

# Universidad Nacional de Río Negro

## Física III B – 2020

- **Unidad** 02
- **Clase** U02 C03 / 08
- **Fecha** 14 Abr 2020
- **Cont** Carnot y máquinas térmicas, 1
- **Cátedra** Asorey
- **Web** <http://gitlab.com/asoreyh/unrn-f3b>



# Contenidos: Termodinámica, alias F3B, alias F4A

Unidad 1

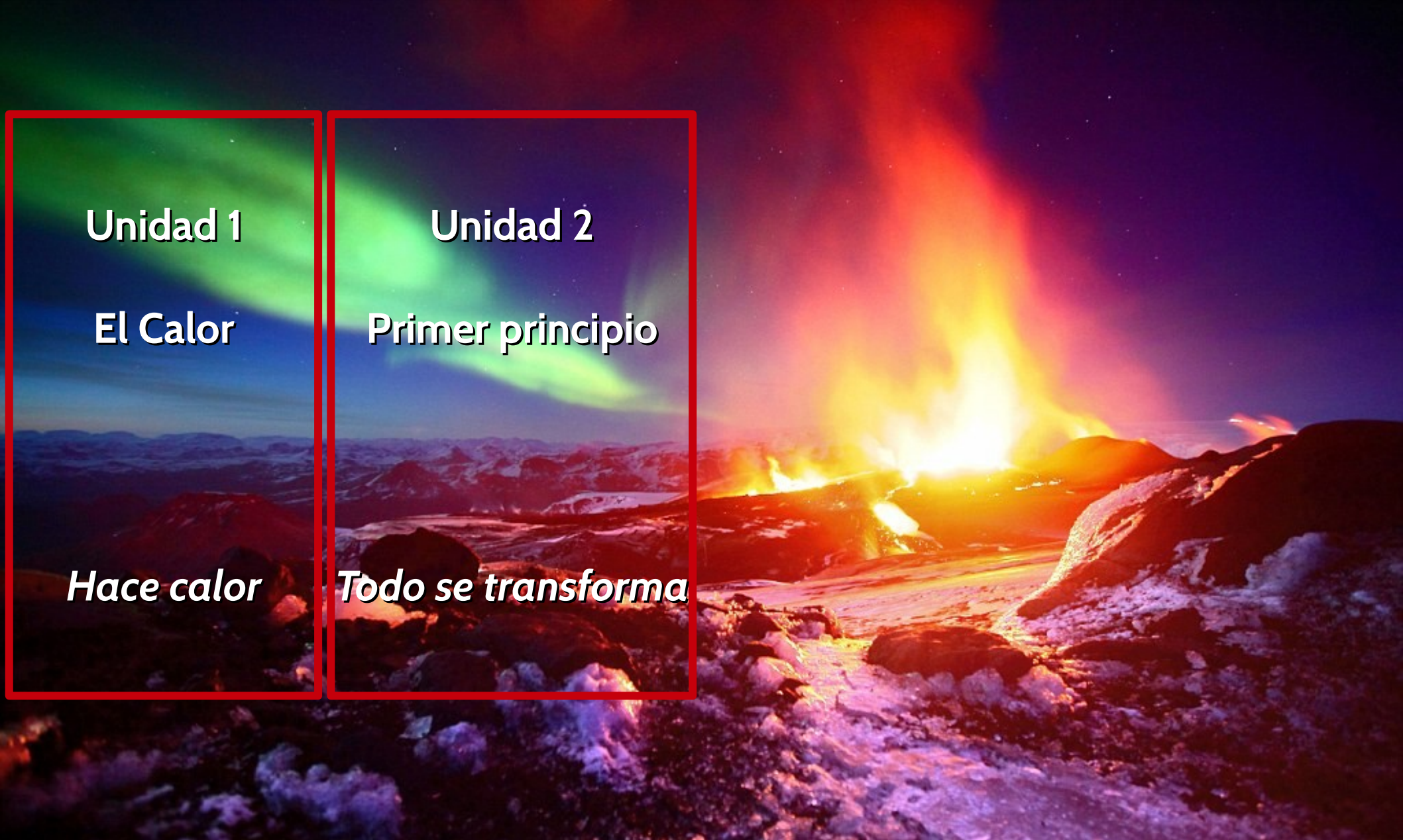
El Calor

*Hace calor*

Unidad 2

Primer principio

*Todo se transforma*





# Módulo 1 - Unidad 2: primer principio

## Del 05/Abr al 26/Abr (7 encuentros)

- **Calor y trabajo. Equivalente mecánico del calor.**  
Experimento de Joule. **Sistemas. Fuentes de calor.**  
**Primer principio. Flujo de calor.** Muerte térmica.  
**Máquinas térmicas.**



- **Isobara:**

- $W = p \Delta V$
- $\Delta U = (z/2) n R \Delta T$
