



UC | Chile

Termodinámica (FIS1523)

2^{da} Ley y máquinas térmicas

Felipe Isaule
felipe.isaule@uc.cl

Lunes 19 de Mayo de 2025

Clase 19: 2^{da} Ley y máquinas térmicas

- 2da Ley de la Termodinámica.
- Máquinas térmicas y eficiencia.

- Bibliografía recomendada:
 - Cengel (6-1, 6-2, 6-3).

Clase 19: 2^{da} Ley y máquinas térmicas

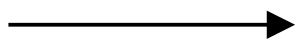
- **2da Ley de la Termodinámica.**
- Máquinas térmicas y eficiencia.

Recordatorio primera Ley

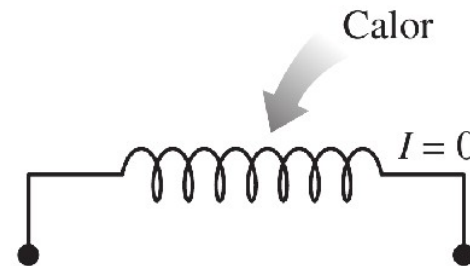
- Hasta ahora hemos analizado sistemas imponiendo la **Ley de conservación de la energía**.
- Como hemos visto, la **1^{ra} Ley** permite el diseño de **muchos procesos** termodinámicos.
- Sin embargo, **hay procesos** que **satisfacen la 1^{ra} Ley**, pero que **no ocurren en la naturaleza**.

Procesos que no ocurren en la naturaleza

- Una **taza de té caliente** se **enfía** al **transferir calor al ambiente**. Sin embargo, a pesar de cumplir la 1^{ra} Ley, **nunca observamos** que tal taza **se caliente** al **absorbe calor**.
- Las **resistencias eléctricas** se **calientan** con el **paso de corriente**. Sin embargo, **no observamos** que una resistencia **absorba calor** y comience a **producir corriente**.



Muchos procesos ocurren en una sola **dirección**.



Procesos que no ocurren en la naturaleza

- Un **cuerpo** que se **desliza** eventualmente **se detendrá** debido al **roce**, por el cual la **energía cinética se transformará en calor**. Sin embargo, **nunca observamos** que un cuerpo **absorba calor** y se **comience a mover** en una **dirección**.
- Al **absorber calor**, la **energía cinética aumenta** en **todas las direcciones**.



Los procesos parecen aumentar el **desorden**.

2^{da} Ley de la Termodinámica

- La 2^{da} Ley de la Termodinámica dicta que los procesos tienen una direccionalidad.

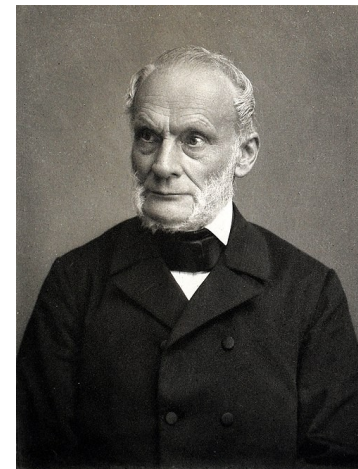


- Nos dice que la **energía** no sólo tiene **cantidad**. También tiene calidad.
 - La **energía** es **más útil** cuando se encuentra **concentrada** u **ordenada**.
- El **trabajo** se puede **convertir completamente** y fácilmente **en calor**. Sin embargo, **lo inverso no es cierto**.

2^{da} Ley de la Termodinámica

- La 2^{da} Ley nos permite **determinar** los **límites teóricos** del **desempeño** de máquinas en ingeniería.
- Los estudios iniciales sobre la eficiencia de máquinas fueron realizados por **Sadi Carnot**.
- La 2^{da} Ley fue **formulada** por primera vez por **Rudolf Clausius** en 1850.

→ El calor no fluye espontáneamente desde cuerpos fríos a cuerpos **calientes**.

