$$



Flujo estacionario

- En un **flujo estacionario** la **tasa de entropía** se mantiene **constante**. Entonces:

$$\dot{S}_{\text{gen}} = \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_i s_i - \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k}.$$

- Si además hay **corriente única**:

$$\dot{S}_{\text{gen}} = \dot{m}(s_e - s_i) + \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k}.$$

- Entonces, si además el flujo es **adiabático**:

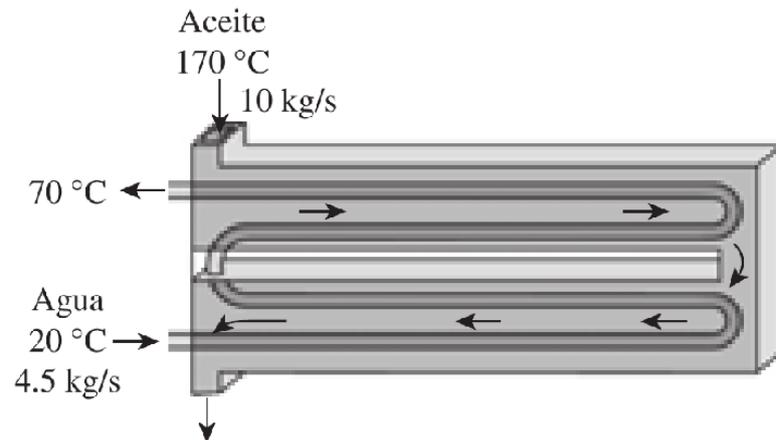
$$\dot{S}_{\text{gen}} = \dot{m}(s_e - s_i).$$

- Esto indica que si el flujo es **adiabático y reversible**, entonces.

$$s_e = s_i.$$

Ejemplo 3:

- Un intercambiador de calor bien aislado, de coraza y tubos, se usa para calentar agua ($c_p=4.18 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$) en los tubos, de 20°C a 70°C , a razón de 4.5 kg/s . El calor lo suministra un aceite caliente ($c_p=2.30 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$) que entra a la coraza a 170°C a razón de 10 kg/s . Despreciando cualquier pérdida de calor del intercambiador, determine:
 - La temperatura de salida del aceite.
 - La tasa de generación de entropía en el intercambiador de calor.



Ejemplo 3:

- Un intercambiador de calor bien aislado, de coraza y tubos, se usa para calentar agua ($c_P=4.18 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$) en los tubos, de 20°C a 70°C , a razón de 4.5 kg/s . El calor lo suministra un aceite caliente ($c_P=2.30 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$) que entra a la coraza a 170°C a razón de 10 kg/s . Despreciando cualquier pérdida de calor del intercambiador, determine:
 - La temperatura de salida del aceite.

La tasa de calor transferido al agua:

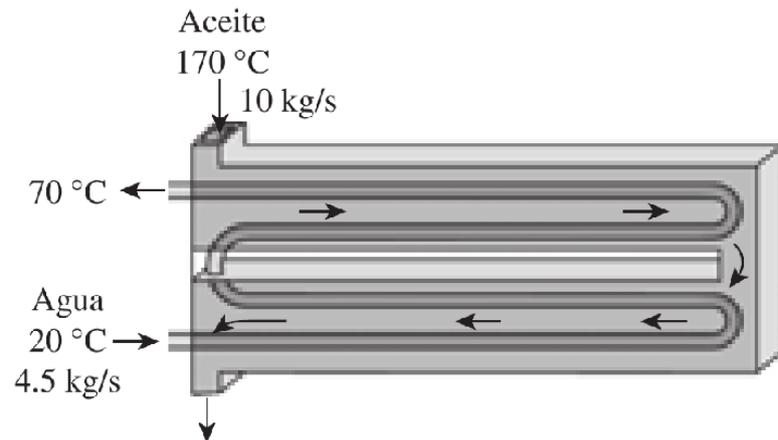
$$\begin{aligned}\dot{Q}_{\text{agua}} &= [\dot{m}c_P(T_2 - T_1)]_{\text{agua}} \\ &= 4.5 \frac{\text{kg}}{\text{s}} 4.18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{K}} (70 - 20)^\circ\text{K} \\ &= 940.5 \text{ W}\end{aligned}$$