- $Q = \Delta U + W$

- **Isoterma:**

- $W = n R T \ln (V_f / V_i)$
- $\Delta U = 0$
- $Q = \Delta U + W \rightarrow Q = W$

$$Q = \Delta U + W$$

- **Isocora:**

- $W = 0$
- $Q = C_v n \Delta T$
- $Q = \Delta U$

- **Adiabática**

- $W = -\Delta U$
- $\Delta U = (z/2) n R \Delta T$
- $Q = 0 \rightarrow W = -\Delta U$

$$PV = n R T$$



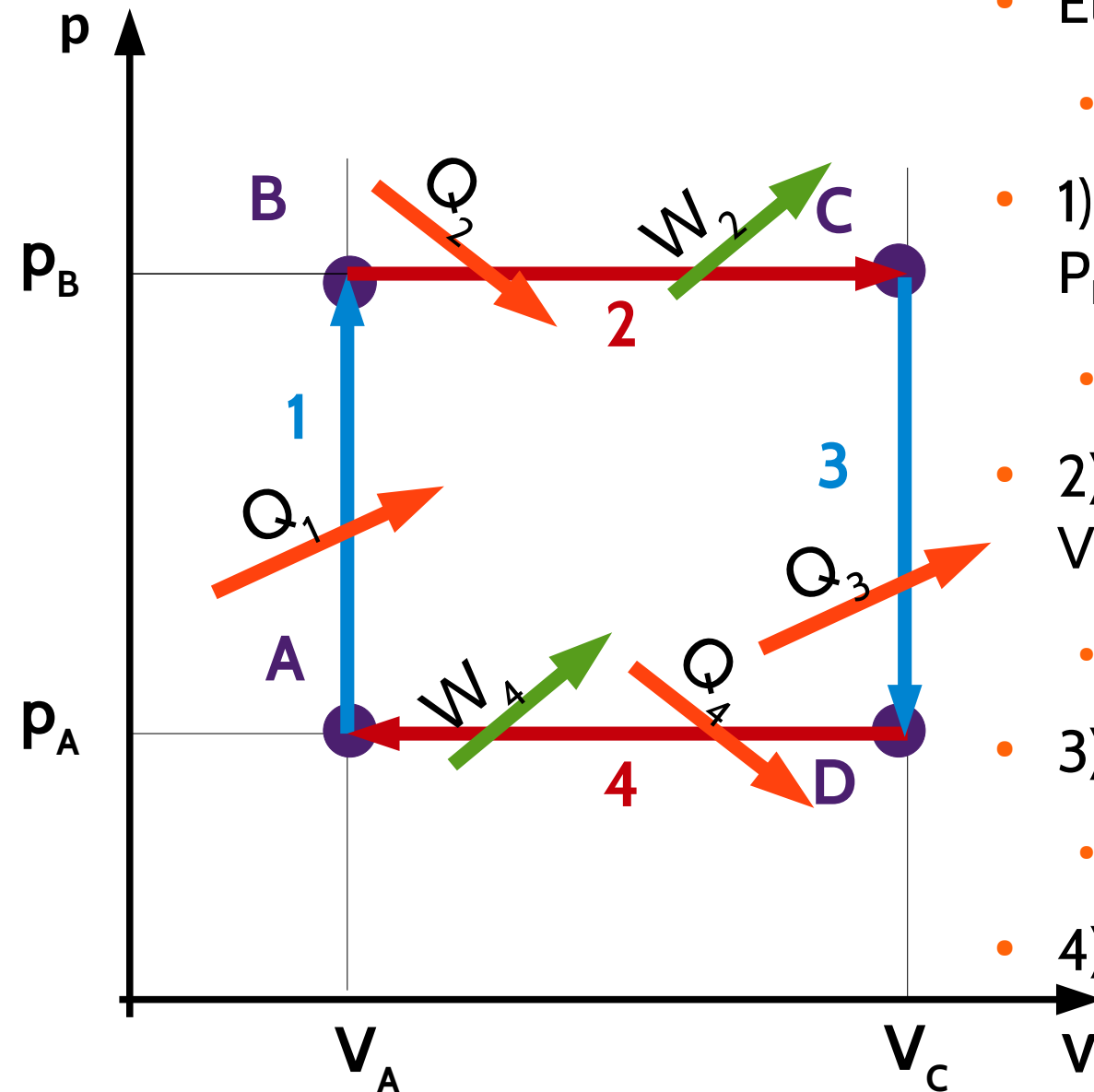
- A medida que el ciclo avanza, el sistema intercambia calor ( $Q$ ) y trabajo mecánico ( $W$ ) con el medio
- El sistema “almacena” energía en forma de energía interna ( $\rightarrow$  Temperatura  $\rightarrow$  Energía Cinética)
- Al finalizar el ciclo,  $U_f = U_i \rightarrow \Delta U = 0$
- Para el ciclo completo, el primer principio garantiza