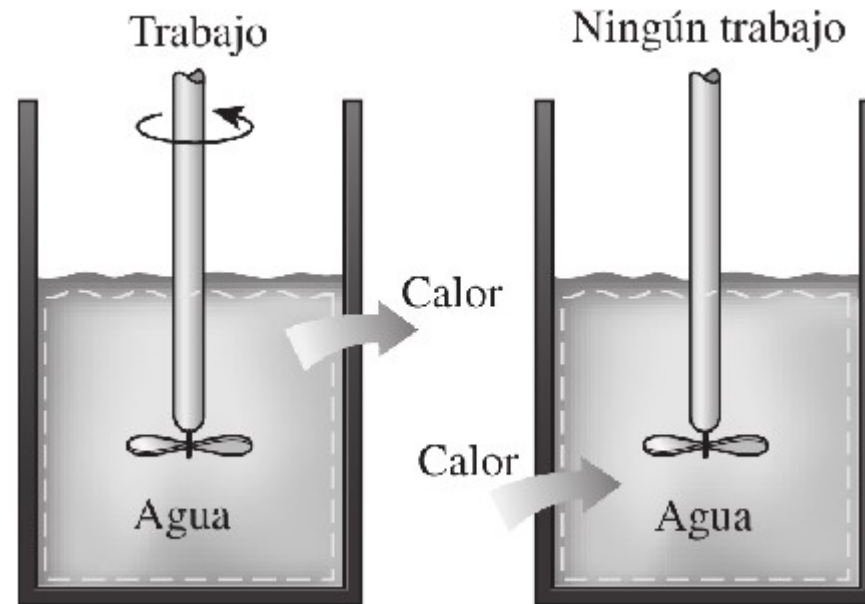


R. Clausius (1796 – 1888)



S. Carnot (1796 – 1832)

2^{da} Ley de la Termodinámica



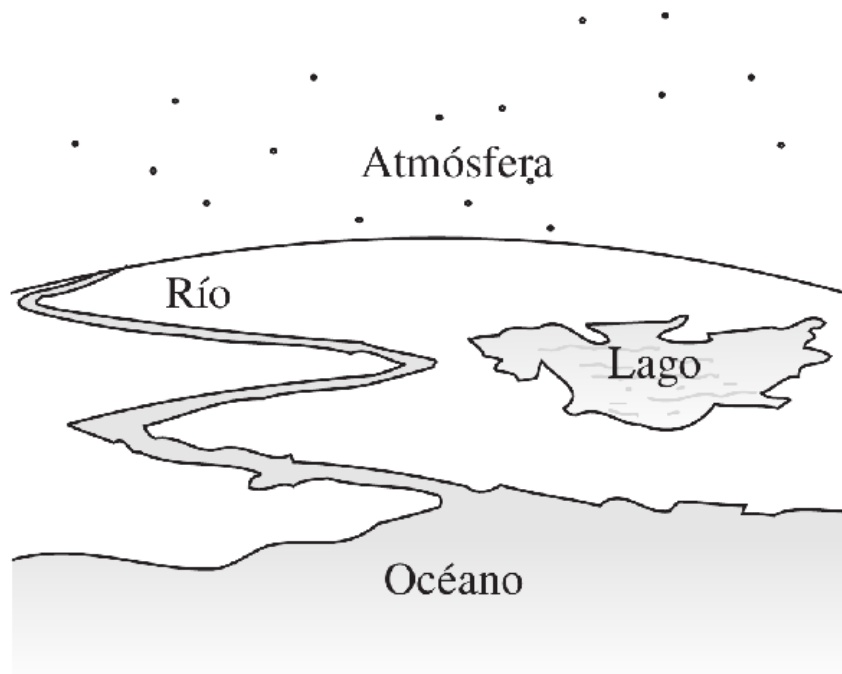
- **Todo proceso** debe **cumplir** la **1^{ra}** y **2^{da}** **Ley** de la Termodinámica.
- Revisaremos **distintas formulaciones** de la **2^{da} Ley** durante esta y las siguientes clases.
- Para entender el funcionamiento de la **2^{da} Ley** vamos a examinar **máquinas térmicas**.

Clase 19: 2^{da} Ley y máquinas térmicas

- 2da Ley de la Termodinámica.
- **Máquinas térmicas y eficiencia.**

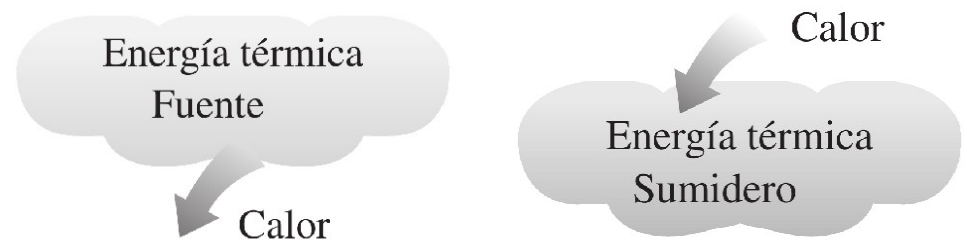
Depósitos de energía térmica

- Un cuerpo con **mucha masa y calor específico** se denomina un **depósito de energía térmica** o **depósitos de calor**.
- Estos pueden **suministrar o absorber calor sin cambiar su temperatura**.



Cuerpos grandes de agua y la atmósfera se pueden considerar como depósitos.

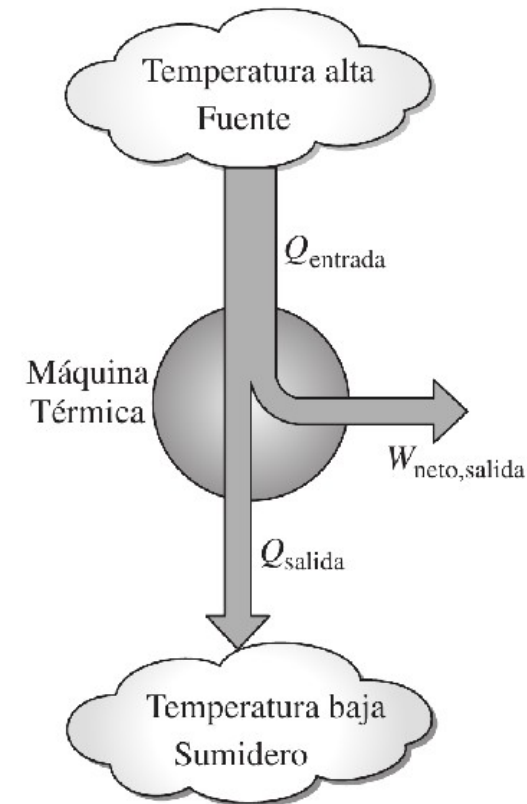
- Un depósito que **suministra calor** se llama **fuelle**.
- Un depósito que **absorbe calor** se llama **sumidero**.



