Le Macchine Termiche

Termodinamica dell'Ingegneria Chimica

Bilancio di energia per sistemi chiusi: Conservazione dell'energia in regime transitorio

Normalmente, i termini relativi alle variazioni di energia cinetica e potenziale possono essere trascurati.

Il Δ si riferisce agli stati iniziali e finali della trasformazione:
"Δ" = "finale"-"iniziale"

$$dU = \delta Q + \delta W$$

intregrando sul tempo

$$\Delta U = Q + W$$

Q è la quantità di calore scambiato (per unità di moli del sistema) durante la trasformazione, W è la quantità di lavoro scambiato (per unità di moli del sistema) durante la trasformazione

$$dS = \frac{\delta Q}{T} + \frac{\delta W_{perso}}{T} \geq \frac{\delta Q}{T}$$

$$\delta W = dU - \delta Q = dU - TdS + \delta W_{perso}$$

se la trasformazione è reversibile

$$\delta W_{rev} = -PdV = dU - TdS$$

Bilancio di energia per sistemi chiusi: Espansione di un gas

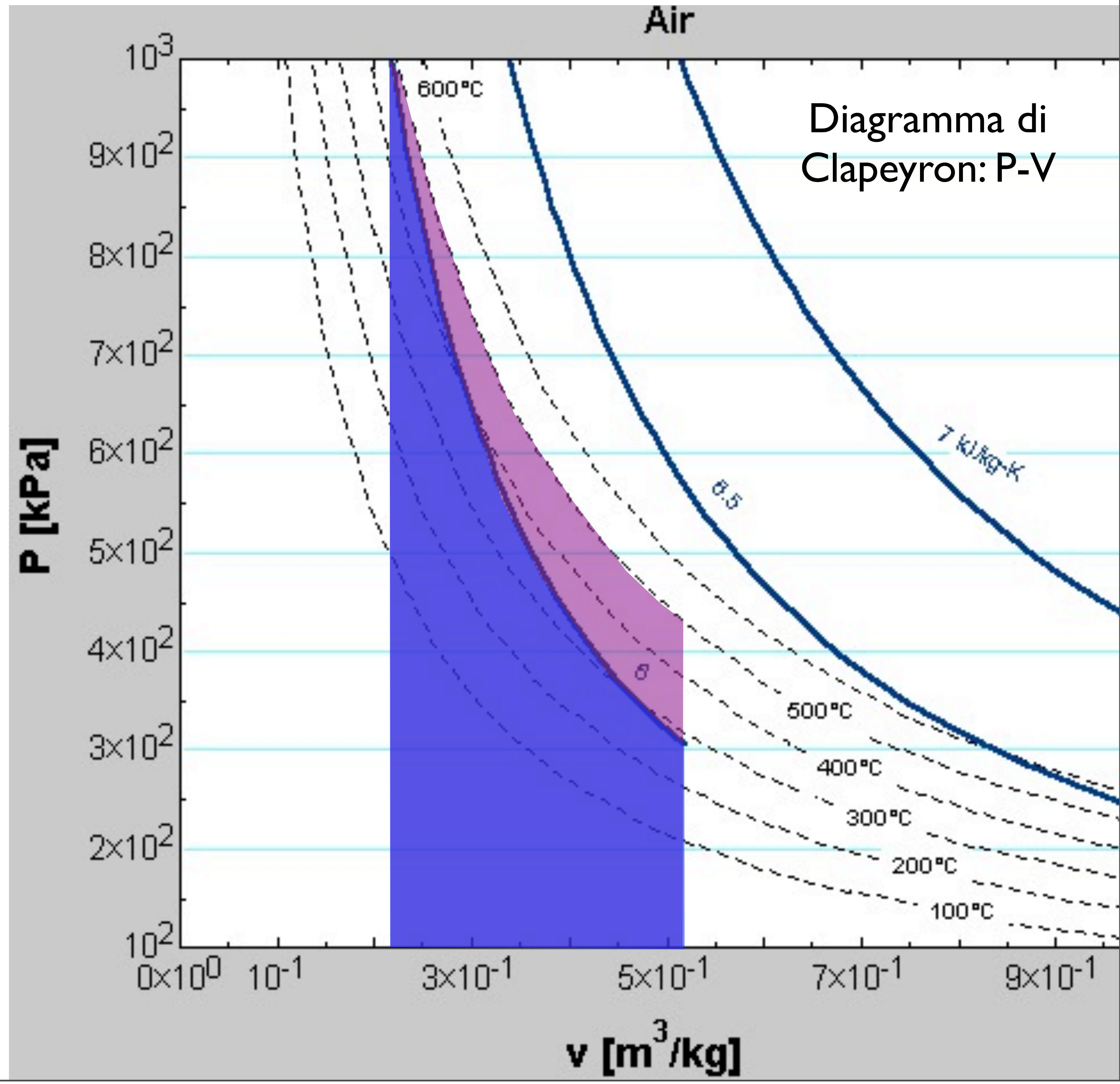
$$W = -\int_{inizio}^{fine} PdV$$

il lavoro è negativo

a parità di ΔV

$$\left|W_{rev}^{isotermo}\right| > \left|W_{rev}^{isoentropico}\right|$$

Adiabatica reversibile
= isoentropica



Bilancio di energia per sistemi chiusi: Compressione di un gas

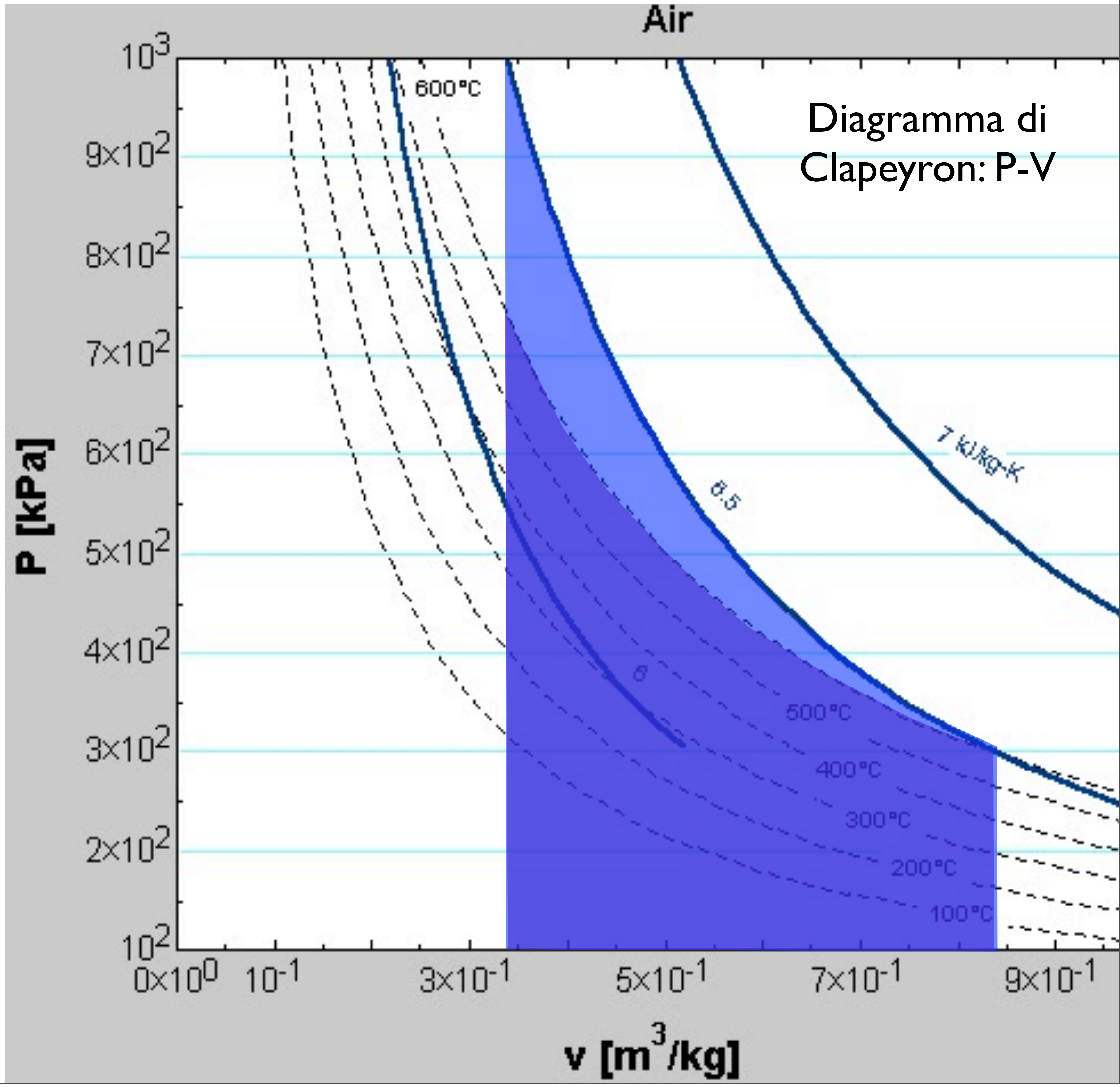
$$W = -\int_{inizio}^{fine} PdV$$

il lavoro è positivo

a parità di ΔV

$$\left|W_{rev}^{isotermo}\right| < \left|W_{rev}^{isoentropico}\right|$$

Adiabatica reversibile
= isoentropica



Bilancio di energia per sistemi aperti: Conservazione dell'energia in regime stazionario

Considerando una sola corrente in ingresso e in uscita

Il Δ si riferisce alle condizioni di ingresso e di uscita del sistema: "Δ" = "out"-"in"

