

# Universidad Nacional de Río Negro

## Física III B – 2020

- **Unidad** 02
- **Clase** U02 C02
- **Fecha** 07 Abr 2020
- **Cont** Ciclos
- **Cátedra** Asorey
- **Web** <http://gitlab.com/asoreyh/unrn-f3b>



# Contenidos: Termodinámica, alias F3B, alias F4A

Unidad 1

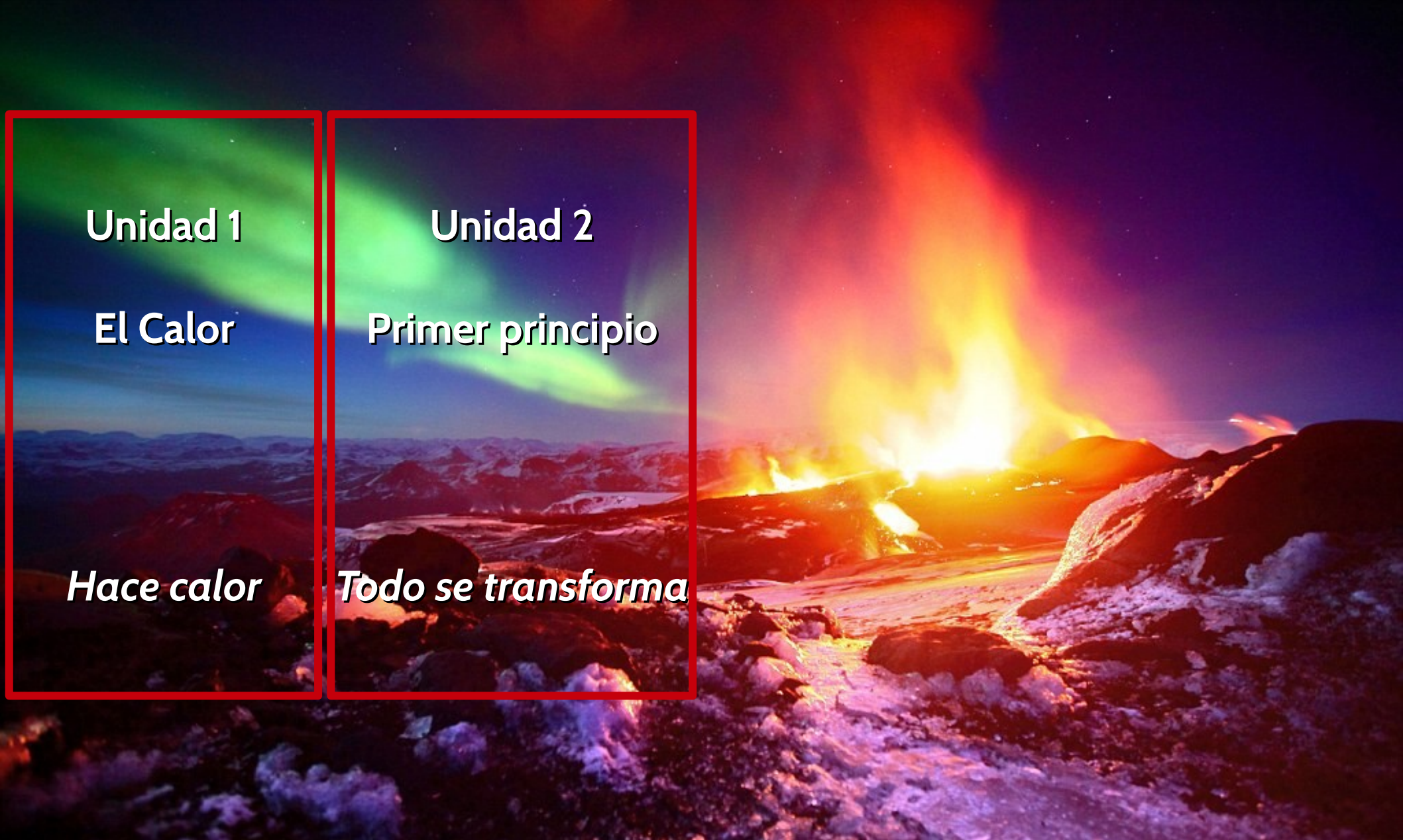
El Calor

*Hace calor*

Unidad 2

Primer principio

*Todo se transforma*





# Módulo 1 - Unidad 2: Primer Principio

## Del 31/Mar al 23/Abr (6 encuentros)

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



# Nada se gana, nada se pierde, todo se transforma

- La **conservación de la energía** para un **sistema termodinámico** se expresa de la siguiente forma

$$Q = \Delta U + W$$

**Primer principio  
de la termodinámica**

$Q$  = Calor cedido al sistema (signo de  $\Delta T$ )