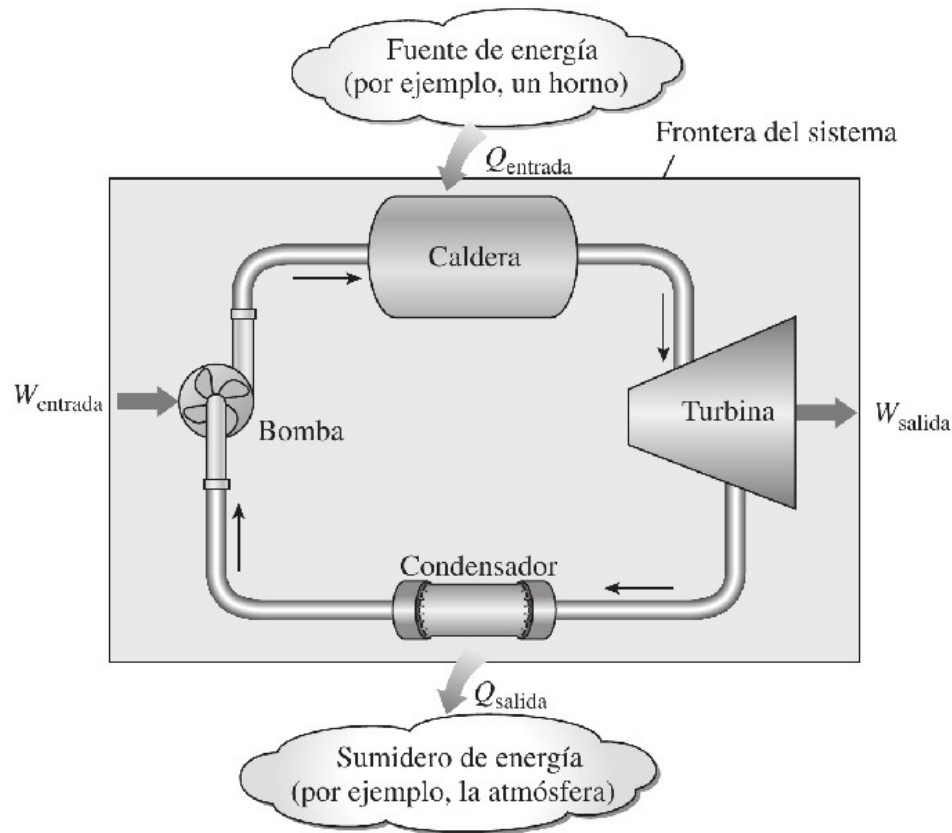
Pregunta: ¿Qué otros cuerpos en la vida cotidiana se pueden considerar como depósitos?

Máquinas térmicas

- Una **máquina térmica** es una máquina que **convierte calor en trabajo**.
- Una máquina térmica:
 1. **Recibe calor** de una **fente** a **temperatura alta**.
 2. **Convierte** parte de este **calor en trabajo**.
 3. **Rechaza** el **calor** de desecho hacia un **sumidero de temperatura baja**.
 4. **Opera** en un **ciclo**.
- El fluido utilizado se llama **fluido de trabajo**.