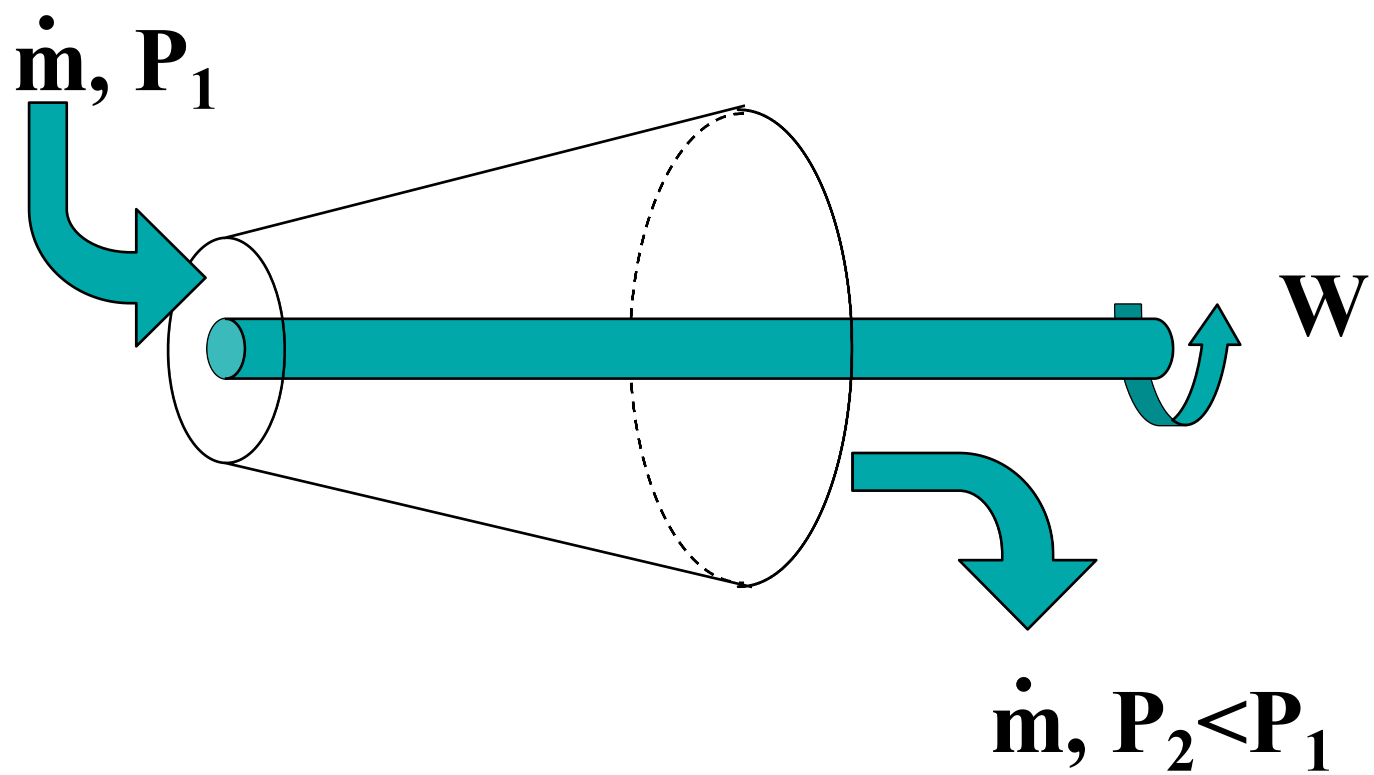
$$\Delta\left[\left(H + \frac{1}{2}u^2 + zg\right)\dot{m}\right] = \dot{Q} + \dot{W}$$

$\dot{Q}$ è la portata di calore scambiato dal sistema, $\dot{W}$ è la portata di lavoro scambiato dal sistema (sono potenze)

Normalmente, i termini relativi alle variazioni di energia cinetica e potenziale possono essere trascurati:

$$\Delta(\dot{m}H) = \dot{Q} + \dot{W}$$

Bilancio di energia per sistemi aperti: Es. Turbina



Il processo è, con buona approssimazione, adiabatico

$$\Delta\left(H\dot{m}\right) = \cancel{\dot{Q}} + \dot{W}$$

Il lavoro viene compiuto dalla turbina, e quindi è negativo

Bilancio di energia per sistemi aperti:

$\dot{m}\Delta H = \dot{W}$
$\Delta H = W$

W=lavoro per unità di portata di massa

a parità di ΔP

$W_{max} = W_{isoentropico}$

$dH = TdS + VdP$

Adiabatica reversibile = isoentropica

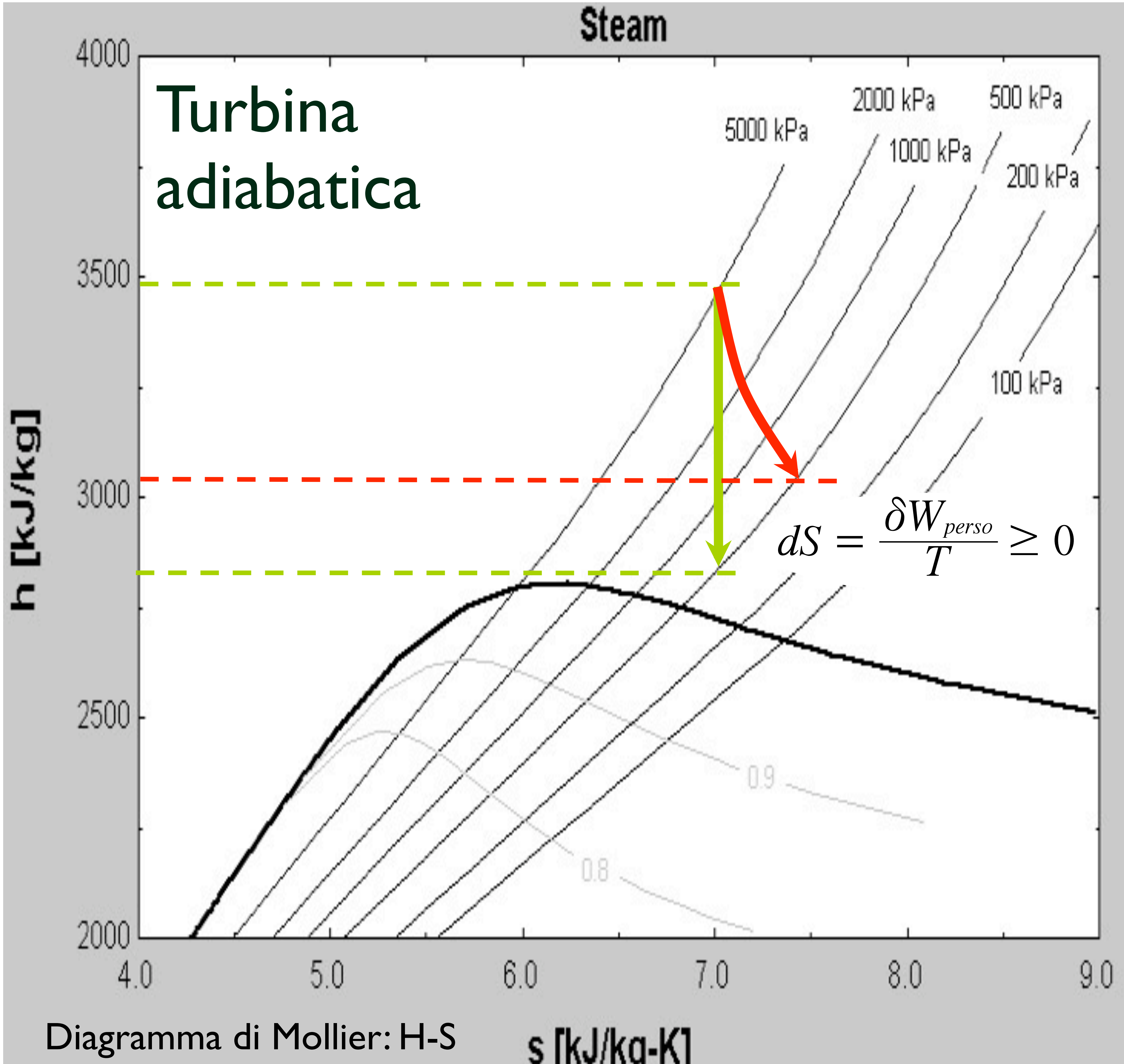


Diagramma di Mollier: H-S

Bilancio di energia per sistemi aperti:
Es. espansione di un gas

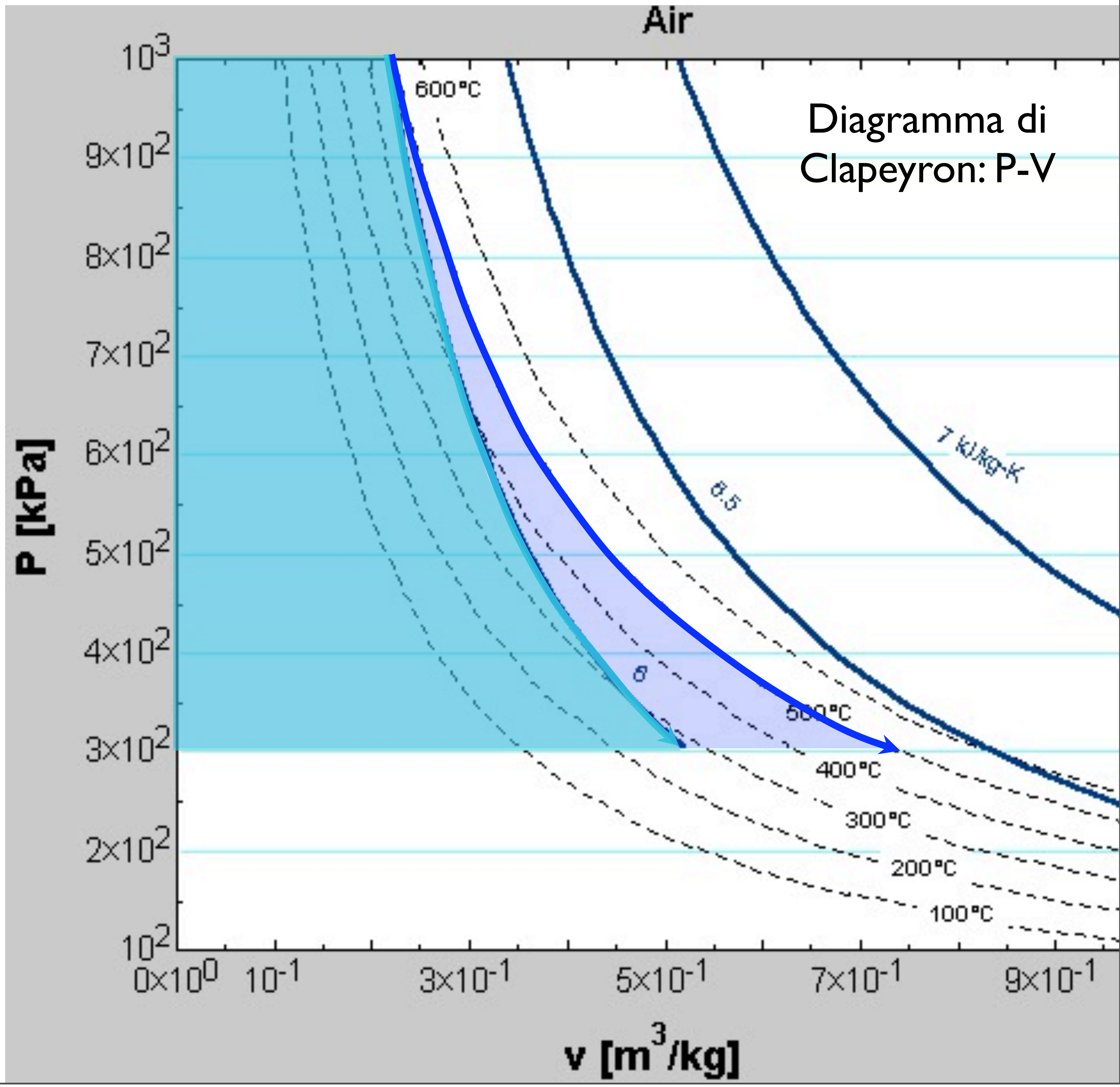
$$dH = TdS + VdP$$

$$W_{ideale} = \int_1^2 VdP < 0$$

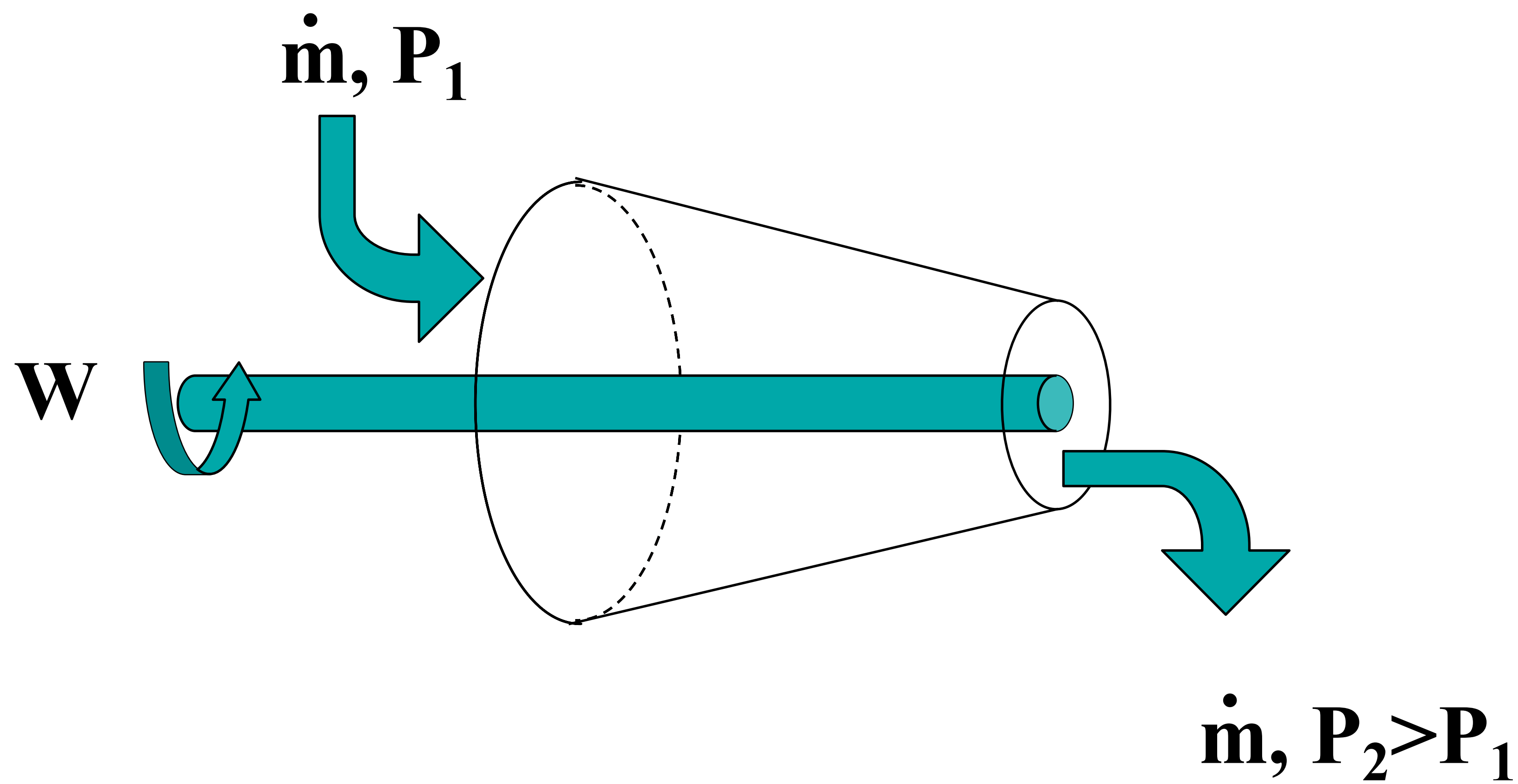
a parità di ΔP

$$\left|W_{ideale}^{isotermo}\right| > \left|W_{ideale}^{isoentropico}\right|$$

Adiabatica reversibile
= isoentropica



Bilancio di energia per sistemi aperti: Es. Compressore



Il processo è, con buona approssimazione, adiabatico

$$\Delta\left(H\dot{m}\right) = \cancel{\dot{Q}} + \dot{W}$$

Il lavoro viene fornito al compressore, e quindi è positivo

Bilancio di energia per sistemi aperti:

$$\dot{m}\Delta H = \dot{W}$$
$$\Delta H = W$$

W=lavoro per unità di portata di massa

$$W_{min} = W_{isoentropico}$$

Adiabatica reversibile = isoentropica

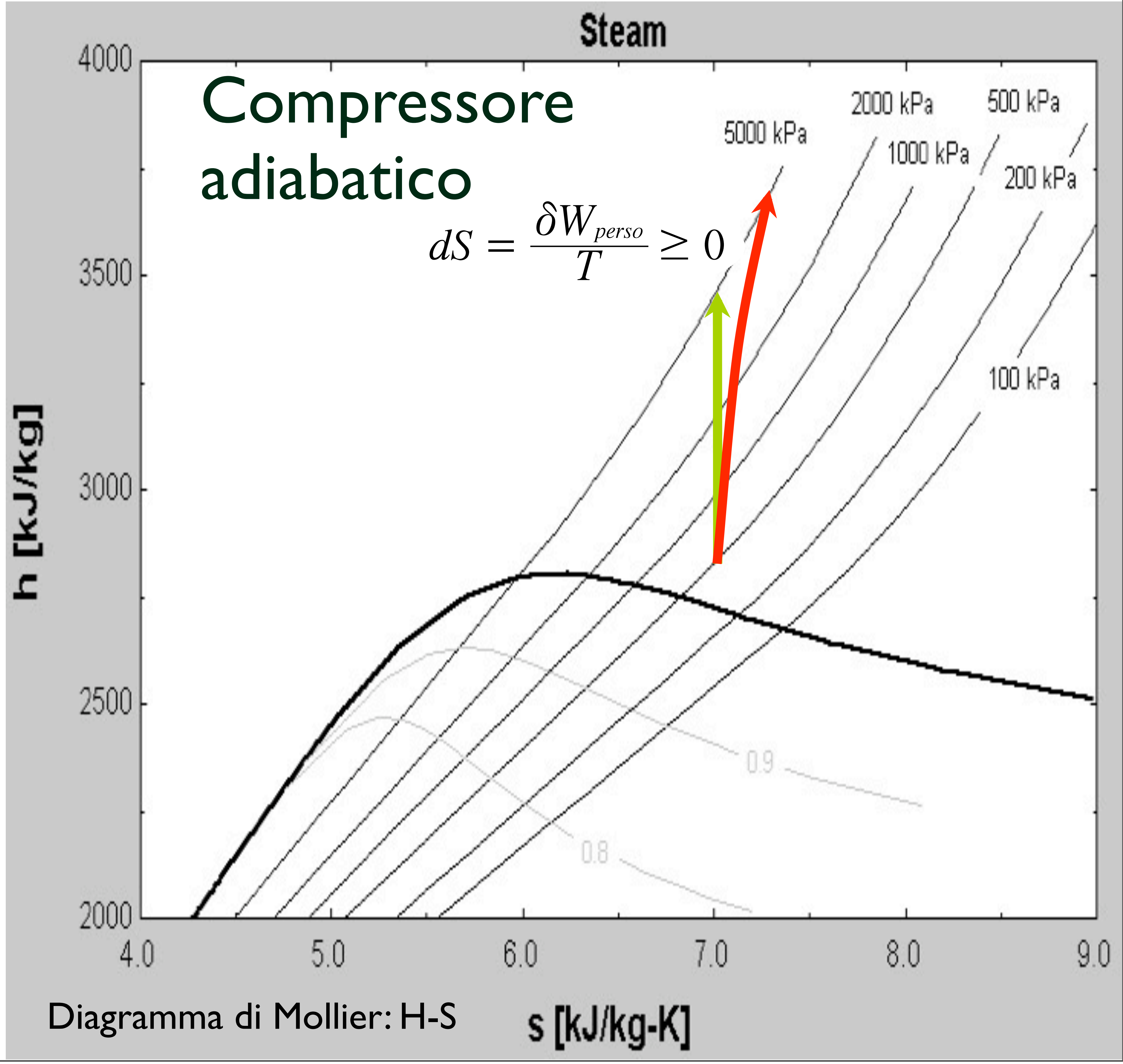


Diagramma di Mollier: H-S

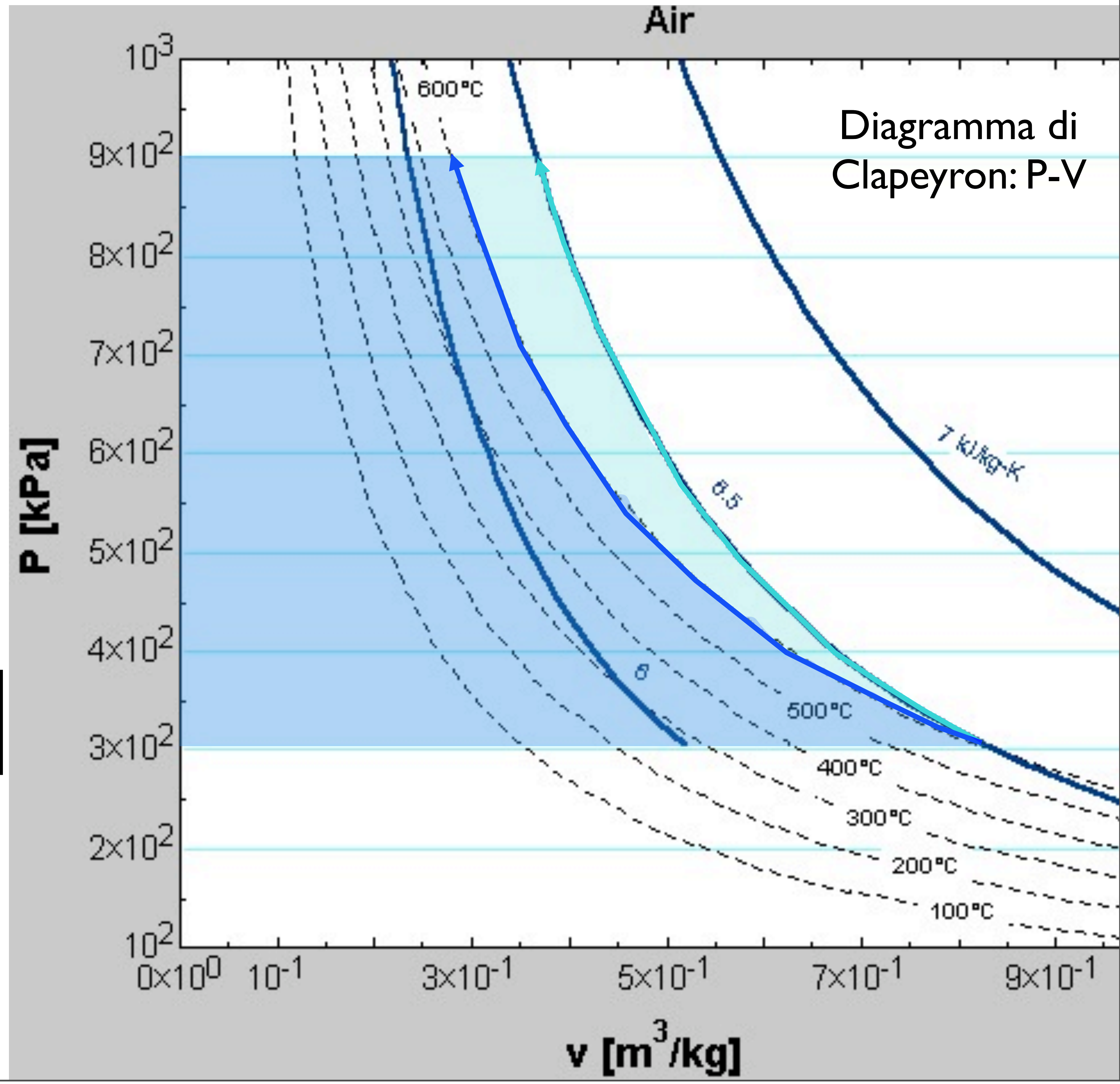
Bilancio di energia per sistemi aperti: Es. Compressione di un gas

$$W_{ideale} = \int_1^2 VdP > 0$$

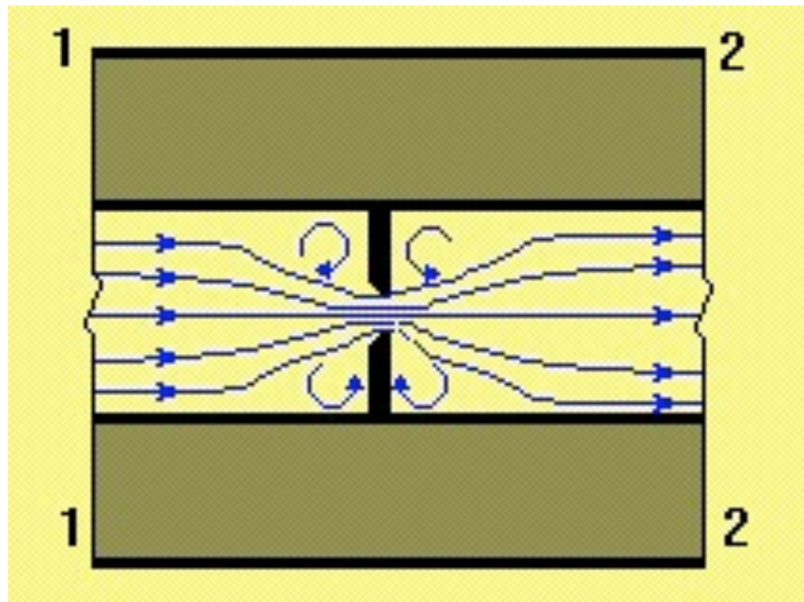
a parità di ΔP

$$\left|W_{ideale}^{isotermo}\right| < \left|W_{ideale}^{isoentropico}\right|$$

Adiabatica reversibile = isoentropica



Bilancio di energia per sistemi aperti: Es. Laminazione



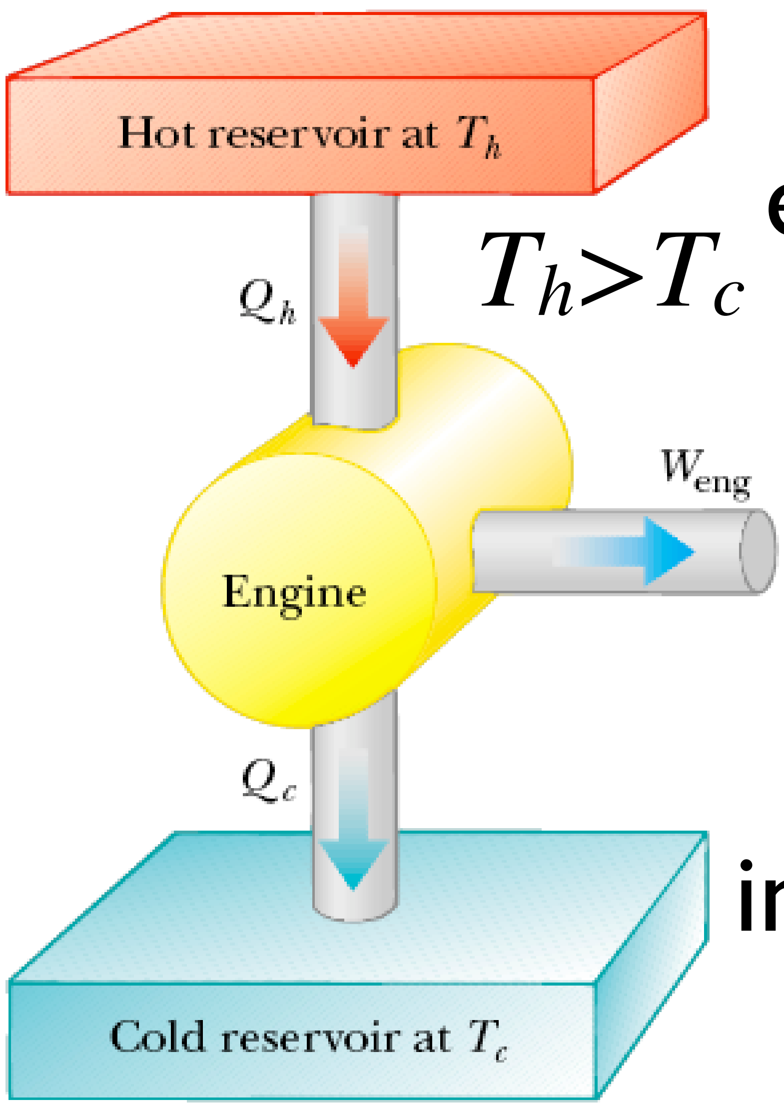
$$\Delta\left[\left(H + \cancel{\frac{1}{2}u^2} + \cancel{zg}\right)\dot{m}\right] = \cancel{\dot{Q}} + \cancel{\dot{W}}$$

$H_2 = H_1$ Espansione isoentalpica o di Joule-Thomson

Le macchine cicliche

Le macchine termiche realizzano la trasformazione di calore in lavoro

Questa trasformazione avviene ciclicamente, ossia senza che la macchina cambi il suo stato.



$T_h > T_c$

Questo implica che non c'è variazione di energia interna durante la trasformazione di calore in lavoro:

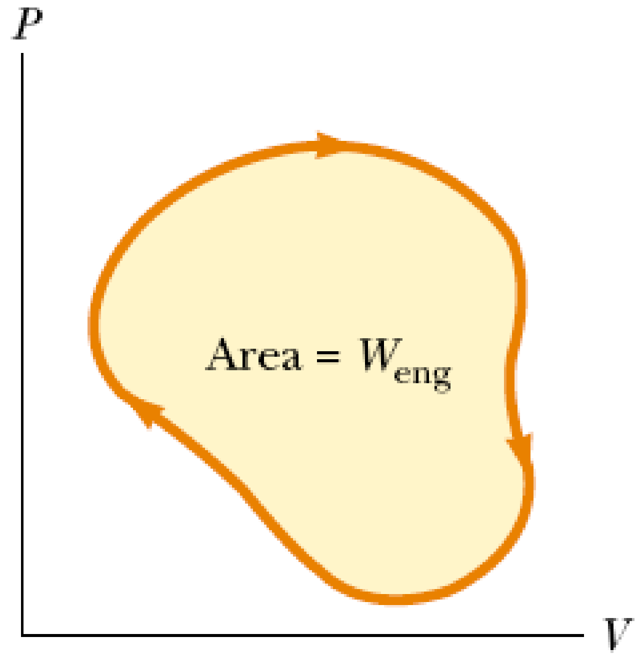
$\Delta U = 0$

Quindi, dal I Principio

$|W| = |Q_h| - |Q_c|$

in cui si è usato il valore assoluto perchè si vuole ragionare sulle quantità

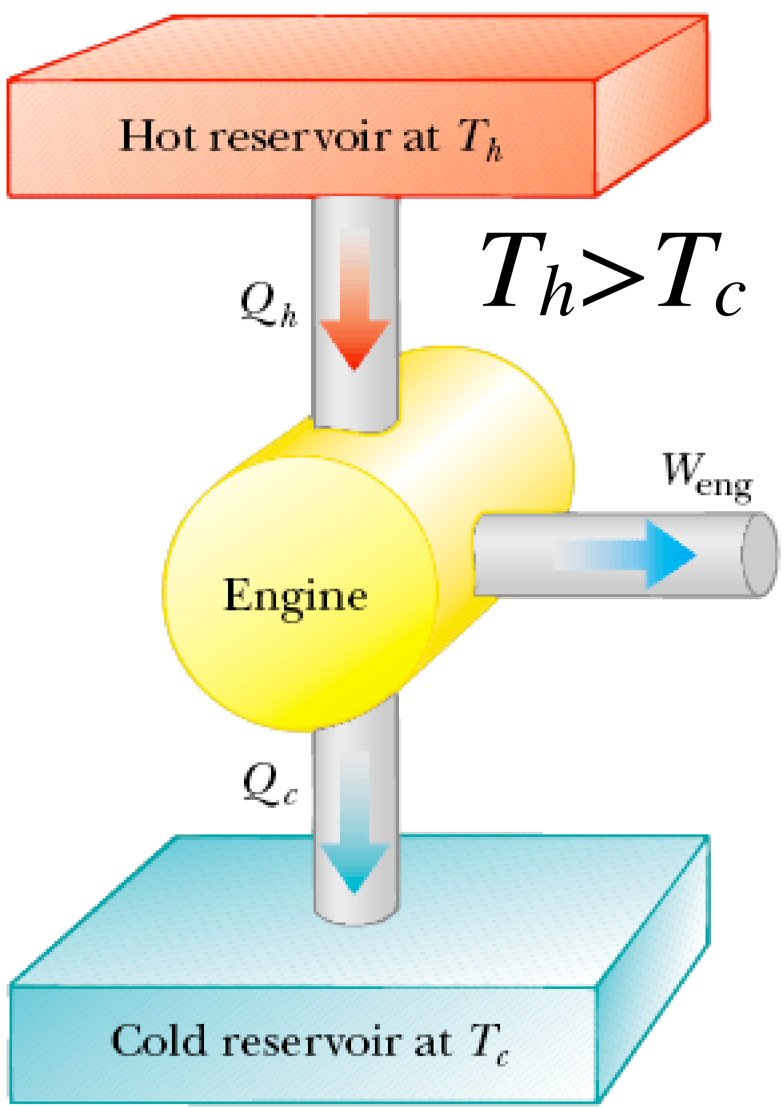
Il Rendimento



$$|W|=|Q_h|-|Q_c|$$

Si definisce **rendimento** (o efficienza termica) il rapporto

$$\eta = \frac{|W_{eng}|}{|Q_h|} = \frac{|Q_h| - |Q_c|}{|Q_h|} = 1 - \frac{|Q_c|}{|Q_h|}$$



$T_h > T_c$

In pratica, tutte le macchine termiche trasformano solo una parte del calore assorbito in lavoro e quindi il loro rendimento è sempre minore di 1.
Ad esempio, un buon motore di automobile ha un rendimento del 20% circa, e i motori diesel hanno un rendimento fra il 35% e il 40%.

La macchina di Carnot

La macchina di Carnot è una macchina ciclica reversibile (quindi ideale) che lavora fra due sorgenti termiche, una calda a T_h e una fredda a T_c.

La macchina di Carnot lavora in quattro fasi:

1. una trasformazione isoterma reversibile, durante la quale il sistema assorbe una quantità di calore Q_h da una sorgente a T_h
2. una trasformazione adiabatica reversibile, che porta il sistema dalla temperatura T_h alla temperatura T_c
3. una trasformazione isoterma reversibile, durante la quale il sistema assorbe una quantità di calore Q_c
4. una trasformazione adiabatica reversibile, opposta a quella della fase 2, che riporta il sistema alla temperatura T_h

Una possibile macchina di Carnot: P-V

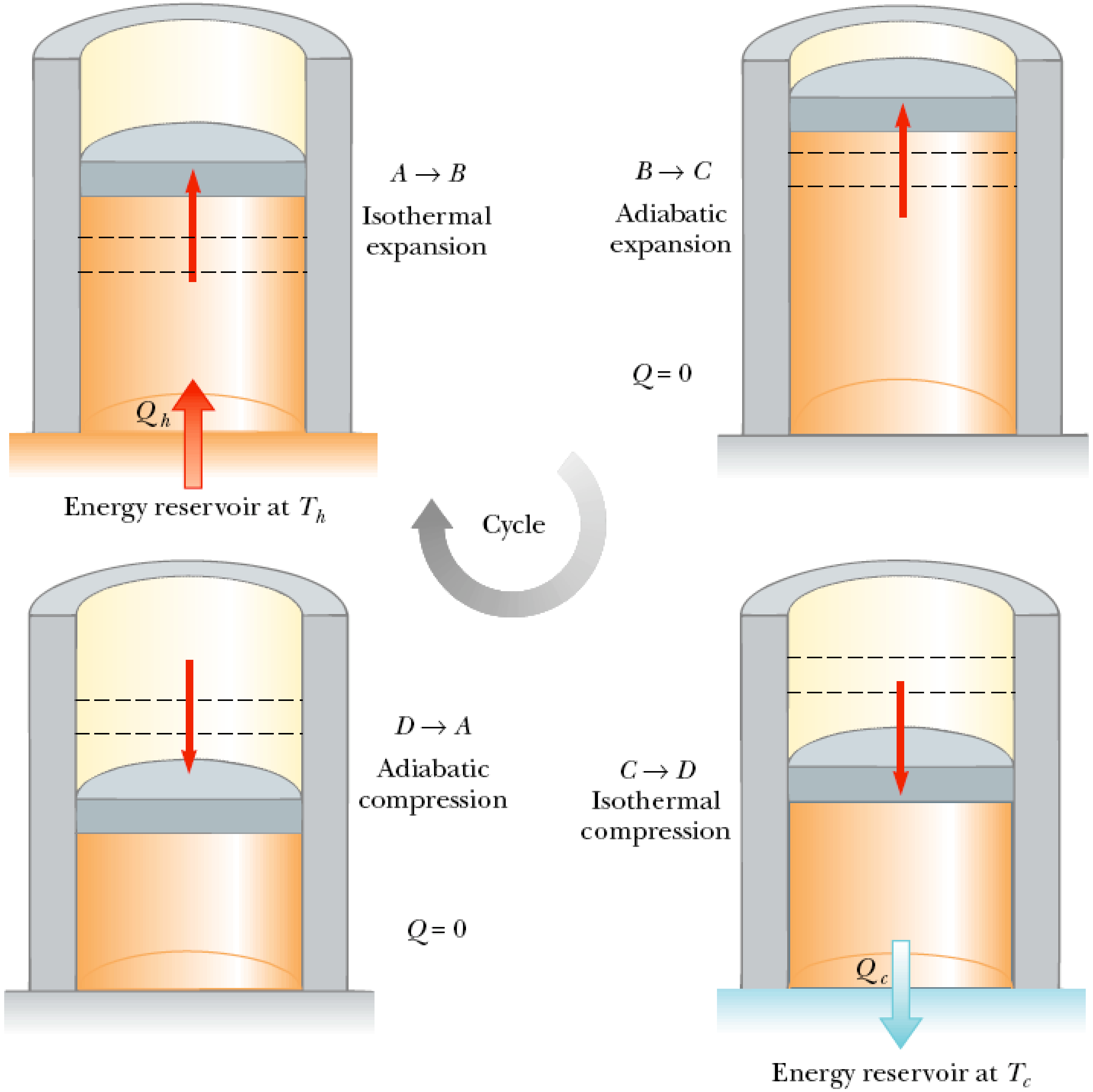
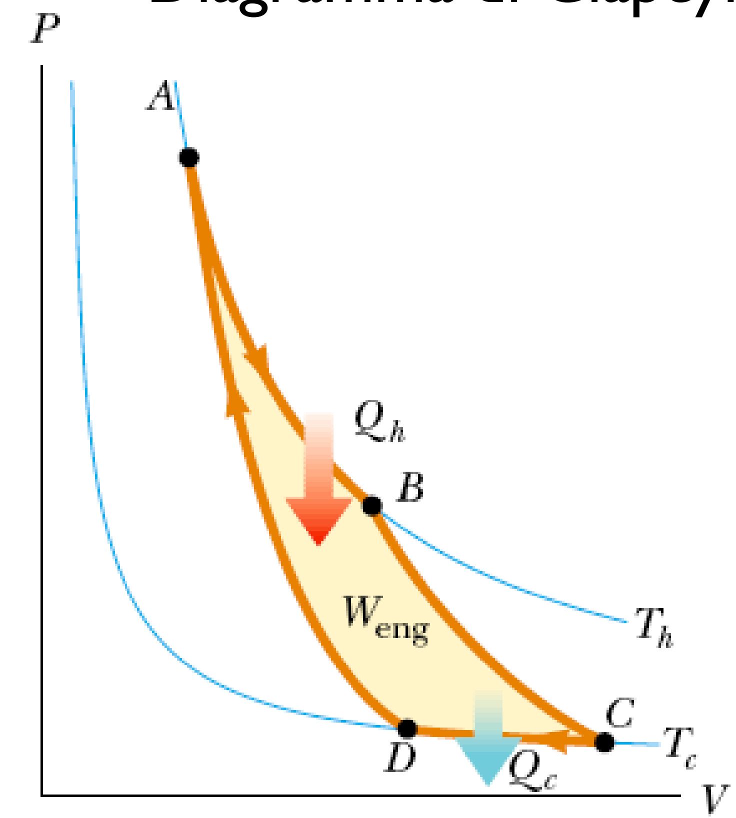