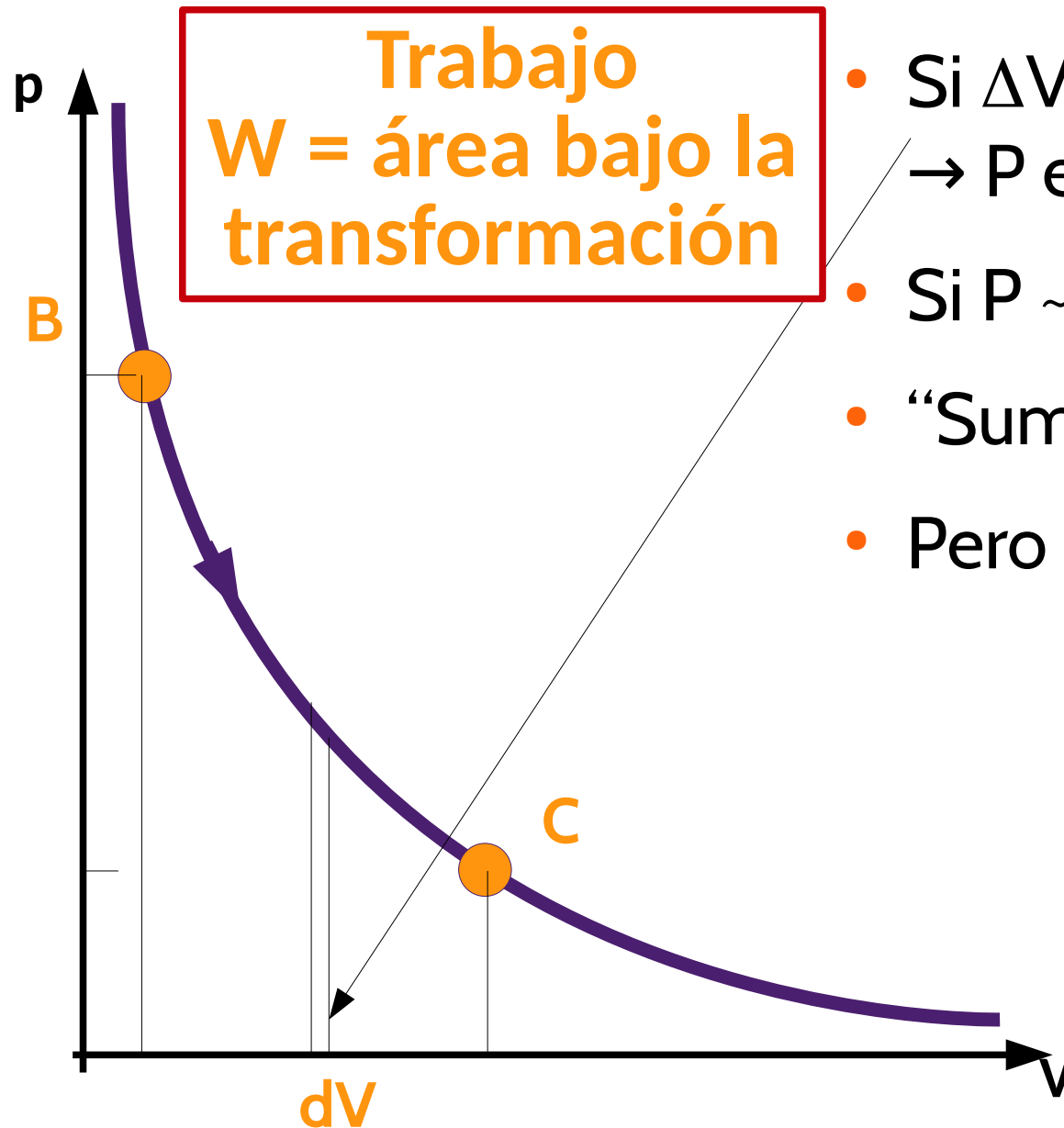
$\Delta U$  = Cambio de la energía interna del sistema (signo de  $\Delta T$ )

$W$  = Trabajo realizado por el sistema (signo de  $\Delta V$ )



- ¿Por qué se usa  $U$  para la energía interna?
  - En el Siglo XIX se usaba en general la letra  $V$  como símbolos para las energías potenciales (típicamente por la relación entre la energía potencial electrostática y el Voltaje)
  - Rankine introduce en 1853 el concepto de Energía Interna (W. J. Rankine, *On the general law of the transformation of energy*, Proc. of the Philosophical Society of Glasgow, vol. 3, no. 5, pages 276-280, Feb 1853)
  - Usó la letra  $U$  para esta forma de energía
    - **Error tipográfico:** la  $U$  y la  $V$  eran intercambiables en latín
    - **Pragmatismo:** Para diferenciar del volumen  $V$

