

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

UNIDAD CURRICULAR: CALOR Y TERMODINÁMICA

## INTRODUCCIÓN A LA EXERGÍA

### Resumen

Reflexión: el aire, como gas ideal, tiene la misma energía interna a 1 atm y 50 °C que a 5 atm y 50°C, pero ¿ puede realizar el mismo trabajo desde dos presiones diferentes aunque tenga la misma energía interna específica?.

1. Un sistema que intercambia calor con el ambiente produce el trabajo máximo a través de una trayectoria reversible que lo lleva al estado de equilibrio térmico y mecánico, es decir  $T_f = T_{amb}$  y  $P_f = P_{amb}$ . Por convención se denotará la  $T_{amb}$  como  $T_o$  y la  $P_{amb}$  como  $P_o$ .
2. A menos que se indique lo contrario se establece que  $T_o = 298 \text{ K}$  y  $P_o = 1 \text{ atm}$ .
3. Se denomina estado muerto de un sistema al que está a  $T_o$ ,  $P_o$ , no tiene energía cinética relativa al ambiente, no tiene energía potencial relativa al ambiente, no reacciona químicamente con el ambiente. Otras propiedades de dicho estado se denominan  $U_o$ ,  $h_o$ ,  $s_o$ .
4. El máximo trabajo posible de un sistema se da en un proceso reversible desde su estado inicial al estado muerto. Este trabajo representa el POTENCIAL DE TRABAJO ÚTIL del sistema y se denomina EXERGÍA ( $X$ ). entendiendo por útil el que no se emplea en actuar contra el ambiente.
5. La exergía representa el límite superior de la cantidad de trabajo que un dispositivo puede entregar. La exergía combina al sistema y al ambiente, no es una propiedad solo del sistema.
6. La energía cinética es una energía mecánica que se puede transformar completamente en trabajo, es decir la exergía de la energía cinética es ella misma ( $X_{EC} = V^2/2$  para una unidad de masa). Igual razonamiento se puede usar para la energía potencial, es decir: la exergía de la energía potencial es ella misma ( $X_{EPOT} = gz$  para una unidad de masa). Por tanto, la cantidad máxima de trabajo extraíble debe incluir la contribución de la energía cinética y la potencial, ya que ambas se pueden transformar en trabajo sin pérdida alguna (idealmente).
7. Para el máximo aprovechamiento de la energía se deben considerar procesos en los que no se produzca entropía en el universo. Por tratarse de un proceso reversible, se cumple  $dQ/T = dS$ . En ese caso el trabajo realizado por el sistema es  $dW = p dV$ , si una parte de él se emplea en desplazar el aire exterior, que está a presión  $p_o$  quedaría  $dW = (P - P_o)dV + P_o dV$ , De estos dos términos, sólo el primero es trabajo útil.
8. La energía interna ( $U$ ) y la entalpía ( $h$ ) no se pueden transformar completamente en trabajo, es decir, no están completamente disponibles para trabajo. Esto se explica porque un sistema no puede tener un estado final con  $U = 0$  y/o  $h = 0$  en otras palabras “no se puede quedar sin energía interna o sin entalpía al finalizar un proceso” (¿por qué?).
9. Cuando se trabaja con eficiencia térmica no se supone que el estado final es el estado muerto, se toma el estado final del proceso que se lleva a cabo, por ello esta eficiencia no se refiere al máximo

potencial de trabajo, sino que se puede relacionar con la reversibilidad en las condiciones de operación.

10. El trabajo reversible es el máximo generado por un dispositivo de expansión, o el mínimo consumido en una compresión, entre los estados especificados en el proceso. Si el estado final es el estado muerto, el trabajo reversible es igual a la exergía.
11. La irreversibilidad disminuye el potencial de trabajo, es decir, disminuye la exergía (destruye exergía).
12. La irreversibilidad (I) es la diferencia entre el trabajo reversible y el trabajo útil.

