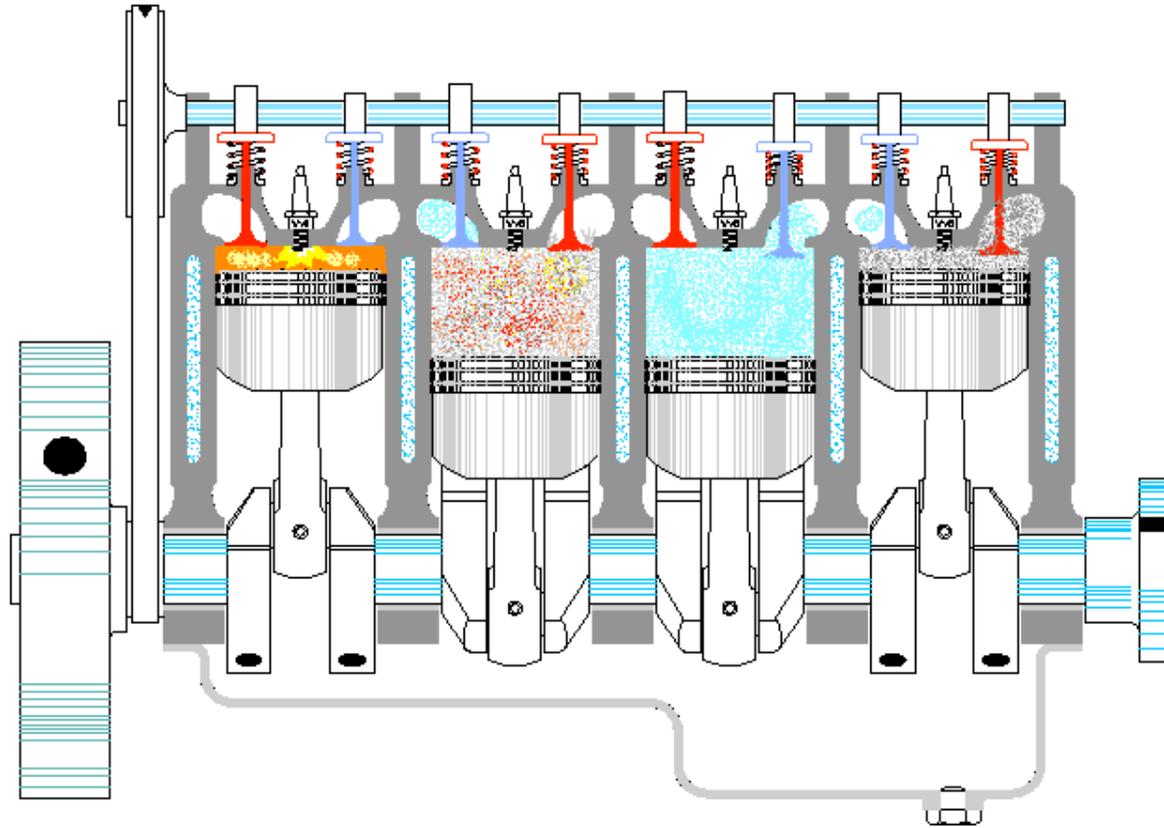


# Clase 15

# Motor a Combustión Interna



# Motor a Combustión Interna

- En un **motor a combustión interna** un combustible (e.g. bencina) mezclado con un oxidante (e.g. aire) sufre una ignición dentro de una cámara de combustión que es parte del sistema termodinámico que hace el trabajo. El efecto de la combustión es transformar energía potencial química en calor, el cual entra al sistema. El sistema luego se expande haciendo trabajo sobre el entorno (por lo general sobre un pistón) y los productos de la combustión son removidos, de forma que el sistema elimine el calor residual que no pudo ser transformado en trabajo.
- El motor trabaja entre dos temperaturas mínima y máxima, dadas por la temperatura de la mezcla al ser inyectada y su temperatura después de la combustión.