Se transfiere calor del aceite al agua:

$$\dot{Q}_{\text{aceite}} = -\dot{Q}_{\text{agua}}$$

Por otra parte, esta tasa cumple:

$$\dot{Q}_{\text{aceite}} = [\dot{m}c_P(T_2 - T_1)]_{\text{aceite}}$$



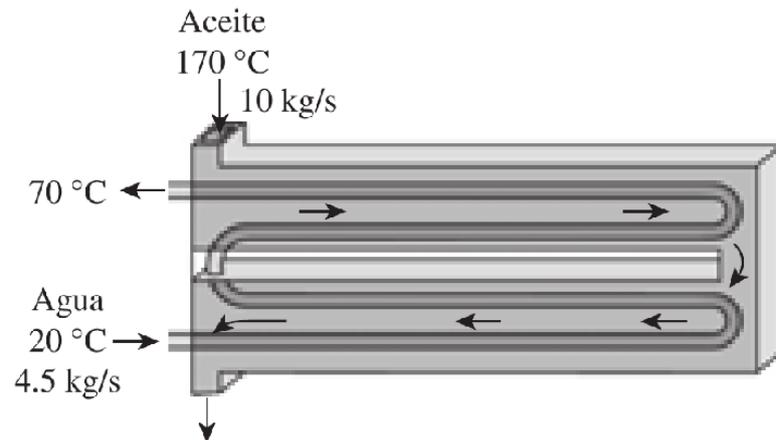
Ejemplo 3:

- Un intercambiador de calor bien aislado, de coraza y tubos, se usa para calentar agua ($c_P=4.18 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$) en los tubos, de 20°C a 70°C , a razón de 4.5 kg/s . El calor lo suministra un aceite caliente ($c_P=2.30 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$) que entra a la coraza a 170°C a razón de 10 kg/s . Despreciando cualquier pérdida de calor del intercambiador, determine:
 - La temperatura de salida del aceite.

Despejando T_2 del aceite: $\dot{Q}_{\text{aceite}} = -\dot{Q}_{\text{agua}}$

$$T_{2,\text{aceite}} = -\frac{\dot{Q}_{\text{agua}}}{\dot{m}_{\text{aceite}}c_{P,\text{aceite}}} + T_{1,\text{aceite}}$$
$$= \frac{-940.5 \text{ kW}}{10 \frac{\text{kg}}{\text{s}} 2.3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{K}}} + 170^\circ\text{C}$$

$$\longrightarrow \boxed{T_{2,\text{aceite}} = 120.1^\circ\text{C}}$$



Ejemplo 3:

- Un intercambiador de calor bien aislado, de coraza y tubos, se usa para calentar agua ($c_p=4.18 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$) en los tubos, de 20°C a 70°C , a razón de 4.5 kg/s . El calor lo suministra un aceite caliente ($c_p=2.30 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$) que entra a la coraza a 170°C a razón de 10 kg/s . Despreciando cualquier pérdida de calor del intercambiador, determine:
 - La tasa de generación de entropía en el intercambiador de calor.

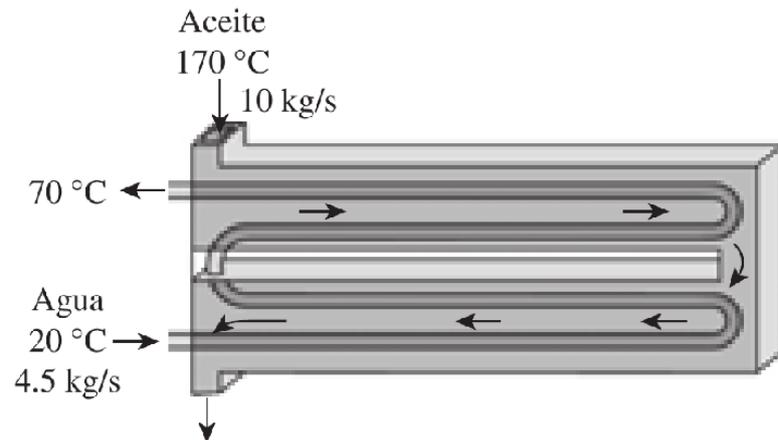
El balance de las tasas de entropía:

Flujo estacionario

$$\dot{S}_{\text{entrada}} - \dot{S}_{\text{salida}} + \dot{S}_{\text{gen}} = \cancel{dS_{\text{sistema}}/dt}.$$

Al tomar el **sistema completo** (flujo de agua y aceite) no hay transferencia de entropía por calor. Sólo hay transferencia de entropía por flujo másico:

$$\longrightarrow \dot{S}_{\text{gen}} = [\dot{m}(s_2 - s_1)]_{\text{agua}} + [\dot{m}(s_2 - s_1)]_{\text{aceite}}$$