$$Q = W$$

- Pero esos valores son “netos”

# Otro ciclo, el cuadrado letal

$n = \text{cte}$



- El gas se encuentra en estado A
  - $P_A, n_A, V_A \rightarrow T_A$
- 1) Transformación isócora hasta B,  $P_B = 3 P_A$ 
  - $P_B = 3 P_A, n_A, V_B = V_A \rightarrow T_B$
- 2) Transformación isóbara hasta C,  $V_C = 3 V_A$ 
  - $P_C = P_B, n_A, V_C = 3 V_B \rightarrow T_C$
- 3) Transformación isócora hasta D
  - $V_D = V_C, n_A, P_D = P_A \rightarrow T_D$
- 4) Transformación isóbara hasta A

- **Calor**

- $Q > 0 \leftarrow$  Calor entra al sistema desde una fuente
- $Q < 0 \leftarrow$  Calor sale del sistema  $\rightarrow$  No es aprovechable

- **Trabajo**

- $W > 0 \leftarrow$  Trabajo producido por el sistema  $\rightarrow$  Útil
- $W < 0 \leftarrow$  Trabajo realizado sobre el sistema  $\rightarrow$  Costo
- ¿Qué obtuve luego de un ciclo?  $\rightarrow$  Trabajo Neto
- ¿Que tuve que poner para lograr el ciclo?  $\rightarrow$  Calor  $Q > 0$

