

VIII. Exergía

Objetivos:

1. Examinar el desempeño de dispositivos ingenieriles considerando la segunda ley de la termodinámica.
2. Definir exergía, trabajo reversible, y destrucción de exergía.
3. Definir la eficiencia de segunda ley.
4. Desarrollar una relación para el balance de exergía.

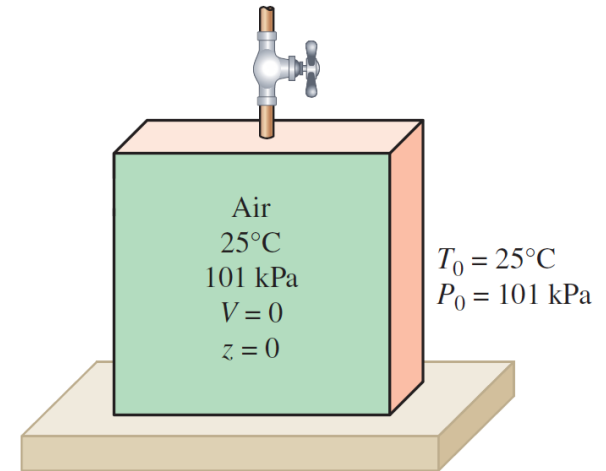
1. Exergía: potencial de trabajo de energía.

La *exergía* es una propiedad que nos permite examinar la cantidad de energía que se puede convertir en trabajo útil.

$$W = f(\text{estado inicial, recorrido del proceso, estado final})$$

El *potencial de trabajo útil o exergía* representa el trabajo máximo posible que puede proporcionar un sistema al ir desde un estado inicial específico a un estado final “muerto” por medio de un proceso reversible.

Un sistema se dice que ha alcanzado un estado “muerto” cuando se encuentra en equilibrio con el ambiente. Las propiedades en un estado “muerto” se suelen denotar con subíndice 0.

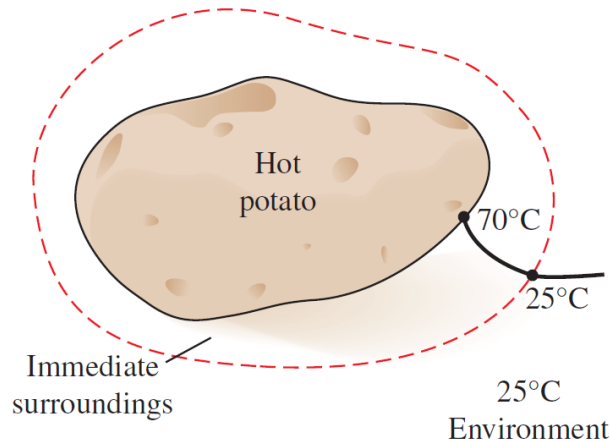


Una distinción importante se debe hacer entre alrededores, alrededores inmediatos, y ambiente.

Alrededores, por definición, es todo lo que se encuentra afuera de las fronteras del sistema, *alrededores inmediatos*, se refiere a la porción de los alrededores que se ve afectada por el proceso, y *ambiente* se refiere a la región más allá de los alrededores inmediatos cuyas propiedades no se ven afectadas por el proceso en ningún punto.

VIII. Exergía

1. Exergía: potencial de trabajo de energía.



Potencial de trabajo asociado a la energía cinética y a la energía potencial

En vista de que la energía cinética y la potencial son formas de energía mecánica, y pueden ser convertidas totalmente en trabajo, la exergía o potencial de trabajo será igual a:

$$x_{ke} = ke = \frac{Vel^2}{2} \quad [\text{kJ}/\text{kg}]$$

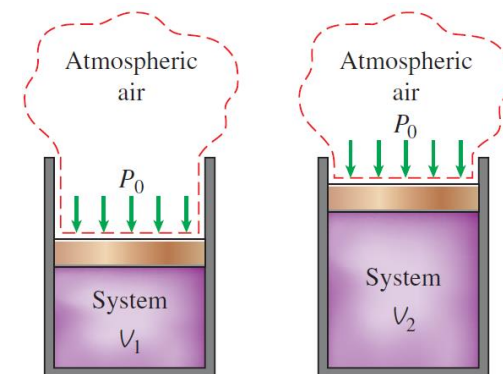
$$x_{pe} = pe = gz \quad [\text{kJ}/\text{kg}]$$

En donde la velocidad y la elevación serán relativas con respecto al ambiente.