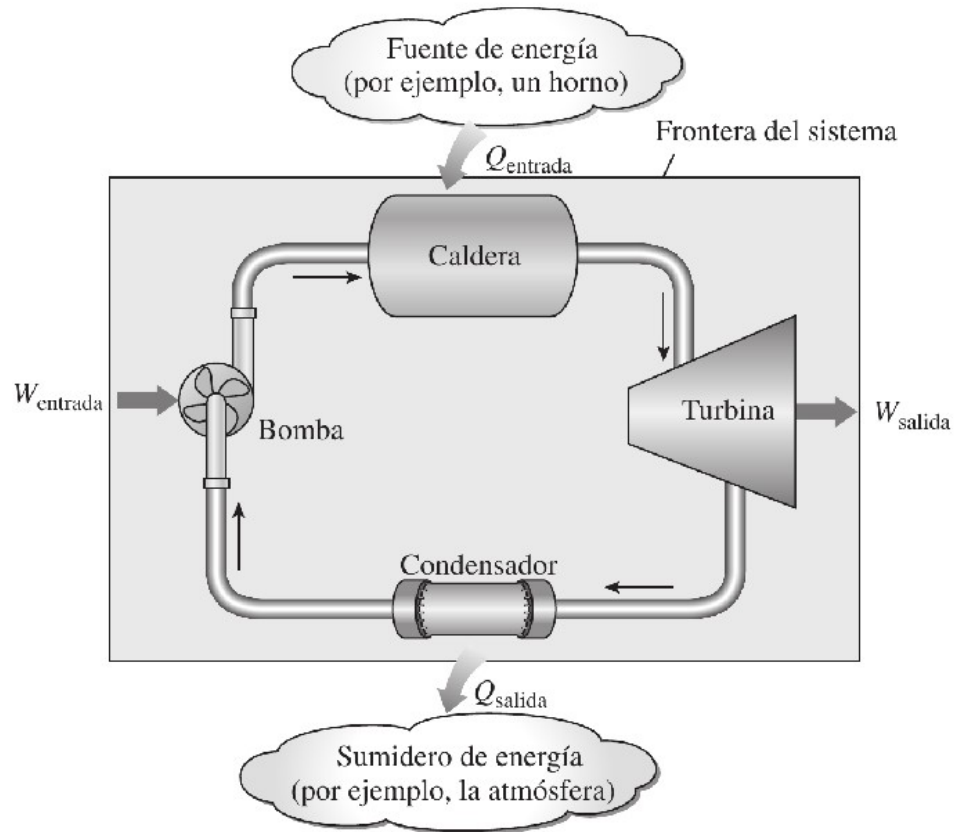
Máquinas térmicas



Esquema de una central eléctrica de vapor.

- Q_{entrada} : Calor suministrado desde una fuente.
- Q_{salida} : Calor rechazado hacia un sumidero.
- W_{salida} : Cantidad de trabajo entregado por la máquina.
- W_{entrada} : Trabajo requerido para el funcionamiento de la máquina.

Máquinas térmicas



Esquema de una central eléctrica de vapor.

- El trabajo neto de salida:

$$W_{\text{neto,salida}} = W_{\text{salida}} - W_{\text{entrada}}.$$

- Por conservación de la energía:

$$W_{\text{neto,salida}} = Q_{\text{entrada}} - Q_{\text{salida}}.$$

Eficiencia térmica

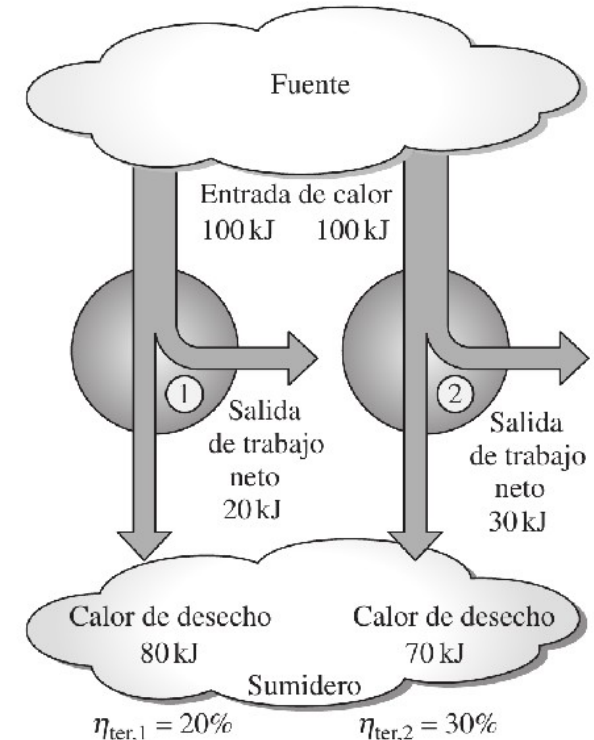
- El trabajo neto de salida siempre es menor al calor de entrada:

$$W_{\text{neto, salida}} < Q_{\text{entrada}}.$$

- Una máquina tiene **mejor desempeño** si puede **convertir más calor a trabajo** (entregar menos calor al sumidero).
- El nivel de desempeño es medido por la **eficiencia térmica**:

$$\eta = \frac{W_{\text{neto, salida}}}{Q_{\text{entrada}}} = 1 - \frac{Q_{\text{salida}}}{Q_{\text{entrada}}}.$$