# Transformación isotérmica



- Si  $\Delta V$  pequeño,  $\Delta V \rightarrow dV$   
 $\rightarrow P$  es aprox. constante
- Si  $P \sim \text{cte} \rightarrow dW = p dV$
- “Sumando”:  $W = \int_{V_B}^{V_C} p dV$
- Pero  $P = n R T / V$ :

$$W = \int_{V_B}^{V_C} n R T \frac{dV}{V}$$

$$W = n R T \int_{V_B}^{V_C} \frac{dV}{V}$$

$$W = n R T \ln \left( \frac{V_C}{V_B} \right)$$

- **Isobara:**

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

- **Isoterma:**

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

- **Isocora:**

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

- **Adiabática**

- Índice adiabático

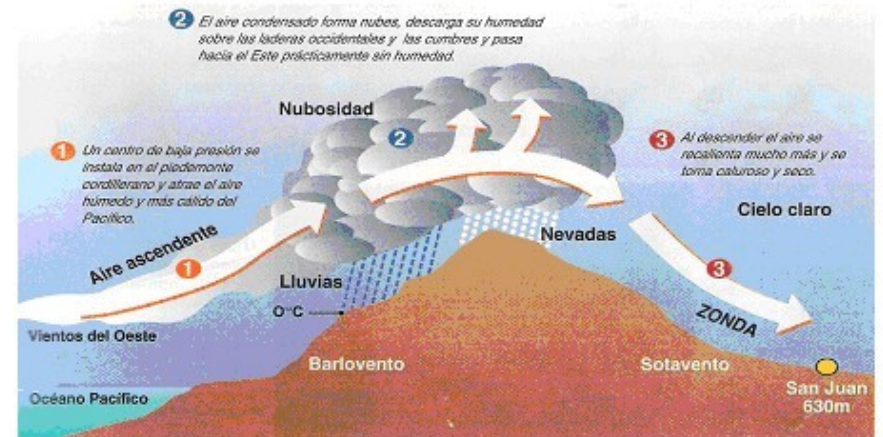
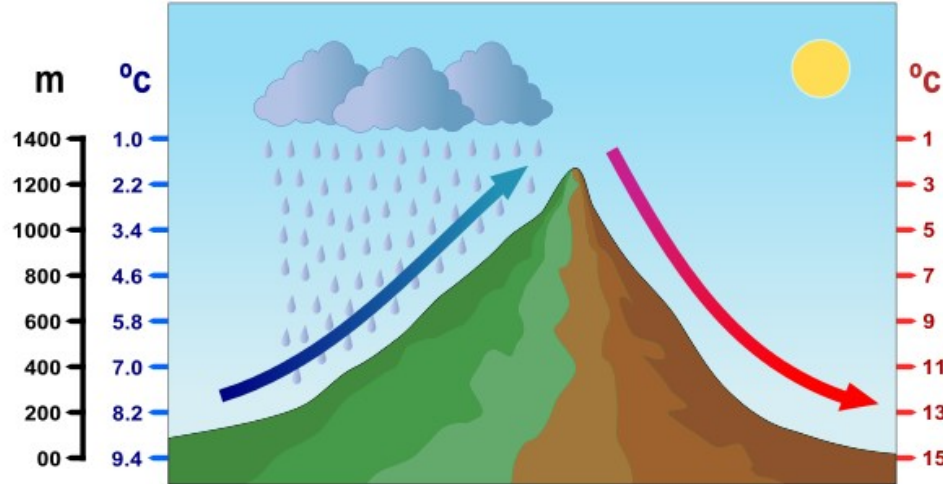
$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \rightarrow \gamma = \frac{z+2}{z}$$

# Último caso: No hay intercambio de calor

- No hay intercambio de calor con el medio
  - Recipiente muy aislado (calorímetro); ó
  - Transformación muy rápida (abriendo una Coca Cola)
- En este caso:  **$Q = 0$  ← Transformación Adiabática**
- $Q = \Delta U + W \rightarrow 0 = \Delta U + W \rightarrow \mathbf{W = - \Delta U}$
- **En una expansión adiabática, el trabajo se realiza a costa de la energía interna del gas**
- Expansión adiabática → Brusco descenso de T  
**Y viceversa: en una compresión adiabática, todo el trabajo se convierte en energía interna (Zonda)**