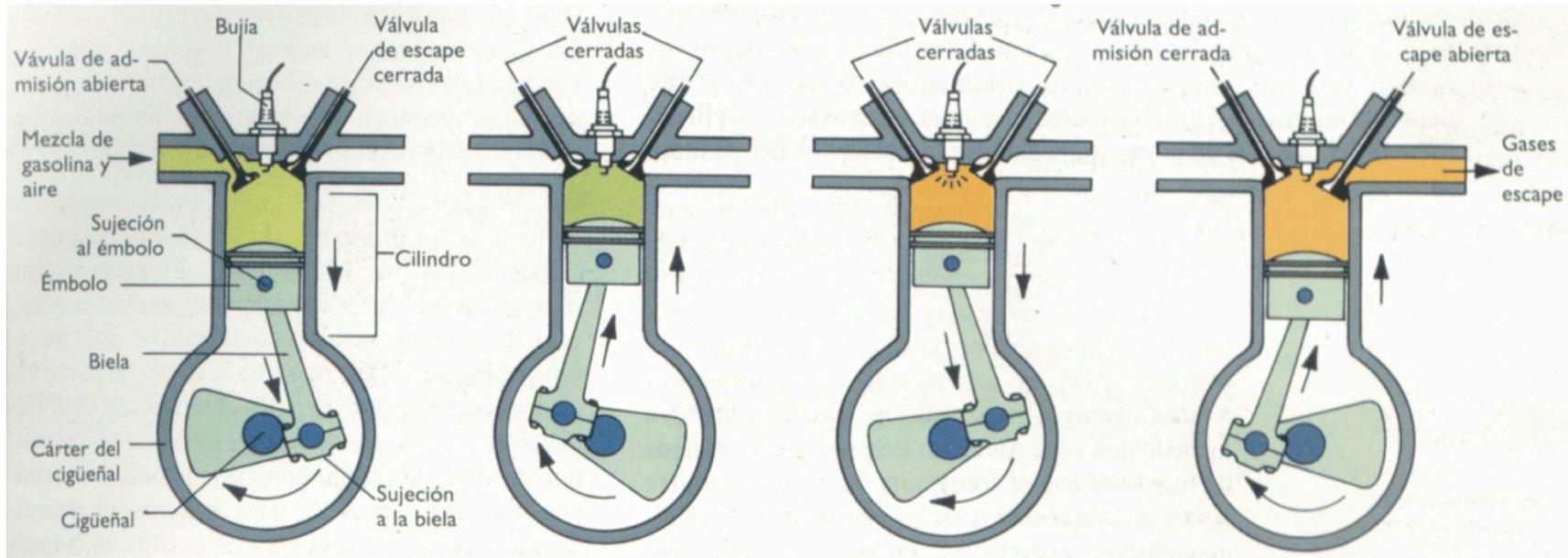


# Motor a Combustión Interna

- En un motor a combustión interna hay cinco procesos fundamentales:
  - Admisión de una mezcla de combustible+oxidante (e.g. aerosol de bencina+aire) al cilindro.
  - Compresión de la mezcla, lo que requiere hacer trabajo sobre el sistema.
  - Combustión de la mezcla y consecuente entrada de calor al sistema.
  - Expansión de los gases a alta presión y temperatura producidos en la combustión y trabajo ejercido por el sistema sobre un pistón o turbina.
  - Eliminación de los gases de escape y consecuente eliminación del calor residual.

# Motor de Cuatro Tiempos

## FASES DE UN MOTOR DE 4 TIEMPOS



### ADMISIÓN

Pistón baja y entra combustible por la válvula de admisión

El cigüeñal da  $\frac{1}{2}$  revolución

### COMPRESIÓN

Pistón sube y el combustible y el aire se comprimen.

Las válvulas están cerradas  
El cigüeñal da  $\frac{1}{2}$  revolución

### EXPLOSIÓN

La mezcla del combustible y de aire explota. Como las válvulas están cerradas el pistón baja. Potencia