$$W_{\text{neto, salida}} = Q_{\text{entrada}} - Q_{\text{salida}}$$

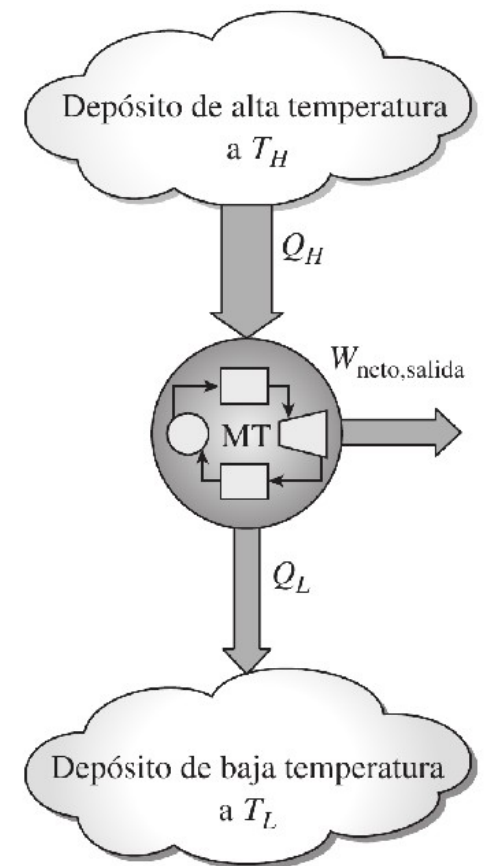


Eficiencia térmica

- Las máquinas de interés operan entre un **depósito a alta temperatura** T_H y un **sumidero a baja temperatura** T_L .
- Definimos:
 - Q_H : **Calor suministrado por el depósito.**
 - Q_L : **Calor absorbido por el sumidero.**
- La **eficiencia** se escribe como:

$$\eta = 1 - \frac{Q_L}{Q_H}.$$

- Motores de automóviles tienen eficiencias de entre el 20 y 40 %, mientras que centrales termoeléctricas pueden llegar al 60%.



Eficiencia térmica y poder calorífico

- También podemos utilizar **tasas**:

$$\eta = \frac{\dot{W}_{\text{neto, salida}}}{\dot{Q}_{\text{entrada}}} = 1 - \frac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}_H}.$$

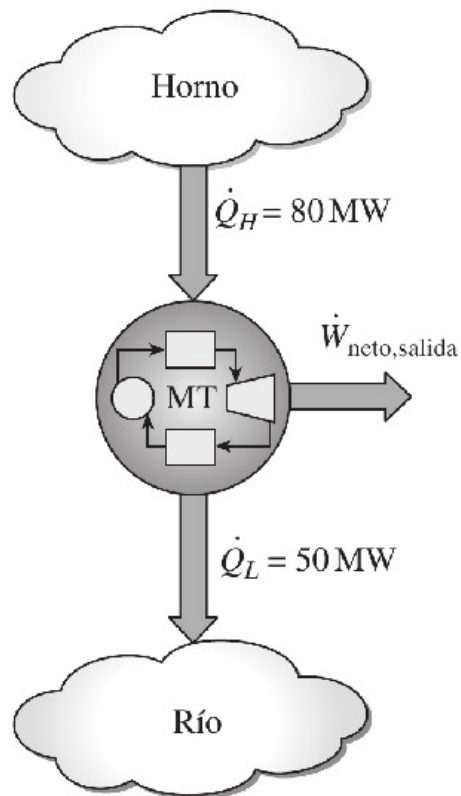
- Muchas veces el calor se da en términos del **poder calorífico** q , el que corresponde al **calor** por **unidad de masa**:

$$Q = m q, \quad \dot{Q} = \dot{m} q.$$

- Los poderes caloríficos de muchos combustibles se encuentran tabulados.

Ejemplo 1:

- Se **transfiere calor a una máquina térmica** desde un horno a una tasa de **80 MW**. Si la tasa de **rechazo de calor** hacia un río cercano es **50 MW**, determine la **salida de potencia neta** y la **eficiencia térmica** para esta máquina térmica.



Ejemplo 1:

- Se **transfiere calor** a una **máquina térmica** desde un horno a una tasa de **80 MW**. Si la tasa de **rechazo de calor** hacia un río cercano es **50 MW**, determine la **salida de potencia neta** y la **eficiencia térmica** para esta máquina térmica.

El horno funciona como fuente, mientras que el río como sumidero.

$$\dot{Q}_H = 80 \text{ MW}, \quad \dot{Q}_L = 50 \text{ MW}$$

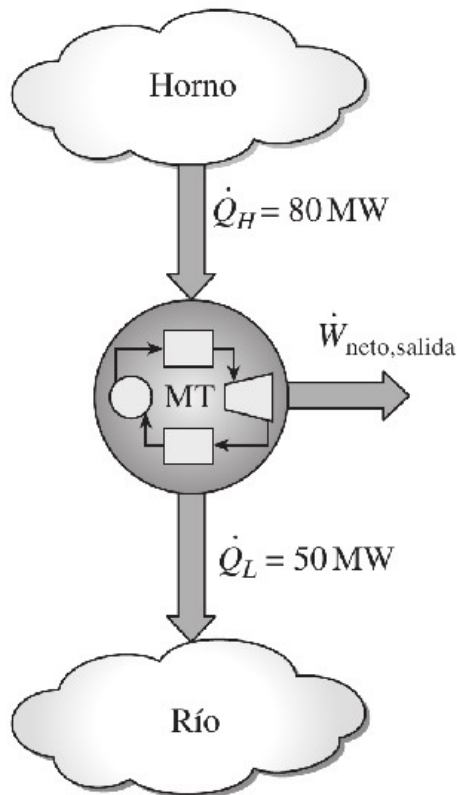
La potencia neta:

$$\dot{W}_{\text{neto, salida}} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L = 80 \text{ MW} - 50 \text{ MW}$$

$$\longrightarrow \boxed{\dot{W}_{\text{neto, salida}} = 30 \text{ MW}}$$

La eficiencia:

$$\eta = \frac{\dot{W}_{\text{neto, salida}}}{\dot{Q}_H} = \frac{30 \text{ MW}}{80 \text{ MW}} \longrightarrow \boxed{\eta = 0.375}$$



Ejemplo 2:

- Un **motor** de automóvil **consume combustible** a razón de **22 L/h** y **entrega** a las ruedas una **potencia** de **55 kW**. Si el combustible tiene un **poder calorífico** de **44000 kJ/kg** y una **densidad** de **0.8 g/cm³**, determine la **eficiencia del motor**.