- Definimos al rendimiento como

Lo que obtuve

$$\eta = \frac{\text{Lo que obtuve}}{\text{Lo que tuve que poner}}$$

Lo que tuve que poner

- En términos del ciclo,

$W_{\text{neto}}$

$$\eta = \frac{W_{\text{neto}}}{Q_{>0}}$$

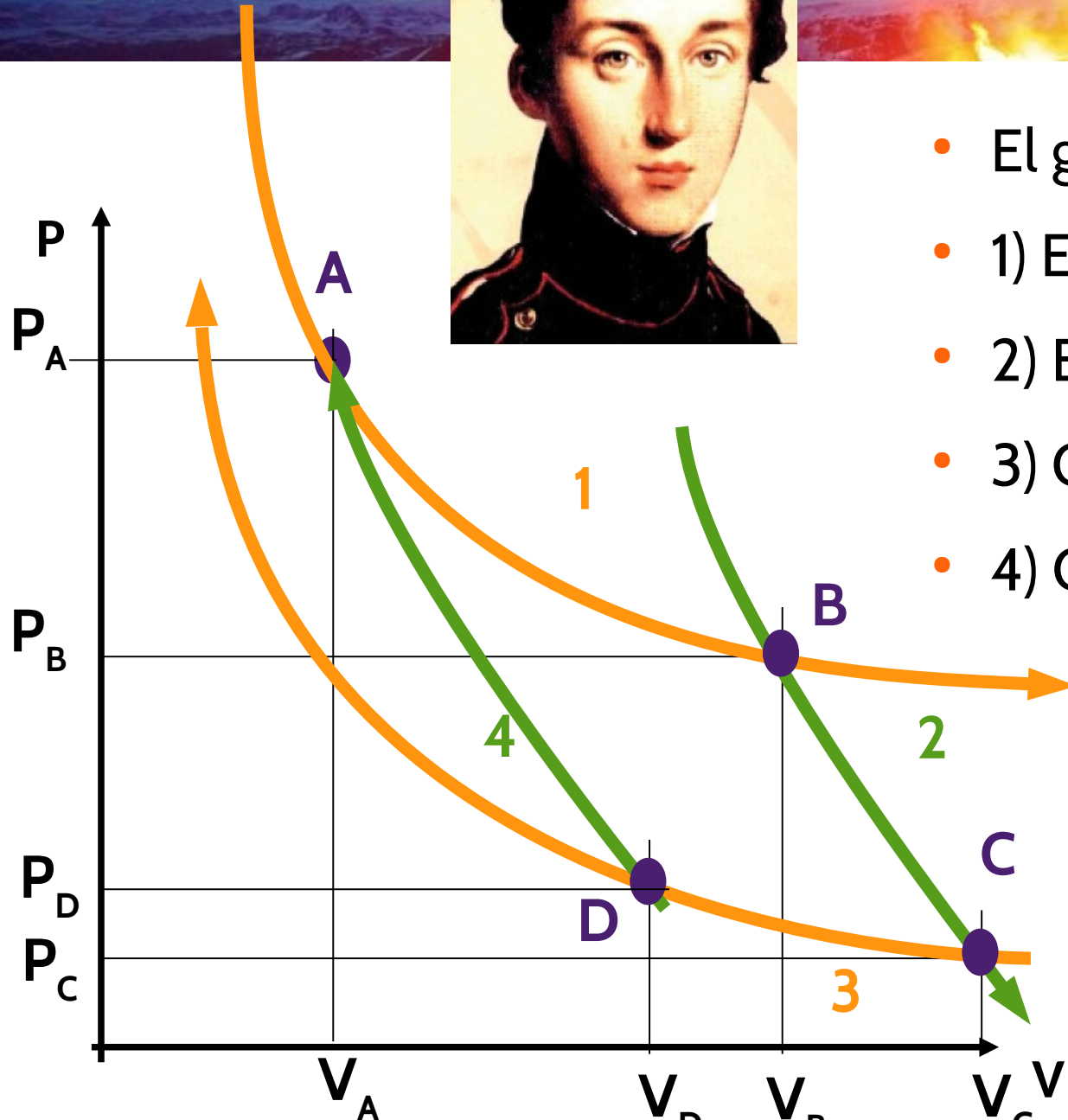
$Q_{>0}$



# Reversibilidad termodinámica (volveremos)

- **Proceso Reversible** es aquel en el que el sentido puede invertirse mediante un cambio infinitesimal de las condiciones de entorno
  - Idealización
  - Punto a punto → desplazamiento infinitesimal del equilibrio
  - Procesos conservativos
  - Al invertirse el proceso, el sistema regresa al estado inicial
  - Coloquial: procesos muuyyyy lentos
- **Un ciclo reversible** es aquel ciclo en el que todas las transformaciones son reversibles

# Otro ciclo → Carnot



- El gas se encuentra en A
- 1) Expansión Isotérmica A→B
- 2) Expansión Adiabática B→C
- 3) Compresión Isotérmica C→D
- 4) Compresión Adiabática D→A