2. Trabajo reversible e irreversibilidades.

La exergía constituye una herramienta en la determinación de la calidad de energía y en la comparación de los potenciales de trabajos de diferentes fuentes de energía o sistemas.

Ahora bien, ha de tenerse presente que no todo el trabajo producido por un dispositivo es útil. Considere el siguiente ejemplo:



Aquí parte del trabajo de frontera es empleado para vencer la presión atmosférica y no puede ser empleado para otro propósito.

VIII. Exergía

2. Trabajo reversible e irreversibilidades.

$$W_{alrededores} = P_0(V_2 - V_1)$$

Para este caso en particular la diferencia entre el trabajo de expansión total W y el trabajo desperdiciado en los alrededores $W_{alrededores}$, constituye el trabajo útil W_u .

$$W_u = W - W_{alrededores}$$

Si se tratase de una compresión, este trabajo representaría una ganancia.

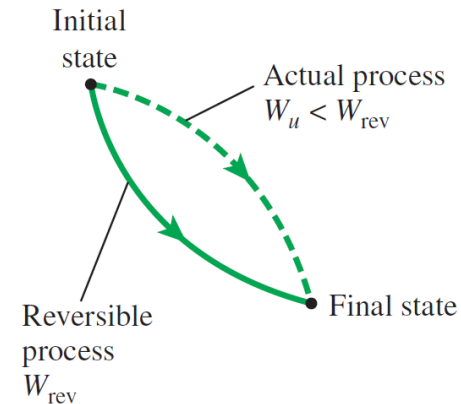
En el caso de sistemas de volumen fijo el trabajo total es igual al trabajo útil.

Por otra parte, el trabajo reversible W_{rev} representa la máxima cantidad de trabajo útil que puede ser producido (o la cantidad mínima de trabajo que debe suplirse) a medida que un sistema pasa a través de un proceso reversible entre un estado inicial específico y un estado final.

Cualquier diferencia entre el trabajo reversible y el trabajo útil es debida a las irreversibilidades presentes

durante el proceso, y a esta diferencia se le llama irreversibilidad, I .

$$I = W_{rev,salida} - W_{u,salida} \quad \text{ó}$$
$$I = W_{u,entrada} - W_{rev,entrada}$$



$$I = W_{rev} - W_u$$

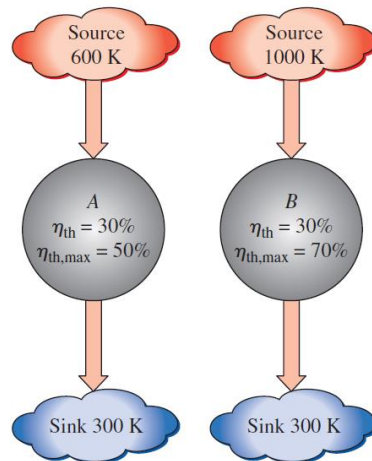
Las irreversibilidades son equivalentes a la destrucción de exergía y siempre son cantidades positivas para procesos reales (procesos irreversibles).

VIII. Exergía

3. Eficiencia de segunda ley.

Durante el capítulo 6 vimos la eficiencia térmica y el coeficiente de desempeño de máquinas térmicas, refrigeradores, y bombas de calor como medidas de su desempeño. Estas eficiencias están definidas en términos de la primera ley.

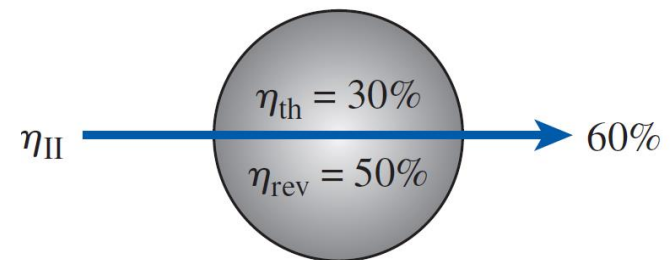
Considere las siguientes máquinas térmicas.



Aquí se puede ver como a pesar de que la máquina térmica B presenta una mayor eficiencia de Carnot, su eficiencia térmica al operar durante un proceso real es igual a la de la máquina térmica A.

Es evidente de este ejemplo, que la eficiencia definida en términos de la eficiencia de la primera ley como tal, no es una medida realista del desempeño de dispositivos ingenieriles, y para superar esta deficiencia se define la eficiencia en base a la segunda ley η_{II} :

$$\text{Máquinas térmicas} \rightarrow \eta_{II} = \frac{\eta_{\text{térmica}}}{\eta_{\text{térmica,rev}}} = \frac{W_{\text{neto}}}{W_{\text{neto,rev}}}$$



Donde $W_{\text{neto}} = W_{\text{útil}}$.