# El zonda: efecto Föhn



## El primer principio dice:

- $Q=0 \rightarrow W = - \Delta U \rightarrow \text{límite: } dW = -dU \rightarrow p dV = -dU$
- Pero  $dU = (z/2) d(n R T)$  y por la ec. Estado,  $nRT=pV$ :

$$dU = \left(\frac{z}{2}\right) d(p V) \rightarrow dU = \left(\frac{z}{2}\right) (dp V + p dV)$$

$$\rightarrow p dV = -\frac{z}{2} V dp - \frac{z}{2} p dV$$

$$p dV + \left(\frac{z}{2}\right) p dV = -\left(\frac{z}{2}\right) V dp \rightarrow \left(\frac{z+2}{2}\right) p dV = -\left(\frac{z}{2}\right) V dp$$

$$\left(\frac{z+2}{z}\right) p dV = -V dp \rightarrow \gamma p dV = -V dp \rightarrow -\gamma \left(\frac{dV}{V}\right) = \frac{dp}{p}$$



¡Ánimo!

- Integrando ambos lados:

$$-\gamma \int_{V_i}^{V_f} \frac{dV}{V} = \int_{p_i}^{p_f} \frac{dp}{p}$$

$$-\gamma \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right) = \ln\left(\frac{p_f}{p_i}\right)$$

$$\ln\left(\frac{V_i}{V_f}\right)^\gamma = \ln\left(\frac{p_f}{p_i}\right)$$

$$\left(\frac{V_i}{V_f}\right)^\gamma = \left(\frac{p_f}{p_i}\right)$$

Transformación Adiabática