**Ciclo completo reversible**  
(fuera de escala)

Transf.	Q	$\Delta U$	W
1) Isoterma $A \rightarrow B$	$=W_1 (>0)$	0	$nRT_A \ln(V_B/V_A)$
2) Adiabática $B \rightarrow C$	0	$(z/2) nR(T_C - T_B)$	$-\Delta U_2 (>0)$
3) Isoterma $C \rightarrow D$	$=W_3 (<0)$	0	$nRT_C \ln(V_D/V_C)$
4) Adiabática $D \rightarrow A$	0	$(z/2) nR(T_A - T_D)$	$-\Delta U_4 (<0)$

## • Verificar

- $\Delta U=0$   $\leftarrow$  En el ciclo no hay cambio en U
- $Q = W$   $\leftarrow$  Primer principio: El calor neto = El trabajo neto



# Rendimiento de la máquina de Carnot

- Lo que obtuve / Lo que puse
  - Obtuve: Trabajo neto (Suma de los  $W$ )
  - Puse: Calor entrante (Sólo cuento los calores positivos  $Q > 0$ )
- Nos preparamos, respiramos hondo, y vamos...

# Eficiencia del ciclo de Carnot

- Primero verifiquemos que a lo largo del ciclo  $\Delta U=0$ :

$$\Delta U_T = \sum U_i \rightarrow \Delta U_T = \left(\frac{Z}{2}R\right)n(T_C - T_B) + \left(\frac{Z}{2}R\right)n(T_A - T_D)$$
$$\Delta U_T = \left(\frac{Z}{2}R\right)n(T_C - T_B + T_A - T_D)$$

y dado que las transformaciones 1 y 3 son isotérmicas:

$$\Delta U_T = \left(\frac{Z}{2}R\right)n(T_C - T_A + T_A - T_C), \Rightarrow \Delta U_T = 0, \text{ y además}$$

$$W_2 = -W_4$$

# Eficiencia del ciclo de Carnot

- ¿cual es la relación entre volúmenes en las adiabáticas?

Adiabática:  $pV^\gamma = \text{cte} \rightarrow TV^{\gamma-1} = \text{cte}$

$$T_B V_B^{\gamma-1} = T_C V_C^{\gamma-1} \quad \text{y} \quad T_A V_A^{\gamma-1} = T_D V_D^{\gamma-1}$$

$$\begin{aligned} \frac{T_B V_B^{\gamma-1}}{T_A V_A^{\gamma-1}} &= \frac{T_C V_C^{\gamma-1}}{T_D V_D^{\gamma-1}} \\ \left( \frac{T_B}{T_A} \right) \left( \frac{V_B}{V_A} \right)^{\gamma-1} &= \left( \frac{T_C}{T_D} \right) \left( \frac{V_C}{V_D} \right)^{\gamma-1} \\ \left( \frac{V_B}{V_A} \right)^{\gamma-1} &= \left( \frac{V_C}{V_D} \right)^{\gamma-1} \\ \boxed{\frac{V_B}{V_A} &= \frac{V_C}{V_D}} \end{aligned}$$



# Eficiencia del ciclo de Carnot

- Trabajo neto

$$W = \sum W_i = W_1 + W_2 + W_3 + W_4, \text{ y dado que } W_2 = -W_4 \rightarrow W = W_1 + W_3$$

$$W_1 = nRT_A \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right) \text{ y } W_3 = nRT_C \ln\left(\frac{V_D}{V_C}\right)$$

$$W = nRT_A \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right) + nRT_C \ln\left(\frac{V_D}{V_C}\right)$$

$$W = nRT_A \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right) - nRT_C \ln\left(\frac{V_C}{V_D}\right)$$

$$W = nRT_A \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right) - nRT_C \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)$$

$$W = nR \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right) (T_A - T_C)$$

# Eficiencia del ciclo de Carnot

- Calor entregado al sistema (sólo en transformación 1)

$$Q_{>0} = nRT_A \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)$$

- Entonces el rendimiento:

$$\eta = \frac{\sum_i W_i}{\sum_j (Q_j > 0)}$$
$$\eta_{\text{Carnot}} = \frac{nRT_A \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)(T_A - T_C)}{nRT_A \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)}$$

$$\eta_{\text{Carnot}} = \frac{T_A - T_C}{T_A} \rightarrow \eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_C}{T_A} < 1$$