Ejemplo 3:

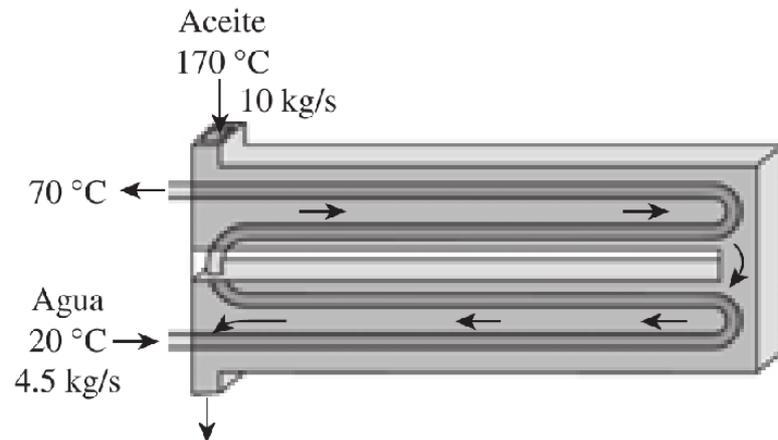
- Un intercambiador de calor bien aislado, de coraza y tubos, se usa para calentar agua ($c_P=4.18 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$) en los tubos, de 20°C a 70°C , a razón de 4.5 kg/s . El calor lo suministra un aceite caliente ($c_P=2.30 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$) que entra a la coraza a 170°C a razón de 10 kg/s . Despreciando cualquier pérdida de calor del intercambiador, determine:
 - La tasa de generación de entropía en el intercambiador de calor.

Ahora utilizamos que los líquidos son sustancias incompresibles:

$$\Delta s = c_{\text{prom}} \ln(T_2/T_1)$$

Entonces:

$$\begin{aligned} \dot{S}_{\text{gen}} &= \left[\dot{m} c_P \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \right]_{\text{agua}} + \left[\dot{m} c_P \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \right]_{\text{aceite}} \\ &= 4.5 \frac{\text{kg}}{\text{s}} 4.18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \ln \left(\frac{273 + 70}{273 + 20} \right) \\ &\quad + 10 \frac{\text{kg}}{\text{s}} 2.3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \ln \left(\frac{273 + 129.1}{273 + 170} \right) \end{aligned}$$



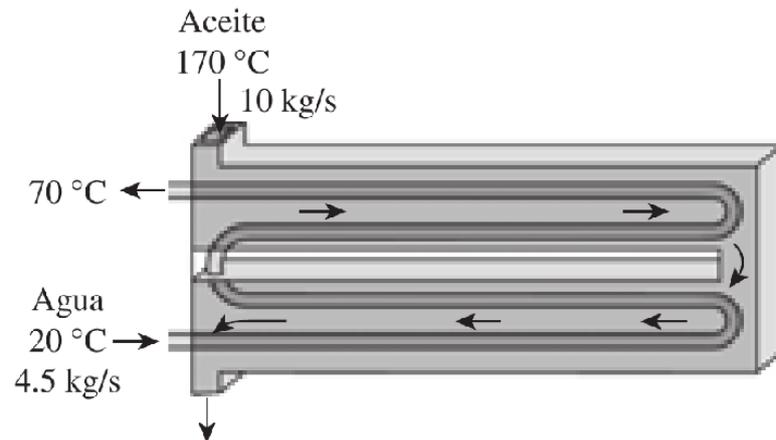
Ejemplo 3:

- Un intercambiador de calor bien aislado, de coraza y tubos, se usa para calentar agua ($c_p=4.18 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$) en los tubos, de 20°C a 70°C , a razón de 4.5 kg/s . El calor lo suministra un aceite caliente ($c_p=2.30 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$) que entra a la coraza a 170°C a razón de 10 kg/s . Despreciando cualquier pérdida de calor del intercambiador, determine:
 - La tasa de generación de entropía en el intercambiador de calor.

Se obtiene:

$$\longrightarrow \boxed{\dot{S}_{\text{gen}} = 0.736 \text{ kW}/^\circ\text{K}}$$

* Si hay confusión con los signos durante el desarrollo, es importante recordar que la entropía generada debe ser positiva.



Conclusiones

- Enunciamos el **balance de entropía**.
- Vimos las formas de **transferencia de entropía**.
- Revisamos el **balance de entropía** para **sistemas cerrados y abiertos**.