$$p_i V_i^\gamma = p_f V_f^\gamma \rightarrow p V^\gamma = \text{cte} \rightarrow T V^{\gamma-1} = \text{cte}$$



# La cuenta "a mano"



Por el primer principio  $Q = W + \Delta U$  y como  $Q = 0 \Rightarrow W = -\Delta U$

luego  $dW = -dU \Rightarrow$  y como  $dU = \left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right) nRdT = \left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right) d(nRT) = \left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right) d(pV)$  Use Ec. Estado

$\Rightarrow dW = -dU \rightarrow p dV = -\left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right) (V dp + p dV)$  . Agregando

$$p dV + \left(\frac{\gamma}{\gamma-1}\right) p dV = -\frac{\gamma}{\gamma-1} V dp \rightarrow \left(1 + \frac{\gamma}{\gamma-1}\right) p dV = -\frac{\gamma}{\gamma-1} V dp$$

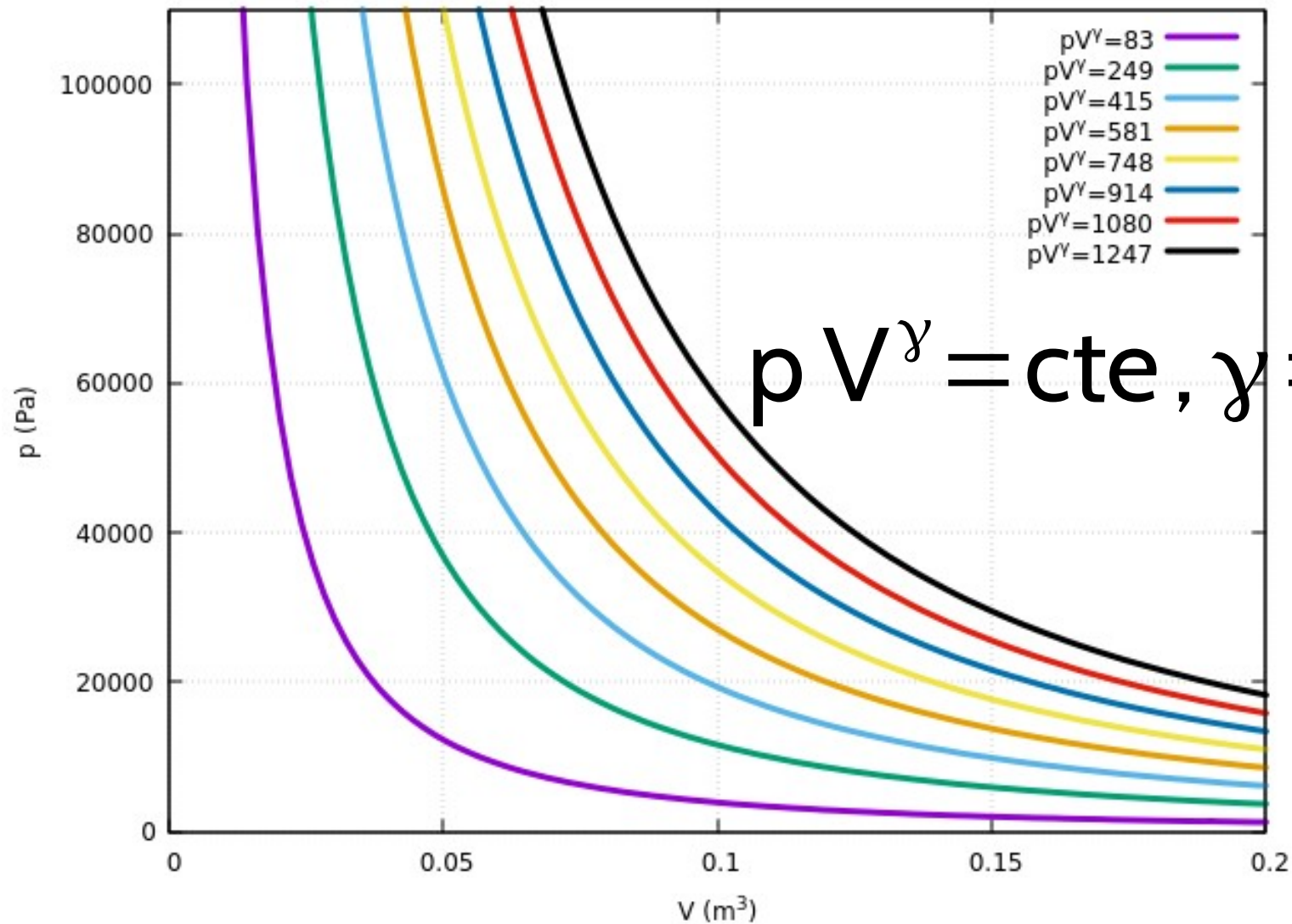
$$\Rightarrow \left(\frac{\gamma+1}{\gamma-1}\right) \left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right) p dV = -V dp \rightarrow \left(\frac{\gamma+1}{\gamma}\right) p dV = -V dp \Rightarrow \gamma p dV = -V dp$$