# Eficiencia de la máquina de Carnot

- Lo que obtuve / Lo que puse
  - Obtuve: Trabajo neto (Suma de los W)
  - Puse: Calor entrante (Sólo cuento los calores positivos  $Q > 0$ )
- Entonces, para el ciclo de Carnot

$$\eta = \frac{\sum_i W_i}{\sum_j (Q_j > 0)} \rightarrow \eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_C}{T_A} < 1$$

- $T_C$ : baño térmico de la transformación 3;  $T_A$ : térmico de la transformación 1  $\rightarrow T_C < T_A$ .
- $T_C \rightarrow$  Baño frío;  $T_A \rightarrow$  baño caliente



# Maldita termodinámica, 1ra parte

- Vemos que a pesar de ser un gas ideal y todas las transformaciones son reversibles,

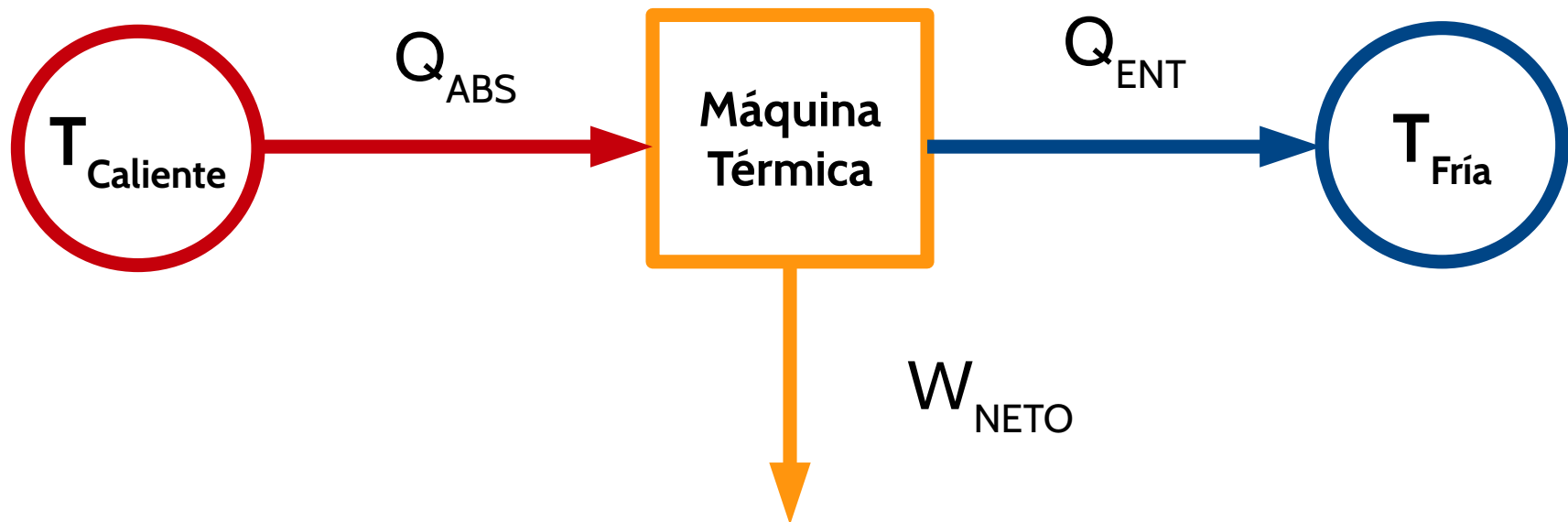
$$\eta_{\text{Carnot}} = 1 - \frac{T_C}{T_A} < 1$$

- El rendimiento de una máquina de Carnot siempre es menor que 1:
- 1<sup>er</sup> Teorema de Carnot (demostración en la próx. unidad)