Puede apreciar otras expresiones para la eficiencia de segunda ley para diferentes dispositivos en la sección 8.3 y 8.8 de su libro de texto.

VIII. Exergía

3. Eficiencia de segunda ley.

En general, la eficiencia de segunda ley η_{II} puede ser escrita como:

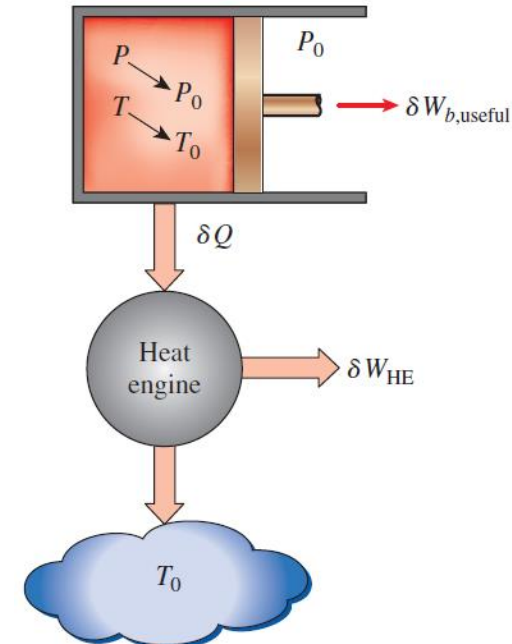
$$\eta_{II} = \frac{\text{exergía recuperada}}{\text{exergía gastada}} = 1 - \frac{\text{exergía destruida}}{\text{exergía gastada}}$$

4. Cambios de exergía de un sistema.

Exergía de un sistema de masa fija (sistema cerrado)

Producto de la segunda ley (el calor no puede ser convertido totalmente en trabajo), el potencial de trabajo de la energía interna debe ser inferior a la energía interna como tal. Tenga presente que la energía puede ser considerada compuesta solo de energía latente y sensible que pueden ser transferidas hacia o desde el sistema como calor al existir una diferencia de temperatura a través de la frontera del sistema.

Considere ahora el balance de energía, de un sistema cerrado estacionario en un estado específico que pasa a través de un proceso reversible al estado del ambiente.



$$\begin{aligned} \delta E_{\text{entrada}} - \delta E_{\text{salida}} &= dE_{\text{sistema}} \\ -\delta Q_{\text{rev}} - \delta W_{\text{rev}} &= dU \end{aligned}$$

Donde:

$$\delta W_{\text{rev}} = PdV = (P - P_0)dV + P_0dV$$

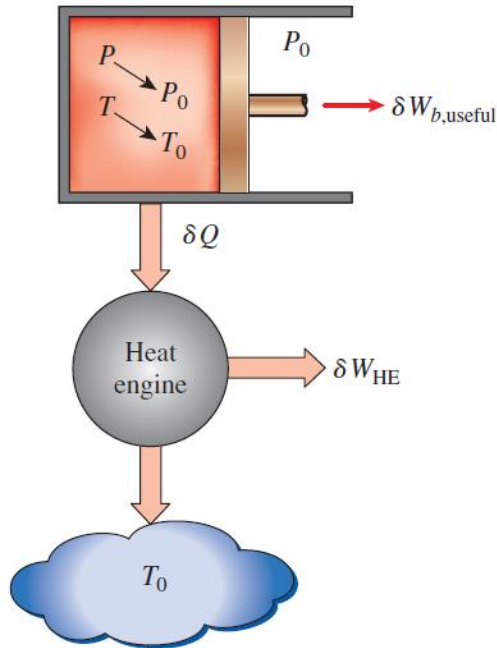
$$\delta W_{\text{rev}} = \delta W_{b,\text{útil}} + P_0dV$$

Con respecto a la máquina de calor, para un proceso reversible:

VIII. Exergía

4. Cambios de exergía de un sistema.

Exergía de un sistema de masa fija (sistema cerrado)



$$\eta_{t\acute{e}rmica,rev} = \frac{\delta W_{HE}}{\delta Q_{rev}} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)$$

$$\delta W_{HE} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \delta Q_{rev}$$

Recordando que:

$$\frac{\delta Q_{rev}}{T} = dS$$

$$\delta W_{HE} = \delta Q_{rev} - [(T_0)(-dS)]$$

El signo menos en la expresión anterior atiende al hecho de que al transferirse calor en el sistema cerrado, el cambio de entropía será negativo.