$I = W_{\text{rev que sale}} - W_{\text{útil que sale}}$	$I = \text{útil que entra} - W_{\text{rev que entra}}$	$I > 0$ para los procesos irreversibles
--	--	---

13. La irreversibilidad (I) es el potencial desperdiciado de trabajo, es la energía que pudo haber sido trabajo y no lo fue, para mejorar la eficiencia de un proceso se debe disminuir su irreversibilidad.
14. La eficiencia térmica, también llamada de primera ley relaciona calor y trabajo, por ejemplo para una máquina térmica en un ciclo:  $\eta_I = \frac{W_{\text{neto sale}}}{Q_{\text{entra}}}$  si es reversible  $\eta_I = 1 - \frac{T_L}{T_H}$  También se expresa como  $\eta_I = 1 - \frac{q_{\text{sale}}}{q_{\text{entra}}}$
15. La eficiencia de la segunda ley se define como la relación entre la eficiencia térmica real entre la eficiencia térmica máxima posible  $\eta_{II} = \frac{\eta_I}{\eta_{I-\text{rev}}}$
16. Si el dispositivo genera trabajo queda:  $\eta_{II} = \frac{W_{\text{útil que sale}}}{W_{\text{reversible que sale}}}$  (recuerde que el  $W_{\text{rev que sale}}$  es el máximo posible entre dos estados). Si el dispositivo consume trabajo la relación es inversa.
17. La eficiencia de la segunda ley también puede ser expresada en términos de exergía. (tarea para el estudiante)
18. En un sistema cerrado el potencial de trabajo es menor que la energía interna  $X < U$  (REPASAR EL PUNTO 8)
19. Recuerde que la exergía es el máximo potencial de trabajo y toma como estado final el estado muerto, entonces se puede escribir:

$$dU = dQ - dW \Rightarrow dW = dQ - dU \Rightarrow dW = TdS - dU$$

$$dW_{\text{útil total}} = TdS - dU + dW_{\text{amb}} \Rightarrow dW_{\text{útil total}} = TdS - dU + P_0(dV)$$

Integrando desde el estado inicial al estado muerto queda  $W_{\text{útil total}} = T_0(\Delta S) - \Delta U + P_0(\Delta V)$

20. La exergía también considera los aportes de la energía cinética y potencial:

$$X = (U - U_0) + P_0(V - V_0) + T_0(S - S_0) + E_C + E_{POT} \Rightarrow X = (U - U_0) + P_0(V - V_0) + T_0(S - S_0) + mV^2/2 + mgz$$

Para un Sistema cerrado:

21. La exergía por unidad de masa se expresa como disponibilidad ( $\Phi$ )

$$22. \Phi = (u - u_0) + P_0(v - v_0) + T_0(s - s_0) + v^2/2 + gz \Rightarrow \Phi = (E - E_0) + P_0(V - V_0) + T_0(S - S_0)$$

23. En el estado muerto  $\Phi_0=0$  (no hay disponibilidad)

24. El cambio de exergía en un proceso es

$$\Delta X = X_2 - X_1 = m(\Phi_2 - \Phi_1) \Rightarrow \Delta X = (E_2 - E_1) + P_0(V_2 - V_1) + T_0(S_2 - S_1)$$

$$\Delta X = (U_2 - U_1) + P_0(V_2 - V_1) + T_0(S_2 - S_1) + m(V_2^2/2 - V_1^2/2) + mg(z_2 - z_1)$$

$$\Delta \Phi = (e_2 - e_1) + P_0(V_2 - V_1) + T_0(S_2 - S_1) \quad (\text{¿qué cambió en estas ecuaciones?})$$

25. El  $\Delta \Phi = 0$  si el estado del Sistema o del ambiente no cambia.

Para sistemas con trabajo de flujo:

26. Recuerde  $W_{\text{flujo}} = P_v$ . La exergía del trabajo de flujo es  $P_v - P_0 V \Rightarrow X_{\text{flujo}} = (P - P_0)V$

$$X_{\text{con flujo}} = (U - U_0) + P_0(V - V_0) + T_0(S - S_0) + mV^2/2 + mgz + (P - P_0)V$$

$$X_{\text{con flujo}} = (U - U_0) + T_0(S - S_0) + mV^2/2 + mgz + (PV)$$

$$X_{\text{con flujo}} = (U + PV) - (U_0 + P_0 V_0) + T_0(S - S_0) + mV^2/2 + mgz$$

$$X_{\text{con flujo}} = (H - H_0) + T_0(S - S_0) + mV^2/2 + mgz$$

$$27. \psi = (h - h_0) + T_0(s - s_0) + V^2/2 + gz$$

$$\Delta \psi = (h_2 - h_1) + T_0(s_2 - s_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1)$$

28. La exergía nos da el máximo de trabajo útil que podemos extraer de un sistema. Para ello, hay que suponer procesos completamente reversibles y por tanto sin producción de entropía.

29. En un proceso real siempre se produce entropía, ello implica una reducción del trabajo útil que podemos extraer del sistema, es decir, cuanto mayor en la producción de entropía, menor es el aprovechamiento de su exergía.

**María Isabel López Echeverría**

**Marzo 2018**