$$\Rightarrow -\gamma \frac{p dV}{V} = \frac{dp}{p} \quad \text{Integrando: } -\gamma \int_{V_i}^{V_f} \frac{dV}{V} = \int_{p_i}^{p_f} \frac{dp}{p}$$

$$\rightarrow -\gamma \ln \left( \frac{V_f}{V_i} \right) = \ln \left( \frac{p_f}{p_i} \right) \rightarrow \ln \left( \frac{V_i}{V_f} \right)^\gamma = \ln \left( \frac{p_f}{p_i} \right) \rightarrow \frac{V_i^\gamma}{V_f^\gamma} = \frac{p_f}{p_i}$$

$$\Rightarrow p_i V_i^\gamma = p_f V_f^\gamma \rightarrow \boxed{pV^\gamma = \text{cte}}$$

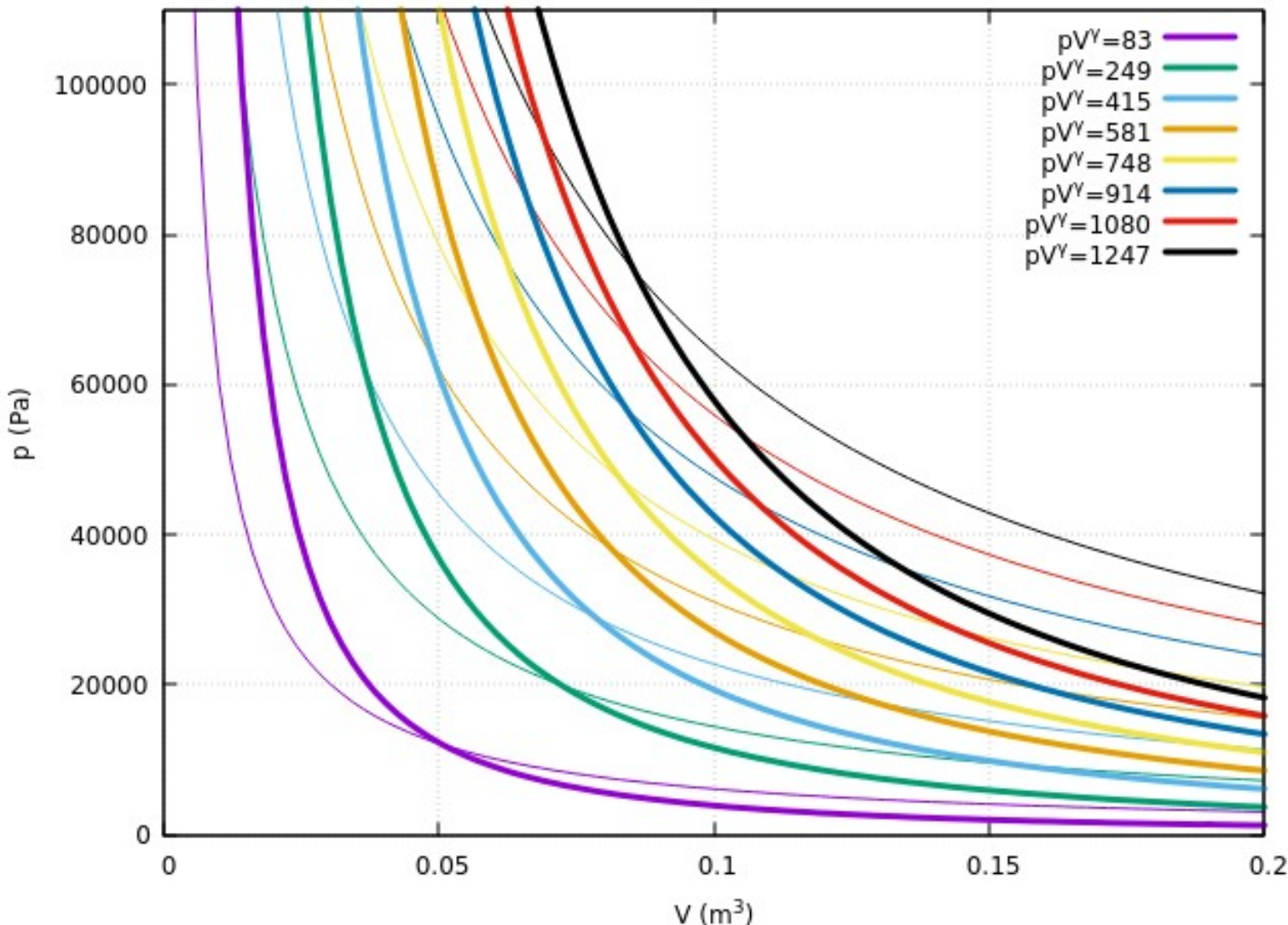
# Curvas adiabáticas



$$p V^\gamma = \text{cte}, \gamma = 5/3$$



# Adiabáticas vs isotermas



- Se aproximan asintóticamente a los ejes
- Cada adiabática intersecta a una isoterma en un único punto (volveremos...)
- Las adiabáticas son isentrópicas (volveremos...)



# Trabajo adiabático

- Según el primer principio y teniendo en cuenta  $Q=0$ :

$$W = -\Delta U \rightarrow W = -\frac{Z}{2} n R \Delta T \rightarrow W = -\frac{Z}{2} n R (T_f - T_i)$$