El cigüeñal da  $\frac{1}{2}$  revolución

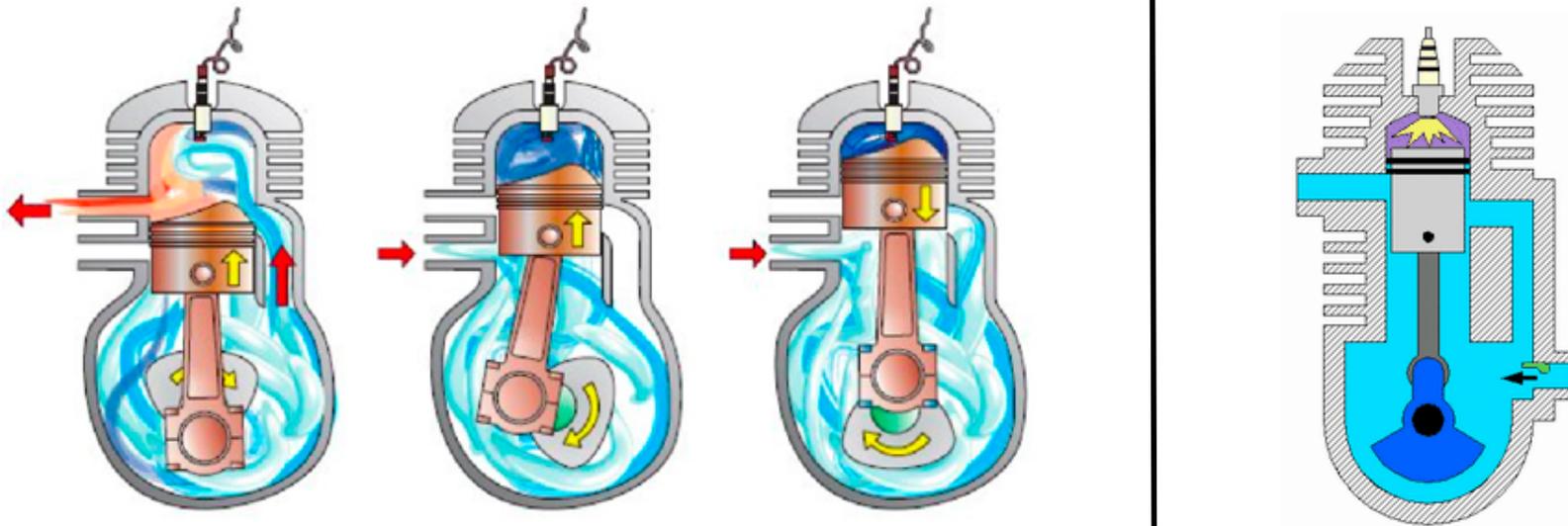
### ESCAPE

Pistón sube y expulsa los gases quemados por la válvula de escape

El cigüeñal da  $\frac{1}{2}$  revolución

EN UN MOTOR DE 4 T SE PRODUCE UNA EXPLOSIÓN (FASE POTENTE) CADA 2 REVOLUCIONES

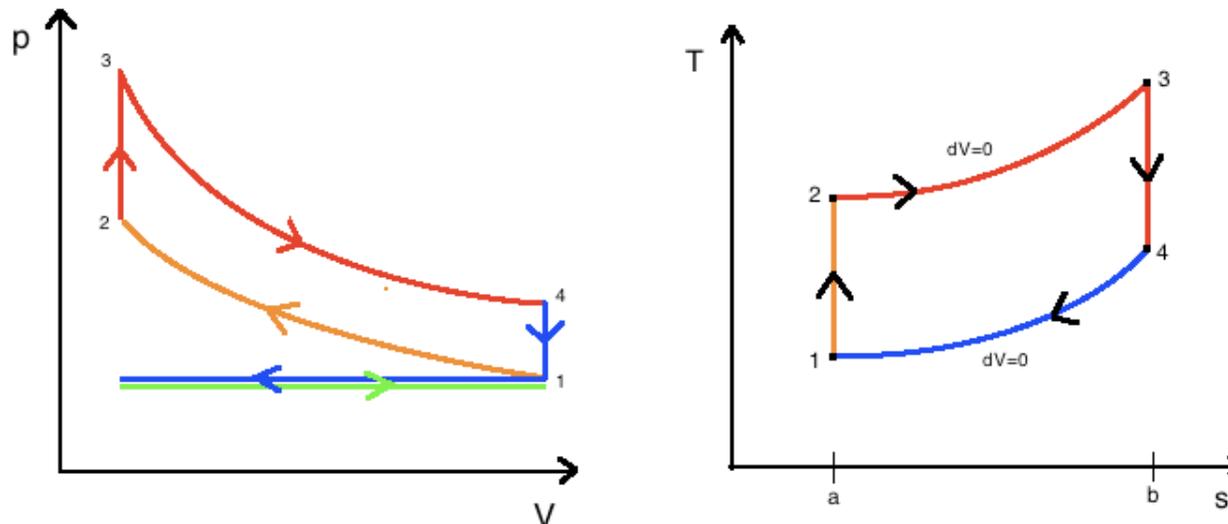
# Motor de Dos Tiempos



- En un motor de 2 tiempos la admisión sucede durante la compresión y la combustión, y el escape sucede durante la expansión. El motor da solo una revolución por cada explosión en vez de dos como es el caso del motor de 4 tiempos. Esto implica una mayor potencia por cilindrada y un mayor consumo de combustible.