Ejemplo 2:

- Un **motor** de automóvil **consume combustible** a razón de **22 L/h** y **entrega** a las ruedas una **potencia** de **55 kW**. Si el combustible tiene un **poder calorífico** de **44000 kJ/kg** y una **densidad** de **0.8 g/cm³**, determine la **eficiencia del motor**.

Primero vamos a calcular el flujo másico del combustible:

$$\begin{aligned}\dot{m} &= \rho \dot{V} = 0.8 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} 22 \frac{\text{L}}{\text{h}} \\ &= 0.8 \frac{10^{-3} \text{kg}}{10^{-6} \text{m}^3} 22 \frac{10^{-3} \text{m}^3}{60 \times 60 \text{s}} \\ &= 0.0049 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

La tasa de calor entregada por el combustible:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_H &= \dot{m} q = 0.0049 \frac{\text{kg}}{\text{s}} 44 \times 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \\ &= 215600 \text{ J/s} \\ &= 215.600 \text{ kW}\end{aligned}$$

La eficiencia:

$$\eta = \frac{\dot{W}_{\text{neto}}}{\dot{Q}_H} = \frac{55 \text{ kW}}{215.6 \text{ kW}}$$

→

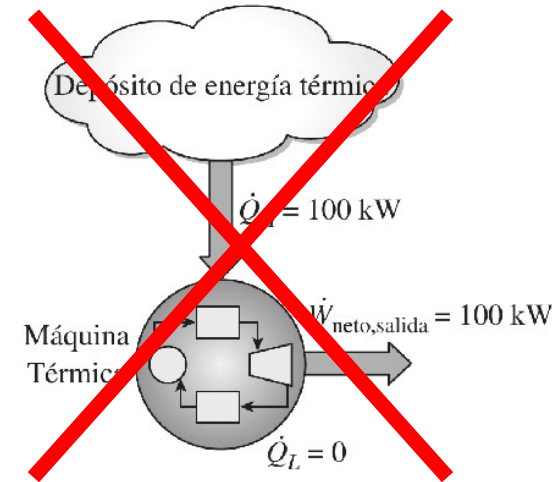
$$\eta = 0.26$$

2^{da} Ley: Postulado de Kelvin-Planck

- Una máquina tiene una **eficiencia total** ($\eta=1$) si **no expulsa calor** a un sumidero ($Q_L=0$).
- Sin embargo, esto **no es posible**.

Postulado de Kelvin-Planck

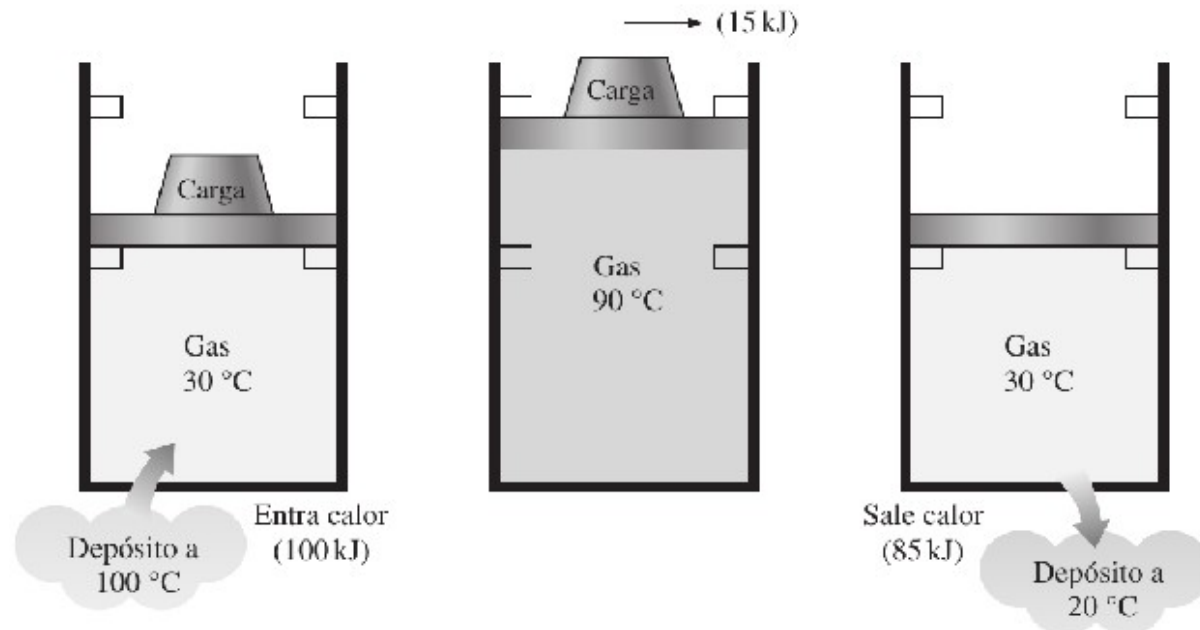
Es **imposible** que un **dispositivo** que opera en un **ciclo** reciba calor de un **solo depósito** y **produzca** una cantidad neta de trabajo.