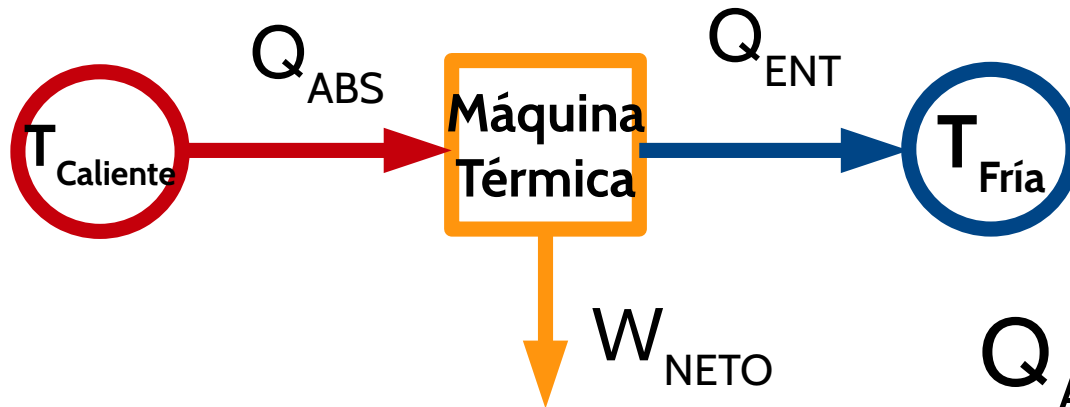
**No existe una máquina térmica que funcionando entre dos fuentes térmicas dadas tenga un rendimiento mayor que una máquina reversible (de Carnot).**

# Máquinas térmicas

- **Máquina térmica:** dispositivo cíclico que absorbe calor de una fuente caliente, realiza un trabajo mecánico y entrega la energía remanente en forma de calor a una fuente fría
- Este calor no es aprovechable por la misma máquina térmica



# Según el primer principio



$$Q_{\text{ABS}} = W_{\text{NETO}} + Q_{\text{ENT}}$$

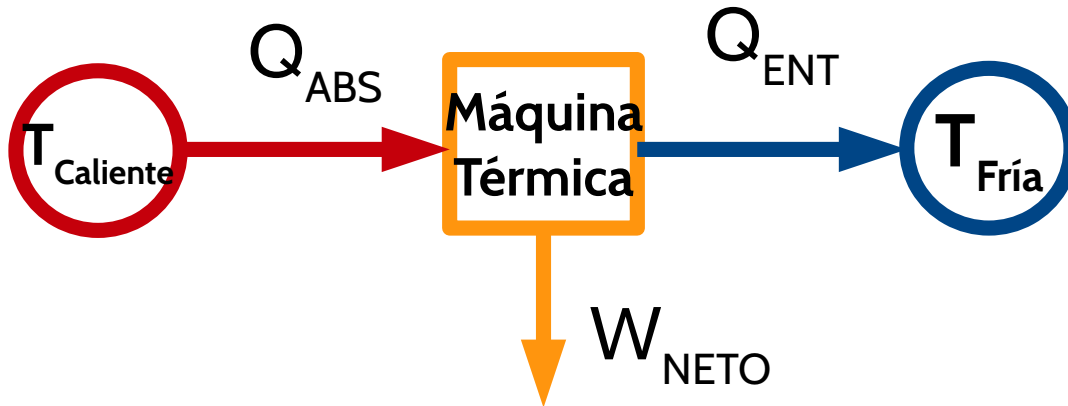
$$W_{\text{NETO}} = Q_{\text{ABS}} - Q_{\text{ENT}}$$

$$\eta = \frac{W_{\text{NETO}}}{Q_{\text{ABS}}}$$

$$\Rightarrow \eta = \frac{Q_{\text{ABS}} - Q_{\text{ENT}}}{Q_{\text{ABS}}} = 1 - \frac{Q_{\text{ENT}}}{Q_{\text{ABS}}}$$



# Y según Carnot....



$$\eta = \frac{Q_{\text{ABS}} - Q_{\text{ENT}}}{Q_{\text{ABS}}} = 1 - \frac{Q_{\text{ENT}}}{Q_{\text{ABS}}} \leq 1 - \frac{T_{\text{Fría}}}{T_{\text{Caliente}}}$$

# Máquina térmica – un poco más realista