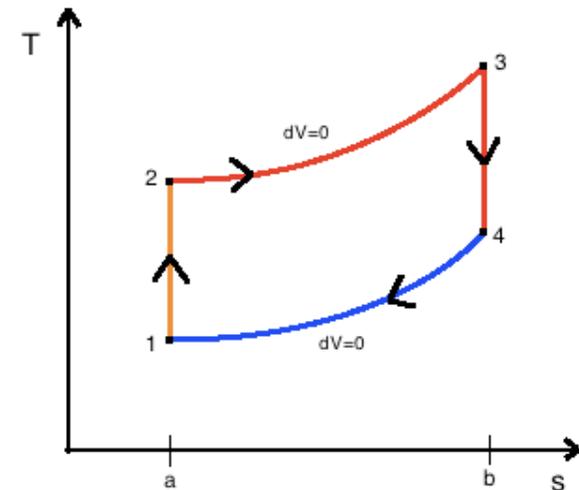
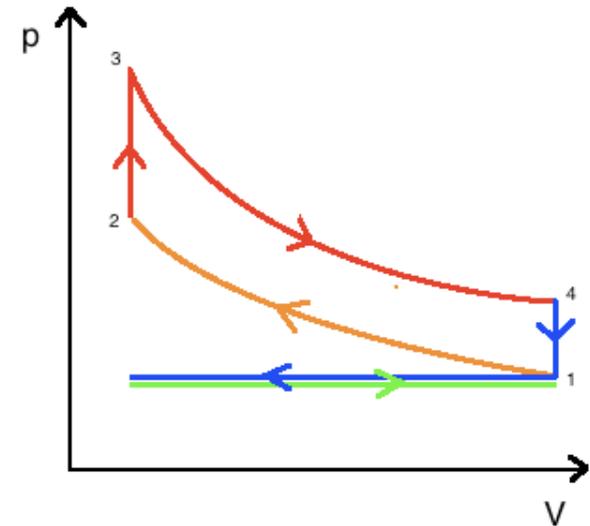
# El Ciclo de Otto

- El ciclo que sigue el sistema en un motor de combustión interna de 4 tiempos se suele aproximar por un ciclo ideal llamado el **ciclo de Otto** en honor a **Nikolaus Otto**, ingeniero alemán quien fue el primero en construir un motor a combustión interna de 4 tiempos en 1876.
- Es una idealización del ciclo real de un motor de 4 tiempos que permite hacer un análisis termodinámico. Asume que el sistema es un gas ideal con  $C_v$  constante, que los procesos son reversibles, y que la combustión sucede de forma instantánea y solo inyecta calor al sistema.



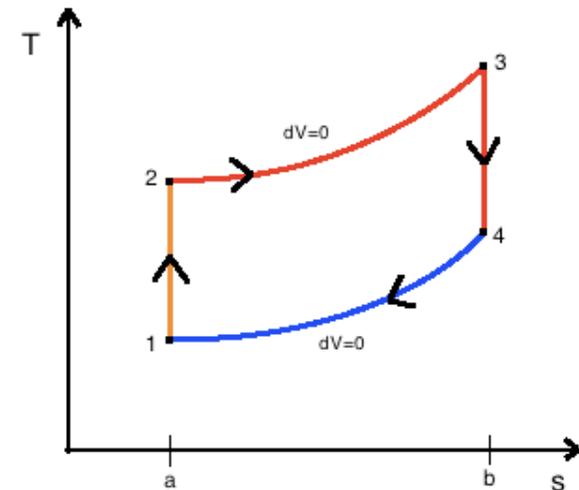
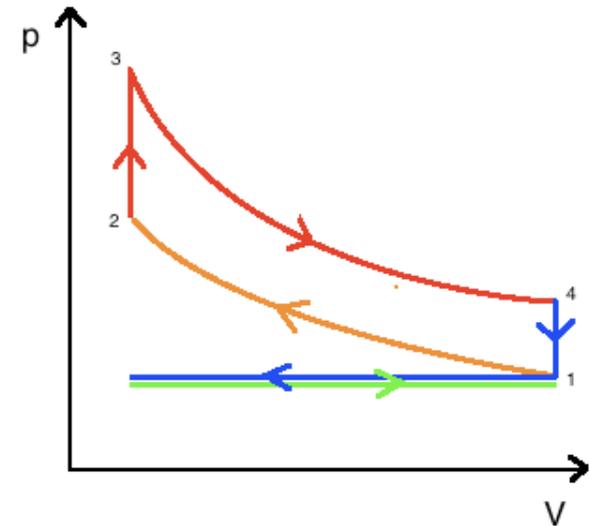
# El Ciclo de Otto