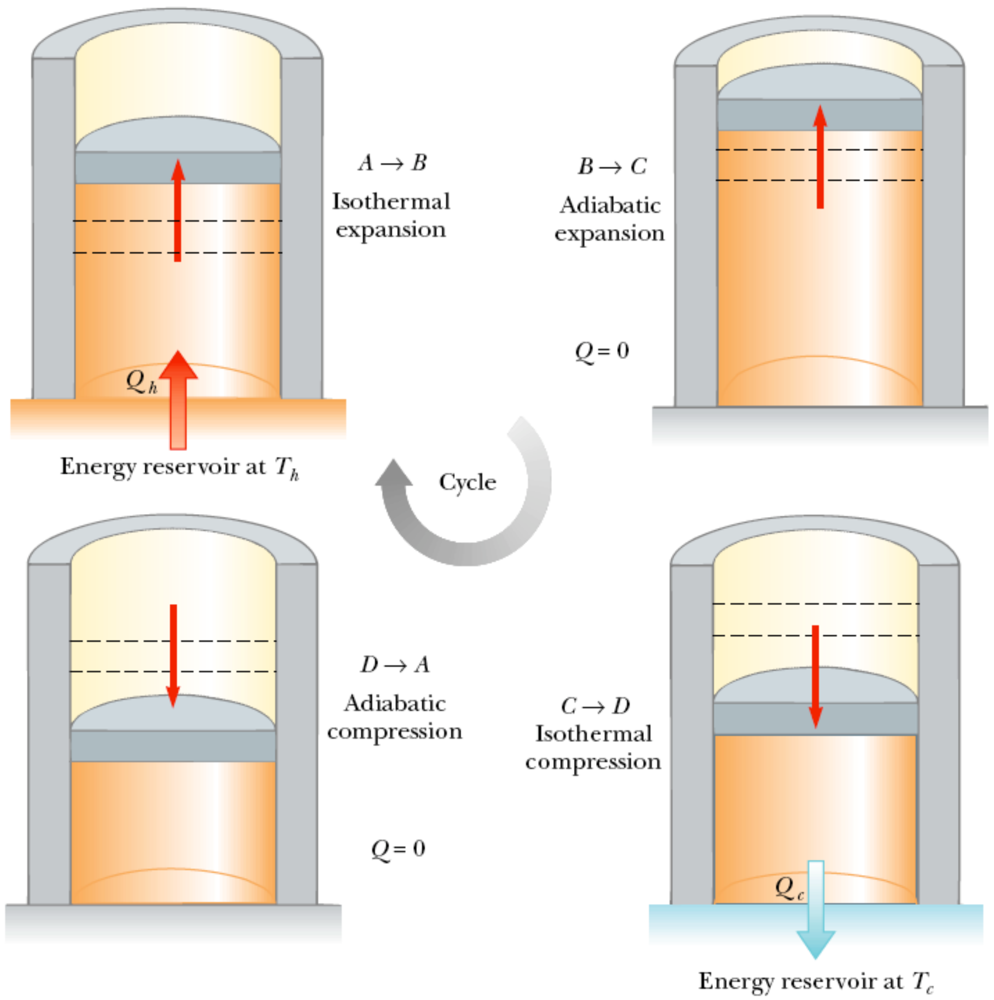
Diagramma di Clapeyron: P-V



Percorso	Lavoro	Calore
A→B	$-\int_{V_A}^{V_B} PdV$	Q_h
B→C	$-\int_{V_B}^{V_C} PdV$	-
C→D	$-\int_{V_C}^{V_D} PdV$	Q_c
D→A	$-\int_{V_D}^{V_A} PdV$	-

L'espansione e la compressione isoterme possono essere realizzate con passaggi di stato

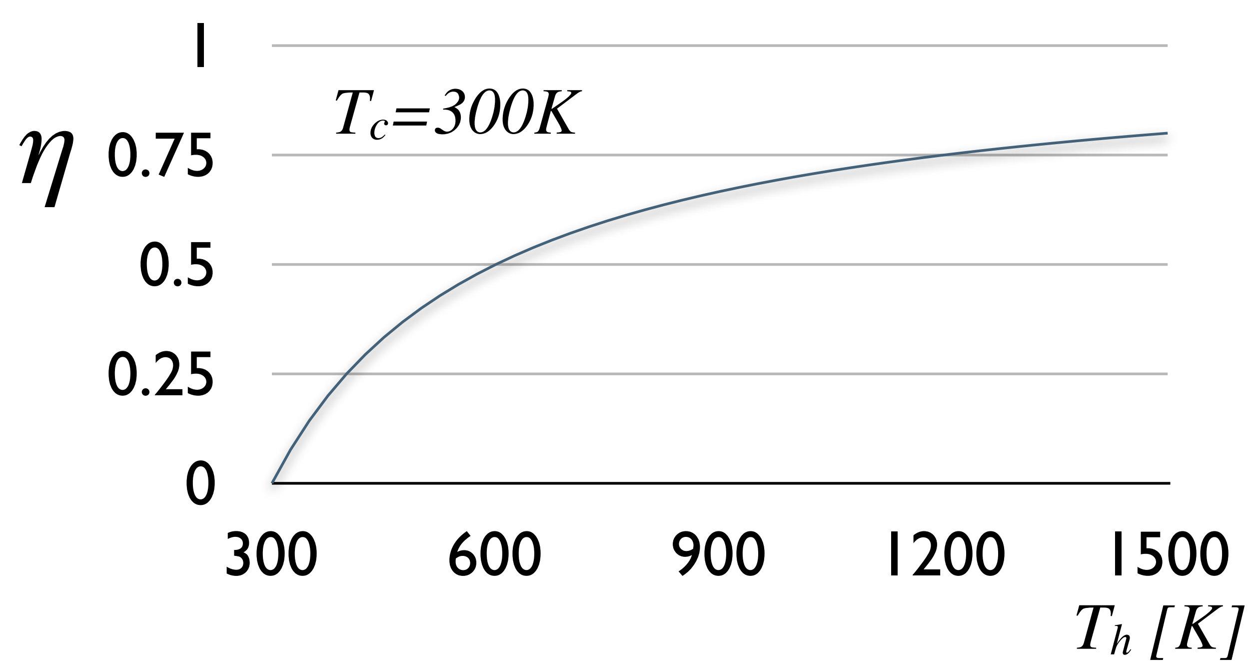
La macchina di Carnot



I Principio $\quad 0 = W_{eng} + Q_h + Q_c$

II Principio $\quad 0 = \dfrac{Q_h}{T_h} + \dfrac{Q_c}{T_c}$

$$\eta = 1 - \frac{T_c}{T_h}$$



Il rendimento è sempre compreso fra 0 e 1

Oss.: se $T_h \approx 600K$ e $T_c \approx 300K$, $\eta \approx 0.5$

Una possibile macchina di Carnot: T-S

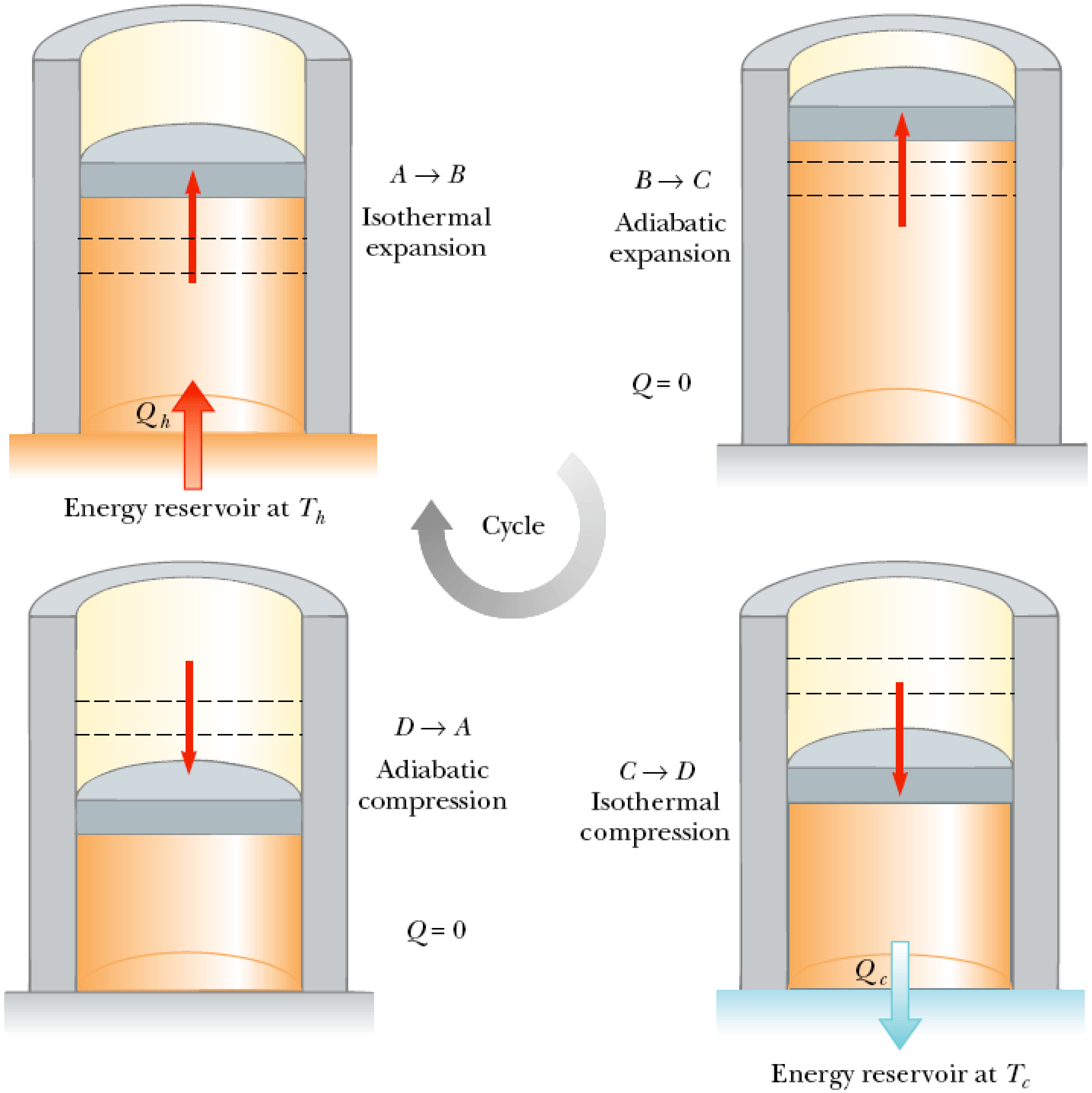
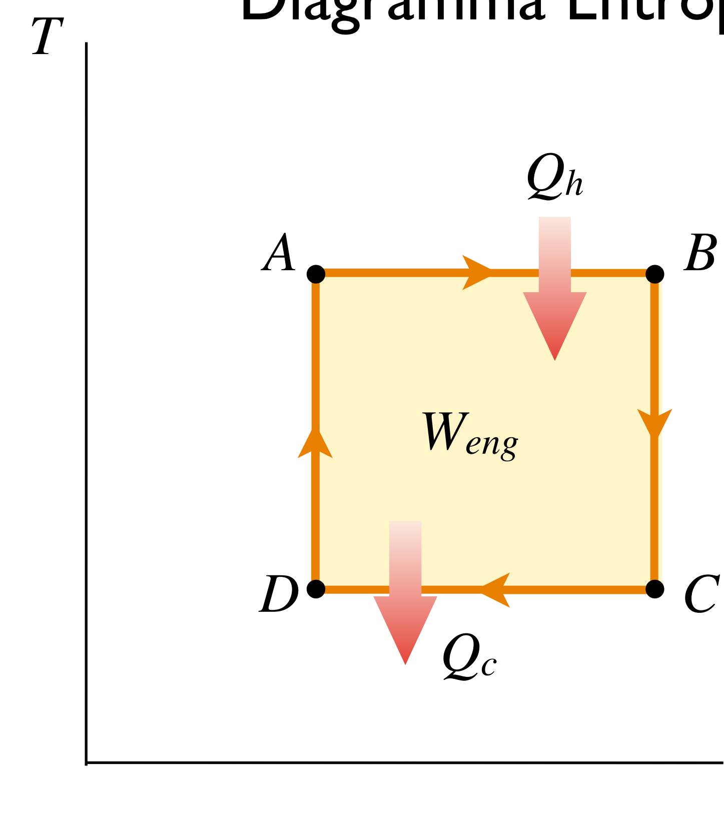