Lo cual al ser remplazado en la ecuación de conservación de energía para el sistema cerrado da el trabajo útil total:

$$-\delta Q_{rev} - \delta W_{rev} = dU$$

$$-(\delta W_{HE} - T_0 dS) - (\delta W_{b,\acute{u}til} + P_0 dV) = dU$$

$$\delta W_{\acute{u}til,total} = \delta W_{HE} + \delta W_{b,\acute{u}til} = -dU - P_0 dV + T_0 dS$$

Esto al ser integrado entre el estado en consideración (sin subíndice) y el estado “muerto” da el potencial de trabajo del sistema cerrado:

$$W_{\acute{u}til,total} = -(U_0 - U) - P_0(V_0 - V) + T_0(S_0 - S)$$

$$W_{\acute{u}til,total} = (U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0)$$

VIII. Exergía

4. Cambios de exergía de un sistema.

Exergía de un sistema de masa fija (sistema cerrado)

Si adicionalmente se considera la energía cinética y potencial del sistema cerrado, la exergía total X estaría dada por:

$$X = (U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) + \frac{mVel^2}{2} + mgz$$

O bien, la exergía específica ϕ :

$$\phi = (u - u_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) + \frac{Vel^2}{2} + gz$$

The slide contains the following text:

Energy:

$$e = u + \frac{V^2}{2} + gz$$

Exergy:

$$\phi = (u - u_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz$$

(a) A fixed mass (nonflowing)

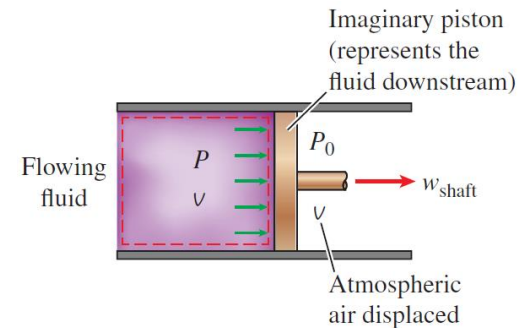
Y consecuentemente, el cambio de exergía específica estaría dado por:

$$\Delta\phi = (u_2 - u_1) + P_0(v_2 - v_1) - T_0(s_2 - s_1) + \frac{Vel_2^2 - Vel_1^2}{2} + g(z_2 - z_1)$$

Exergía de un volumen de control

La única diferencia en cuanto al potencial de trabajo en el caso de un volumen de control, es que es necesario tomar en cuenta al trabajo de flujo.

$$x_{flujo} = Pv - P_0v = (P - P_0)v$$



$$Pv = P_0v + w_{shaft}$$

$$\psi = \phi + x_{flujo}$$

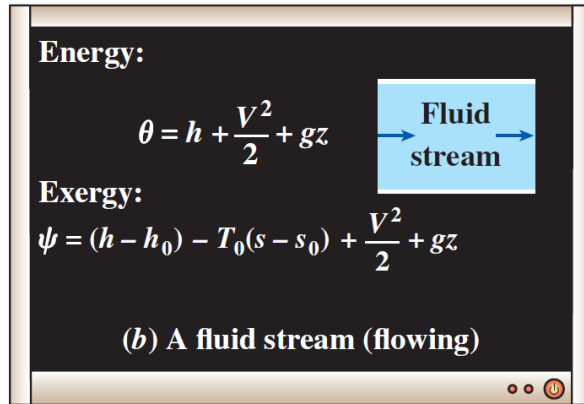
$$\psi = (u - u_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) + \frac{Vel^2}{2} + gz + (P - P_0)v$$

VIII. Exergía

4. Cambios de exergía de un sistema.

Exergía de un volumen de control

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{Vel^2}{2} + gz$$



$$\Delta\psi = (h_2 - h_1) - T_0(s_2 - s_1) + \frac{Vel_2^2 - Vel_1^2}{2} + g(z_2 - z_1)$$

5. Transferencia de exergía por trabajo, calor, y masa.

Transferencia por calor

$$X_{calor} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q \quad [\text{k}]$$

Y cuando la temperatura T no es constante:

$$X_{calor} = \int \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \delta Q$$