- **Paso I (0-1):** admisión del gas a presión constante. El volumen aumenta desde el volumen mínimo que deja el pistón levantado, al volumen máximo del cilindro.
- **Paso II (1-2):** compresión adiabática (isentrópica) del gas al subir el pistón. Requiere una inyección de trabajo hacia el sistema.
- **Paso III (2-3):** combustión, modelada como una transferencia de calor isocórica ( $dV=0$ ) hacia el sistema.
- **Paso IV (3-4):** expansión adiabática (isentrópica) debido al trabajo que ejerce la expansión del gas a alta presión sobre el pistón.
- **Paso V (4-1):** enfriamiento isocórico que modela la eliminación del calor residual
- **Paso VI (1-0):** escape del gas al subir el pistón y disminuir el volumen.



# El Ciclo de Otto

- Para calcular el trabajo producido y la eficiencia del ciclo podemos ignorar los pasos I y VI ya que empiezan y terminan en el mismo estado.
- El trabajo se hace hacia el sistema entre 1 y 2 ( $\Delta W_{12} > 0$ ) y desde el sistema entre 3 y 4 ( $\Delta W_{34} < 0$ ). Tanto en 2-3 y 4-1  $dV = 0$  por lo tanto  $\Delta W_{23} = \Delta W_{41} = 0$ .
- Similarmente para el calor, 1-2 y 3-4 son adiabáticos por lo que  $\Delta Q_{12} = \Delta Q_{34} = 0$  y el calor entra al sistema durante la combustión ( $\Delta Q_{23} > 0$ ). El calor residual que no es transformado en trabajo sale del sistema durante 4-1 ( $\Delta Q_{41} < 0$ ).



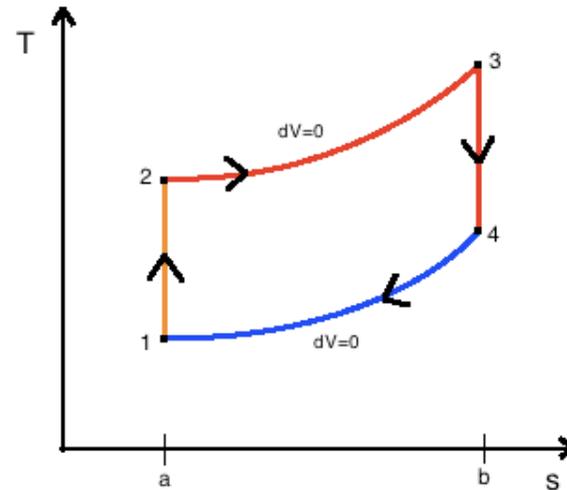
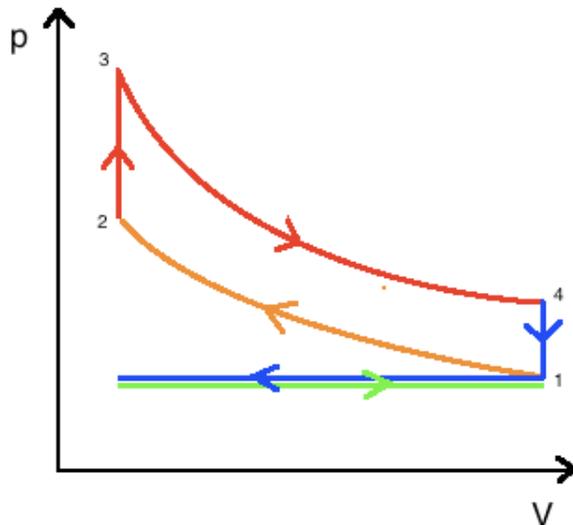
# El Ciclo de Otto