- Es decir, (lamentablemente) es **imposible** tener una máquina térmica **100% eficiente**.
 - Notar que esto no incluye las pérdidas por fricciones u otras formas de disipación.

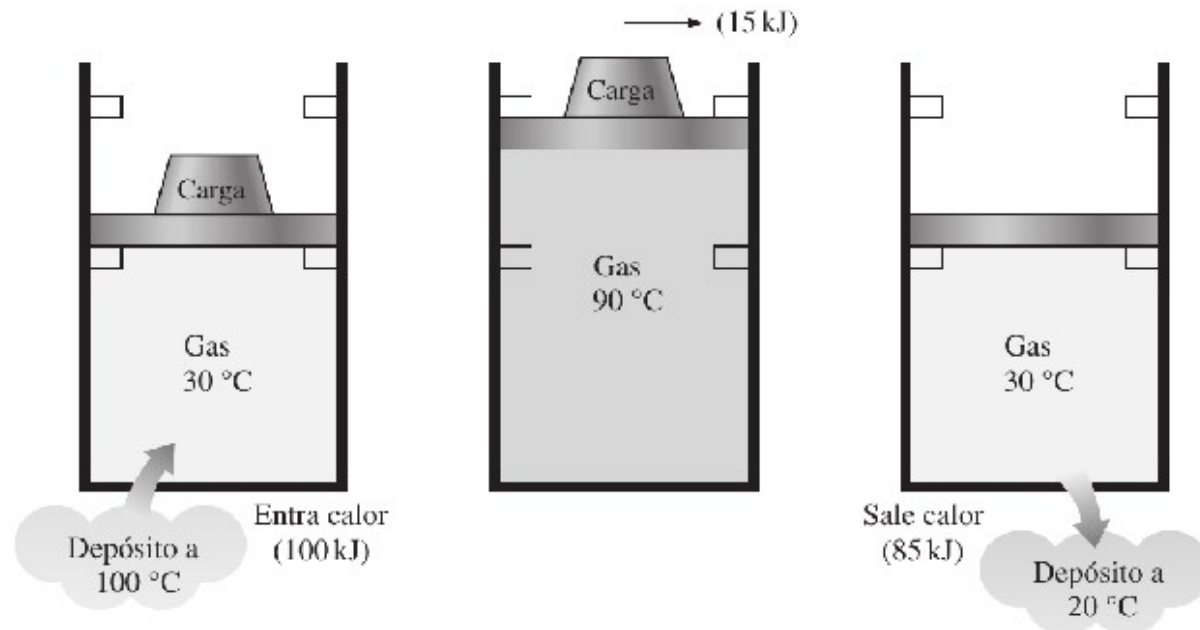
2^{da} Ley: Postulado de Kelvin-Planck

- Ejemplo: Sistema pistón-émbolo.
 1. El **depósito** transfiere **calor al gas**, el que realiza **trabajo** de frontera al **subir el pistón**.
 2. El **gas expandido** queda a una **temperatura mayor** a la inicial.
 3. Para **volver al estado inicial** es necesario **transferir calor** a un **sumidero**.