$$W = -\frac{Z}{2} (P_f V_f - P_i V_i)$$

$$W = -\left( \frac{P_f V_f - P_i V_i}{\gamma - 1} \right)$$

- **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:**

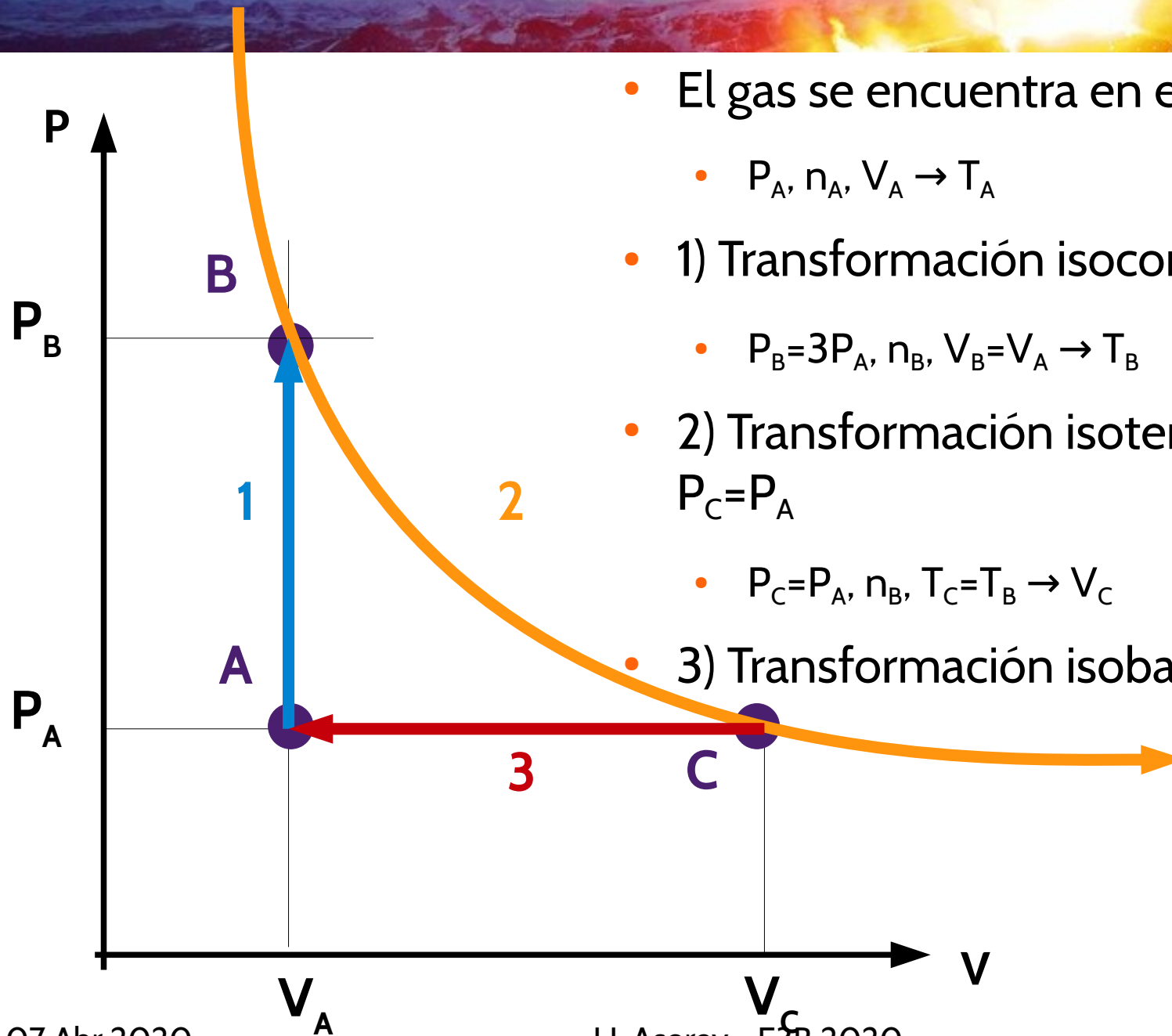
- $W = 0$
- $Q = C_v n \Delta T$
- $Q = \Delta U$

- **Adiabática**

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

$$PV = n R T$$

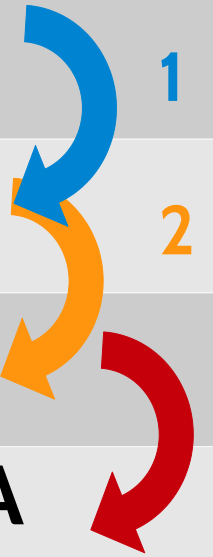
# Sucesión de transformaciones



- El gas se encuentra en estado A
  - $P_A, n_A, V_A \rightarrow T_A$
- 1) Transformación isocora hasta B,  $P_B = 3 P_A$ 
  - $P_B = 3P_A, n_B, V_B = V_A \rightarrow T_B$
- 2) Transformación isoterma hasta C,  $P_C = P_A$ 
  - $P_C = P_A, n_B, T_C = T_B \rightarrow V_C$
- 3) Transformación isobara hasta A



# Cuadro de estados



Estado	p	V	T	n
A	$p_A$	$V_A$	$T_A$	$n_A$
B	$p_B = 3p_A$	$V_B = V_A$	$T_B$	$n_A$
C	$p_C = p_A$	$V_C$	$T_C = T_B$	$n_A$
→ A	$p_A$	$V_A$	$T_A$	$n_A$

- Identificar los datos en el problema
- Determinar datos faltantes con las transformaciones
- Calcular datos faltantes con ec. de estado  $\rightarrow pV=nRT$

# Cuadro de transformaciones

Transf	Q	W	$\Delta U$
1: isocora	$= \Delta U$	0	$=(z/2) n R (T_B - T_A)$
2: isoterma	$= W$	$= nRT \ln(V_C/V_A)$	0
3: isobara	$= \Delta U + W$	$= P(V_A - V_C)$	$=(z/2) n R (T_A - T_C)$

- Identificar aquellos valores que no cambian en cada transformación
- Dejar el calor Q para el final (evita confusiones)
- En un ciclo  $\Delta U_{\text{total}} = 0 \leftarrow$  El gas vuelve a su estado inicial  $U_f = U_i$