Diagramma Entropico: T-S

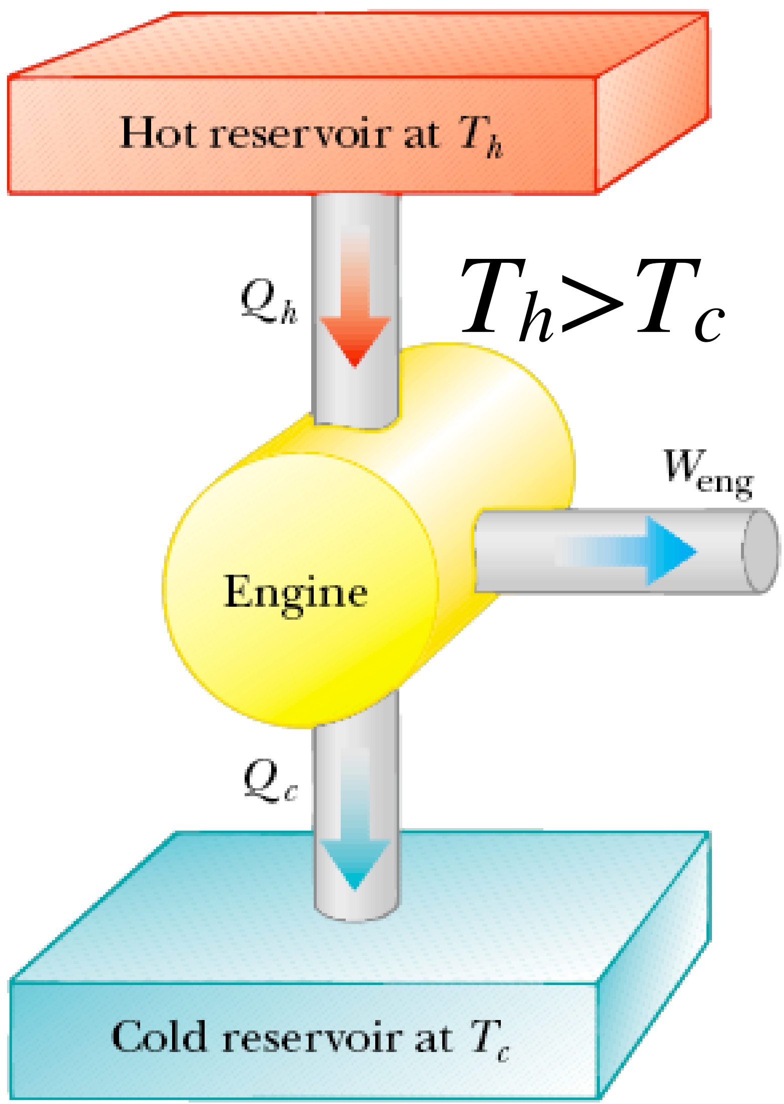


Percorso	Lavoro	Calore
A→B	$-\int_{V_A}^{V_B} PdV$	$Q_h = T_h \Delta S$
B→C	$-\int_{V_B}^{V_C} PdV$	-
C→D	$-\int_{V_C}^{V_D} PdV$	$Q_c = T_c \Delta S$
D→A	$-\int_{V_D}^{V_A} PdV$	-

L'espansione e la compressione isoterme possono essere realizzate con passaggi di stato

Date due sorgenti termiche, la macchina di Carnot è quella che presenta il redimento più alto

Supponiamo di disporre di un motore reale che opera fra due sorgenti termiche



$T_h > T_c$

$$\eta = \frac{|W_{eng}|}{|Q_h|} = 1 - \frac{|Q_c|}{|Q_h|}$$

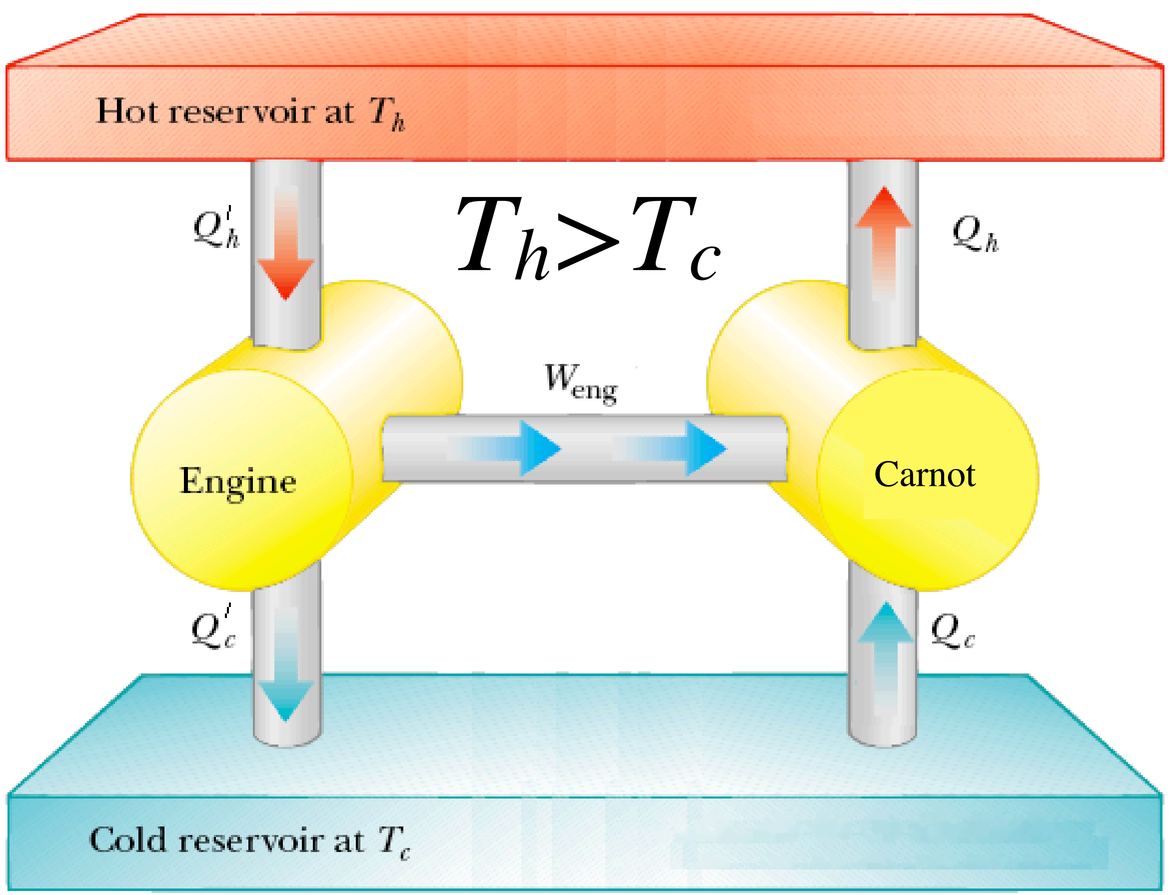
Per ogni motore reale (non reversibile)

$$0 \geq \frac{|Q_h|}{T_h} - \frac{|Q_c|}{T_c}$$

$$1 - \frac{|Q_c|}{|Q_h|} \leq 1 - \frac{T_c}{T_h}$$

Date due sorgenti termiche, la macchina di Carnot è quella che presenta il redimento più alto

Supponiamo di disporre di un motore che abbia un rendimento maggiore della macchina di Carnot



La macchina di Carnot è reversibile, quindi può sfruttare il lavoro del motore per far passare il calore dalla sorgente fredda a quella calda