Transferencia por trabajo

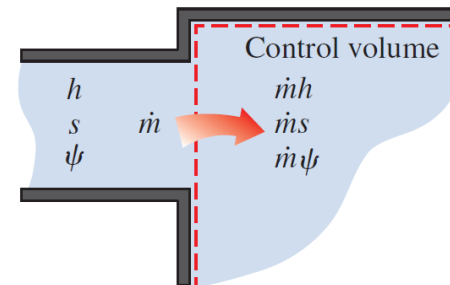
$$X_{trabajo} = \begin{cases} W - W_{alrededores}, & \text{para el trabajo de frontera} \\ W, & \text{para otras formas de trabajo} \end{cases}$$

Transferencia por masa

$$X_{masa} = m\psi$$

Donde:

$$\psi = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \frac{Vel^2}{2} + gz$$

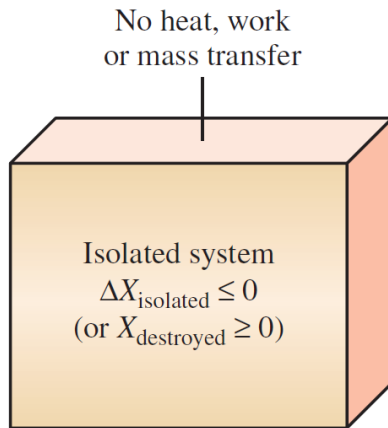


VIII. Exergía

6. Principio de decremento de exergía y destrucción de la exergía.

El principio de decremento de exergía es otra manera de establecer la segunda ley, y es la contraparte del principio de incremento de entropía.

Considere el sistema aislado mostrado a continuación.



Del balance de energía y de entropía se tendrá que:

$$E_{entra} - E_{sale} = \Delta E_{sistema} \rightarrow \Delta E_{sistema} = 0$$

$$E_2 - E_1 = 0$$

$$S_{entra} - S_{sale} + S_{gen} = \Delta S_{sistema} \rightarrow S_{gen} = \Delta S_{sistema}$$

$$S_{gen} = S_2 - S_1$$

Multiplicando la expresión anterior por T_0 y al sustraerla de la ecuación deducida del balance de energía:

$$-T_0 S_{gen} = E_2 - E_1 - T_0(S_2 - S_1)$$

Recordando que:

$$\Delta X = \Delta U + P_0 \Delta V - T_0 \Delta S + \frac{m(Vel_2^2 - Vel_1^2)}{2} + mg \Delta z$$

$$\Delta X = \Delta E + P_0 \Delta V - T_0 \Delta S$$

Para un sistema aislado $\Delta V = 0$, ya que no puede haber trabajo de frontera:

$$\Delta X = \Delta E - T_0 \Delta S$$

Por tanto:

$$-T_0 S_{gen} = X_2 - X_1 + T_0(S_2 - S_1) - T_0(S_2 - S_1)$$

$$-T_0 S_{gen} = X_2 - X_1$$

VIII. Exergía

6. Principio de decremento de exergía y destrucción de la exergía.

En vista de que $S_{gen} \geq 0$ se puede concluir que para un sistema aislado:

$$X_2 - X_1 \leq 0$$

Destrucción de exergía

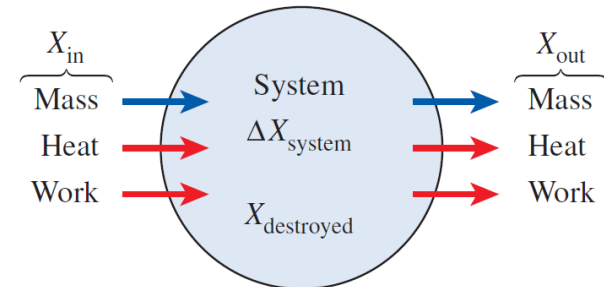
Irreversibilidades tales como la fricción, la mezcla de sustancias, las reacciones químicas, la transferencia de calor a través de diferencias finitas de temperatura, y las expansiones no restringidas siempre generan entropía y todo lo que genera entropía destruye exergía.

La exergía destruida es proporcional a la entropía generada.

$$X_{destruida} = T_0 S_{gen} \geq 0$$

$$X_{destruida} = \begin{cases} > 0, \text{Proceso real} \\ = 0, \text{Proceso reversible} \\ < 0, \text{Proceso imposible} \end{cases}$$

7. Balance de exergía.



$$X_{entrada} - X_{salida} + X_{destruida} = \Delta X_{sistema}$$

Lo cual, también puede ser expresado en términos de tasa o bien como exergía específica.