- 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

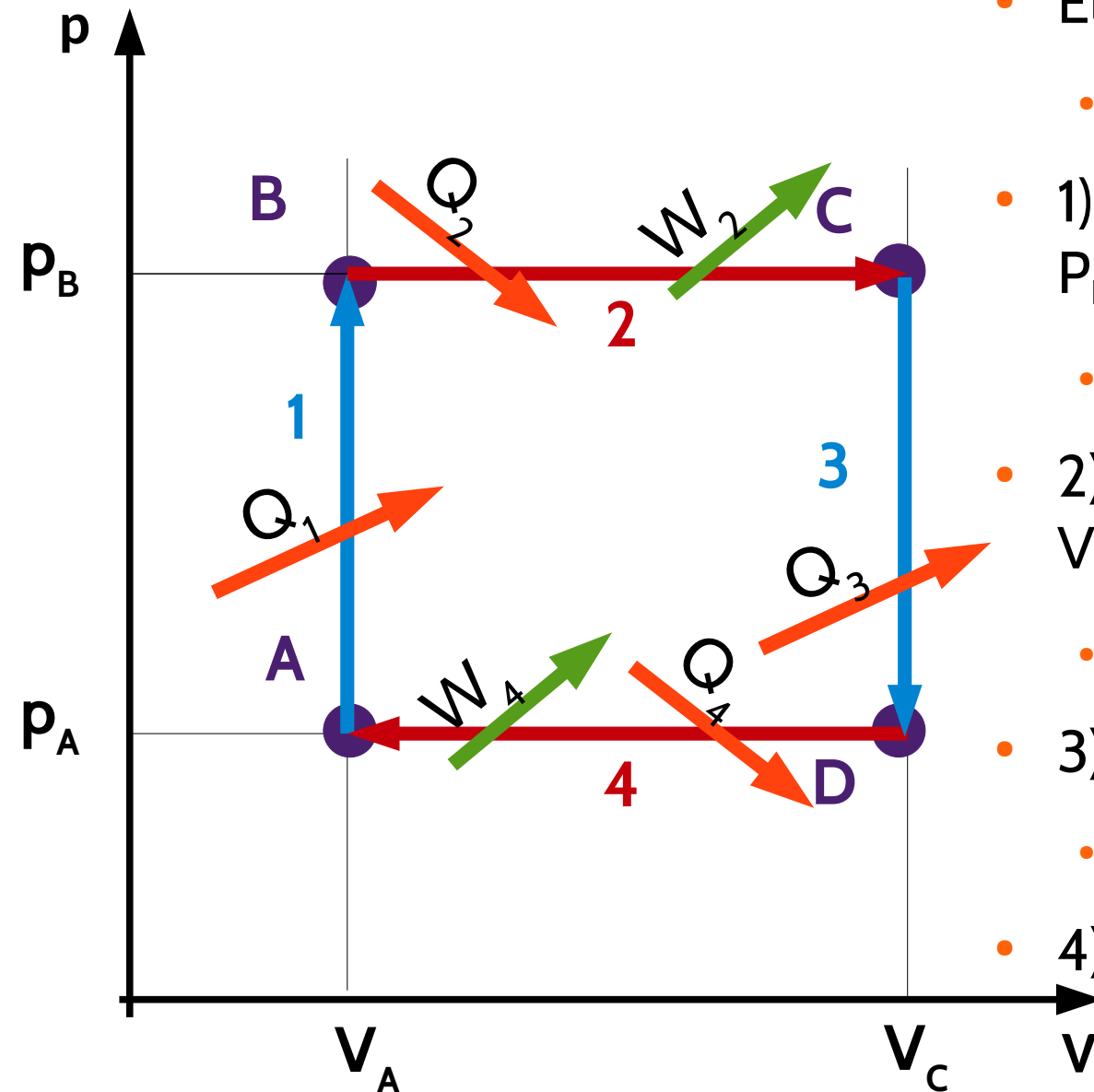
$$Q = W$$

- 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

# Cuadro de estados

Estado	$p$	$V$	$T$	$n$
A	$p_A$	$V_A$	$T_A$	$n_A$
1:B	$p_B = 3p_A$	$V_B = V_A$	$T_B$	$n_A$
2:C	$p_C = p_B$	$V_C = 3V_B$	$T_C$	$n_A$
3:D	$p_D = p_A$	$V_D = V_C$	$T_D$	$n_A$
4:A	$p_A$	$V_A$	$T_A$	$n_A$

# Cuadro de transformaciones

Transf	Q	W	$\Delta U$
1 <sub>A→B</sub> :isócora	$= \Delta U$	0	$=(z/2) n R (T_B - T_A)$
2 <sub>B→C</sub> :isóbara	$= \Delta U + W$	$= p_B (V_C - V_B)$	$=(z/2) n R (T_C - T_B)$
3 <sub>C→D</sub> :isócora	$= \Delta U$	0	$=(z/2) n R (T_D - T_C)$
4 <sub>D→A</sub> :isóbara	$= \Delta U + W$	$= p_D (V_D - V_A)$	$=(z/2) n R (T_A - T_D)$

- **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,

$W_{\text{neto}}$

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

$Q_{>0}$