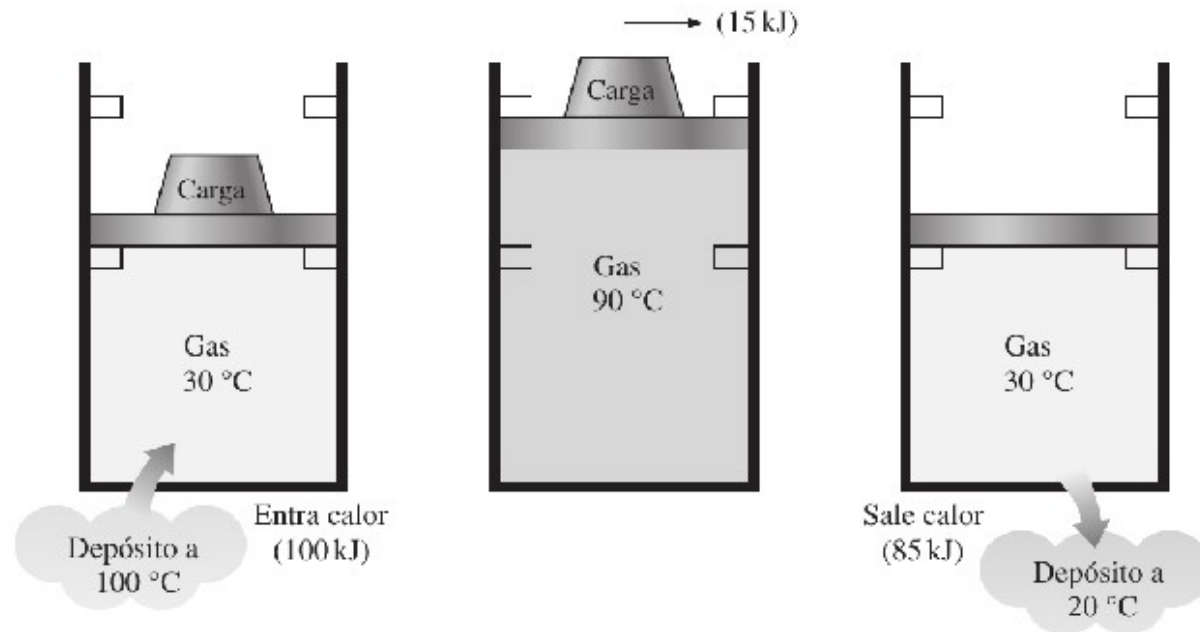
2^{da} Ley: Postulado de Kelvin-Planck

- Ejemplo: Sistema pistón-émbolo.
 - El calor transferido al gas se utiliza para realizar trabajo y aumentar la energía interna del gas.
 - Para volver al estado inicial es necesario disminuir la energía interna.



2^{da} Ley: Postulado de Kelvin-Planck

- Ejemplo: Sistema pistón-émbolo.
 - **Es necesario volver al estado inicial** para completar el **ciclo**. De otra manera no sería una máquina muy útil.
 - **No es posible reutilizar el calor perdido** ya que el calor fluye de caliente a frío.



Ejemplo 3:

- Una **planta eléctrica de carbón produce una potencia neta de 300 MW** con una **eficiencia térmica total de 32 por ciento**. La **relación real gravimétrica aire-combustible** en el **horno** se calcula que es **12 kg aire/kg de combustible**. El **poder calorífico del carbón** es **28000 kJ/kg**. Determine:
 - La **cantidad de carbón** que se **consume** durante **24 horas**.
 - La **tasa de aire** que **fluye** a través del **horno**.

Ejemplo 3:

- Una **planta eléctrica de carbón produce una potencia neta de 300 MW** con una **eficiencia térmica total de 32 por ciento**. La **relación real gravimétrica aire-combustible en el horno** se calcula que es **12 kg aire/kg de combustible**. El **poder calorífico del carbón es 28000 kJ/kg**. Determine:
 - La **cantidad de carbón que se consume durante 24 horas**.

La tasa de calor de entrada:

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{\dot{W}_{\text{neto,salida}}}{\dot{Q}_H} \\ \longrightarrow \quad \dot{Q}_H &= \frac{\dot{W}_{\text{neto,salida}}}{\eta} \\ &= \frac{300 \text{ MW}}{0.32} \\ &= 937.5 \text{ MW}\end{aligned}$$

Ahora calculamos el calor consumido:

$$\begin{aligned}Q_H &= \dot{Q}_H \Delta t = 937.5 \text{ MW } 24 \text{ h} \\ &= 937.5 \text{ MW } 24 \times 60 \times 60 \text{ s} \\ &= 8.1 \times 10^7 \text{ MJ}\end{aligned}$$

La cantidad de carbón consumido:

$$Q_H = m_{\text{fuel}} q_H \quad \longrightarrow \quad m_{\text{fuel}} = \frac{Q_H}{q} = \frac{8.1 \times 10^7 \text{ MJ}}{28 \text{ MJ/kg}}$$

$$\longrightarrow \quad m_{\text{fuel}} = 2.9 \times 10^6 \text{ kg}$$

Ejemplo 3:

- Una **planta eléctrica de carbón produce una potencia neta de 300 MW** con una **eficiencia** térmica total de **32 por ciento**. La **relación** real gravimétrica **aire-combustible** en el **horno** se calcula que es **12 kg aire/kg de combustible**. El **poder calorífico del carbón** es **28000 kJ/kg**. Determine:
 - La **tasa de aire que fluye** a través del **horno**.

Primero calculamos el flujo del combustible:

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{fuel}} &= \frac{m_{\text{fuel}}}{\Delta t} = \frac{2.9 \times 10^6 \text{ kg}}{24 \times 60 \times 60 \text{ s}} \\ &= 33.56 \text{ kg/s}\end{aligned}$$

Entonces, el flujo del aire:

$$\dot{m}_{\text{air}} = 12 \dot{m}_{\text{fuel}}$$

$$\longrightarrow \boxed{\dot{m}_{\text{air}} = 402 \text{ kg/s}}$$

Conclusiones

- Comenzamos a enunciar la **2^{da} Ley de la Termodinámica**.
- Vimos sus implicancias en la **eficiencia** de las **máquinas térmicas**.
- Próxima clase:
 - Refrigerados y bombas de calor.
 - Procesos reversibles e irreversibles.