- La 1ra ley entonces implica que:

$$\Delta U = 0 = \Delta Q_{23} + \Delta Q_{41} + \Delta W_{12} + \Delta W_{34}$$

- Y el trabajo neto que hace el motor en un ciclo es:

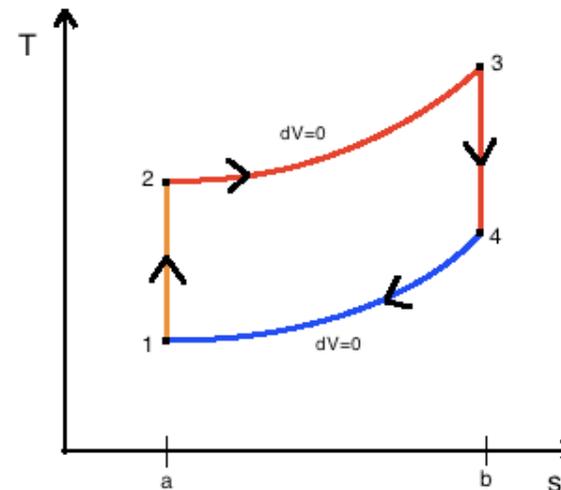
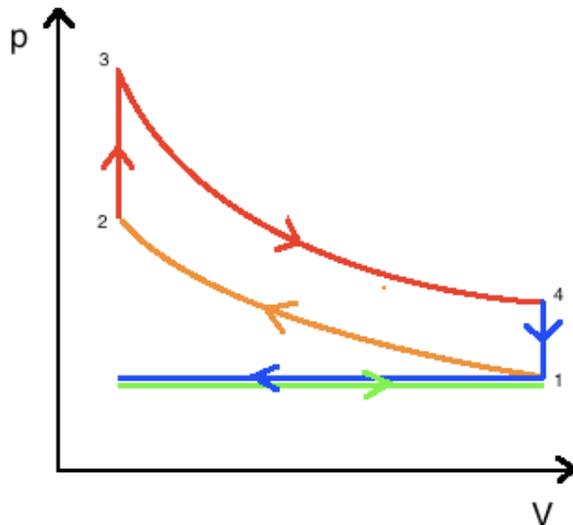
$$\Delta W = \Delta W_{12} + \Delta W_{34} = -(\Delta Q_{23} + \Delta Q_{41})$$



# El Ciclo de Otto

- La eficiencia del ciclo de Otto es entonces:

$$\eta = \frac{|\Delta W|}{\Delta Q_{23}} = \frac{\Delta Q_{23} + \Delta Q_{41}}{\Delta Q_{23}} = 1 + \frac{\Delta Q_{41}}{\Delta Q_{23}}$$



# El Ciclo de Otto

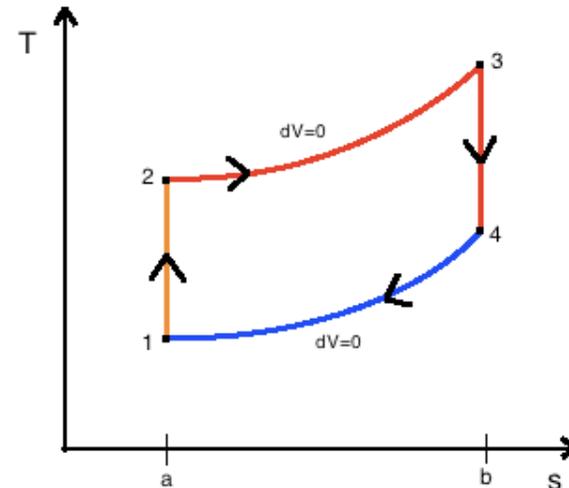
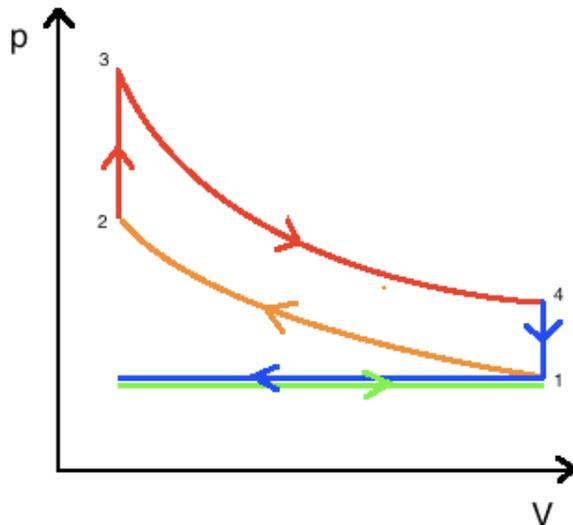
- Como asumimos que el sistema es un gas ideal con  $C_V$  constante, entonces tenemos que:

$$\Delta Q_{23} = C_V \Delta T_{23} = C_V (T_3 - T_2)$$

$$\Delta Q_{41} = C_V \Delta T_{41} = C_V (T_1 - T_4)$$

- Y la eficiencia es:

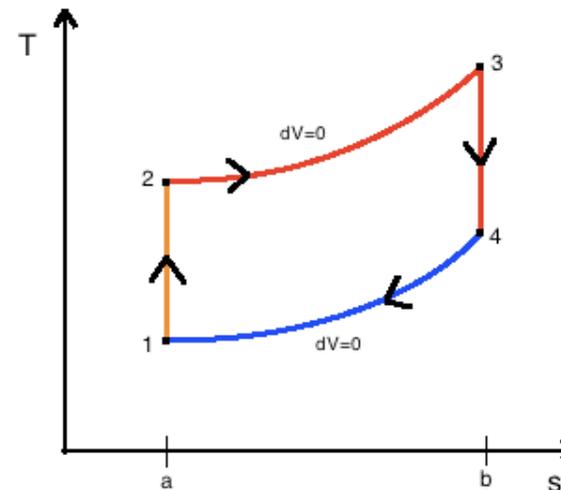
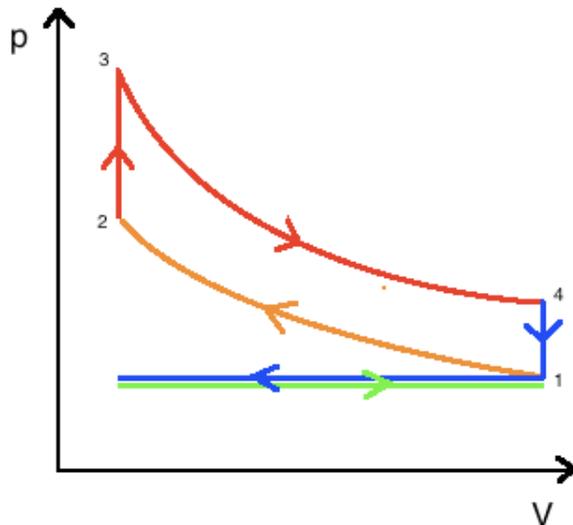
$$\eta = 1 + \frac{\Delta Q_{41}}{\Delta Q_{23}} = 1 + \frac{T_1 - T_4}{T_3 - T_2}$$



# El Ciclo de Otto

- Al diseñar un motor no tenemos mucho control sobre las temperaturas en el ciclo. En vez si tenemos control sobre los volúmenes mínimos y máximos en el cilindro. La razón entre estos dos volúmenes se llama factor de compresión:

$$r = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3}$$



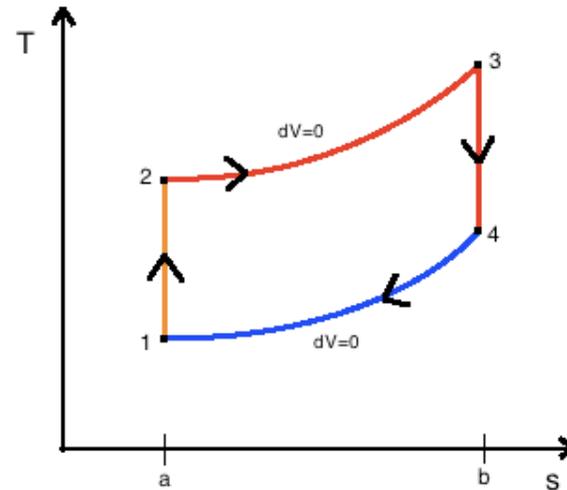
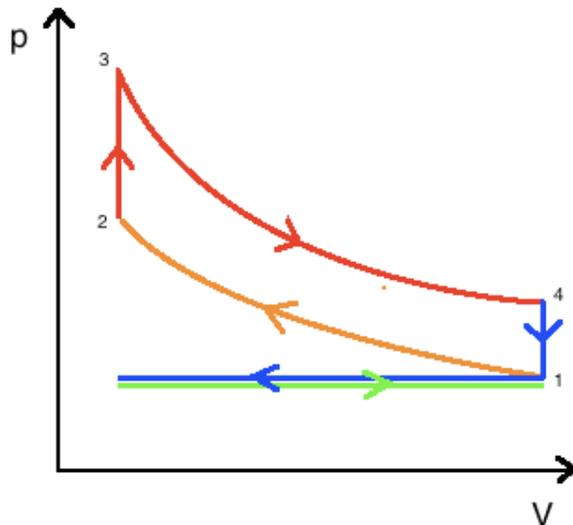
# El Ciclo de Otto

- Como 1-2 y 3-4 son procesos reversibles adiabáticos en un gas ideal, y la ecuación de estado adiabática de un gas ideal es:

$$\left(\frac{T}{T_0}\right)^{3/2} = \frac{V_0}{V}$$

- Tenemos:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{2/3} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{2/3} = \frac{T_3}{T_4}$$



# El Ciclo de Otto

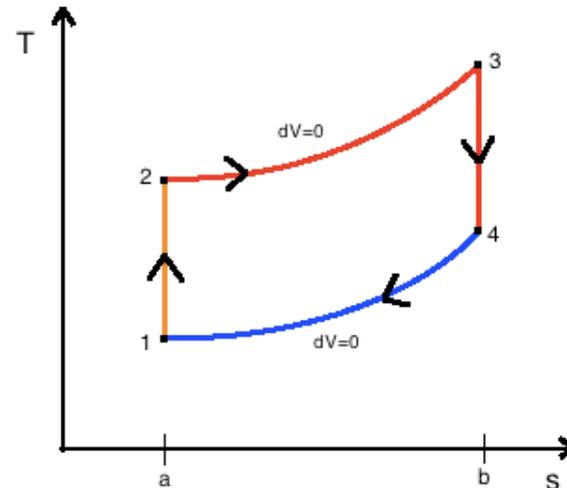
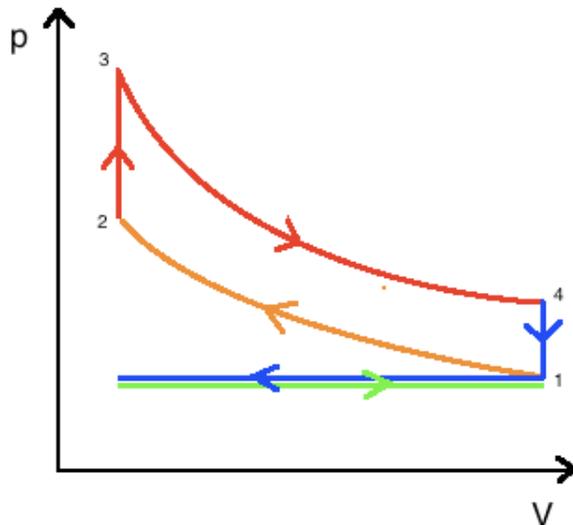
- Por lo tanto:

$$T_1 - T_4 = \frac{T_2}{r^{2/3}} - \frac{T_3}{r^{2/3}}$$

- Y la eficiencia es:

$$\eta = 1 + \frac{T_1 - T_4}{T_3 - T_2} = 1 + \frac{1}{r^{2/3}} \left( \frac{T_2 - T_3}{T_3 - T_2} \right) = 1 - \frac{1}{r^{2/3}}$$

- La eficiencia del ciclo de Otto se optimiza si **maximizamos el factor de compresión** en el cilindro.



# El Ciclo de Otto

- El ciclo Otto es solo una aproximación simple al ciclo real que sigue la mezcla de combustible y oxidante en el cilindro de un motor de 4 tiempos.