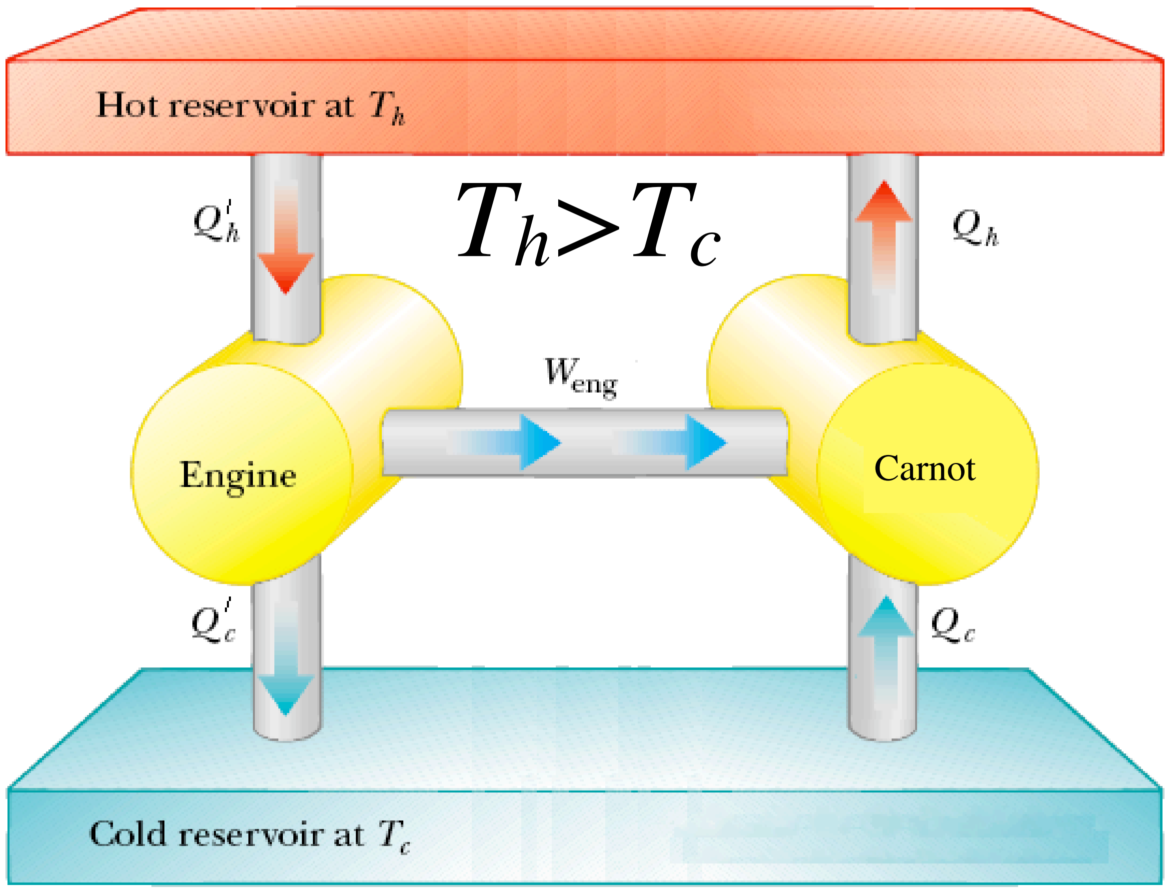
$$\eta_{carnot} = \frac{|W_{eng}|}{|Q_h|} \qquad \eta_{eng} = \frac{|W_{eng}|}{|Q'_h|}$$

$$\eta_{eng} > \eta_{carnot}$$

$$|Q'_h| = \frac{\eta_{carnot}}{\eta_{eng}} |Q_h|$$

Date due sorgenti termiche, la macchina di Carnot è quella che presenta il redimento più alto

I principio: $$|Q_c| - |Q_c^{'}| = \left(1 - \frac{\eta_{carnot}}{\eta_{eng}}\right)|Q_h|$$



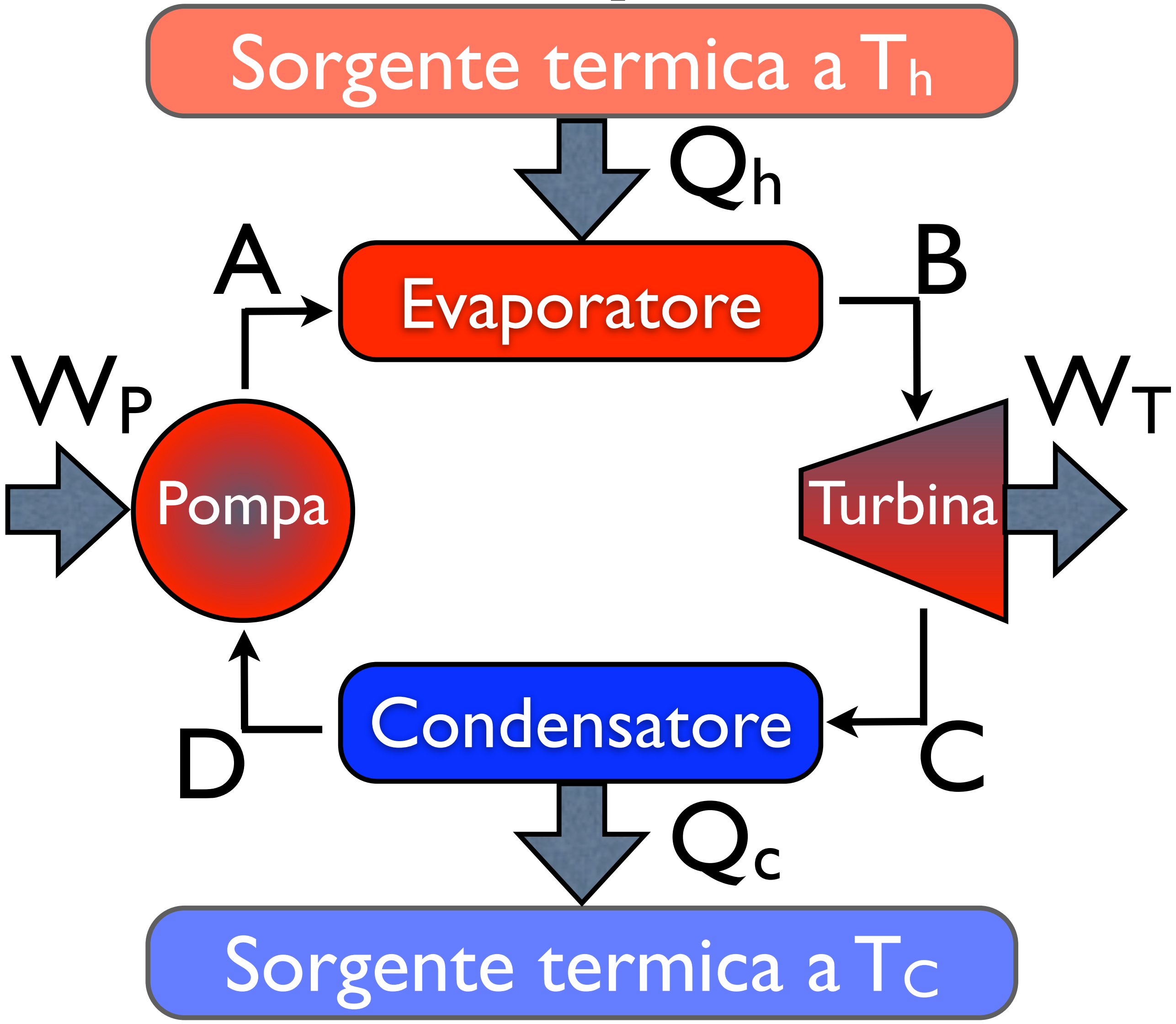
II principio:

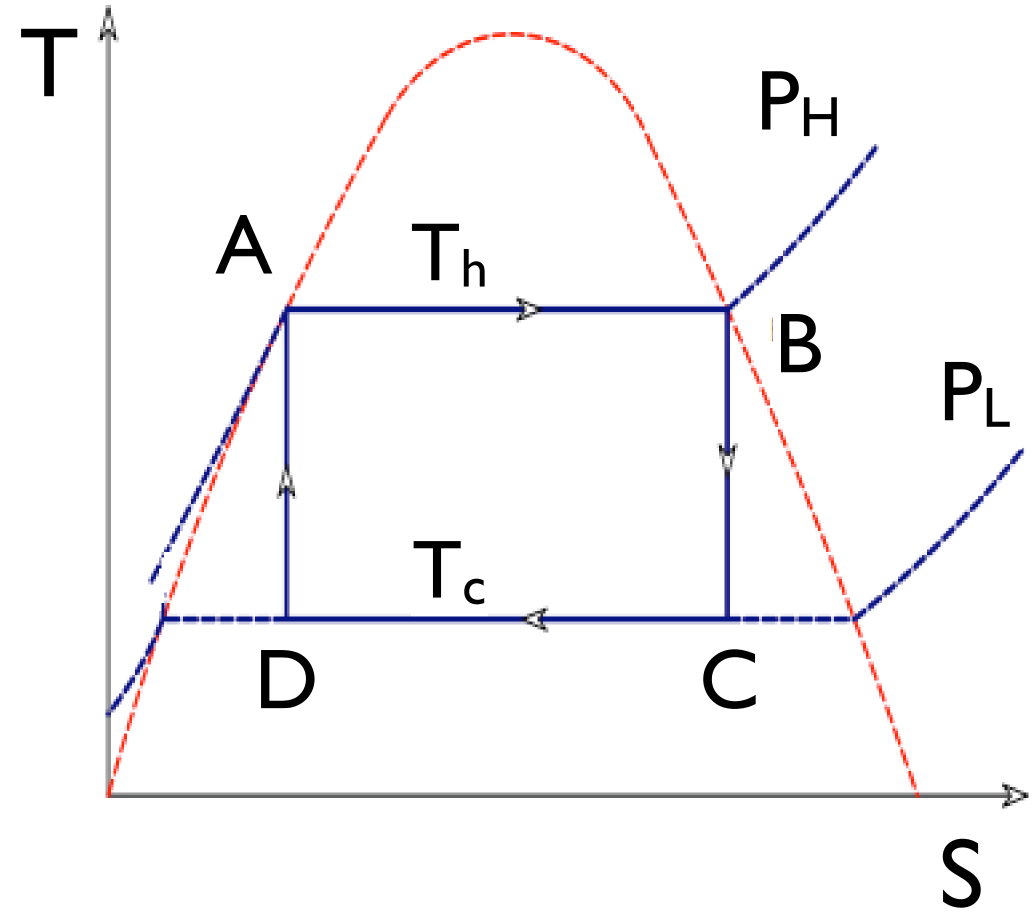
$$\frac{W_{perso}}{T_{ref}} = |Q_h|\left(1 - \frac{\eta_{carnot}}{\eta_{eng}}\right)\left(\frac{T_c - T_h}{T_c T_h}\right)$$

Se il $\eta_{eng} > \eta_{carnot}$ si ottiene $W_{perso} < 0$ in violazione del II principio della Termodinamica

Qualunque macchina reversibile operante fra due sorgenti termiche ha lo stesso rendimento della macchina di Carnot

Un'altra possibile macchina di Carnot





Bilancio di energia

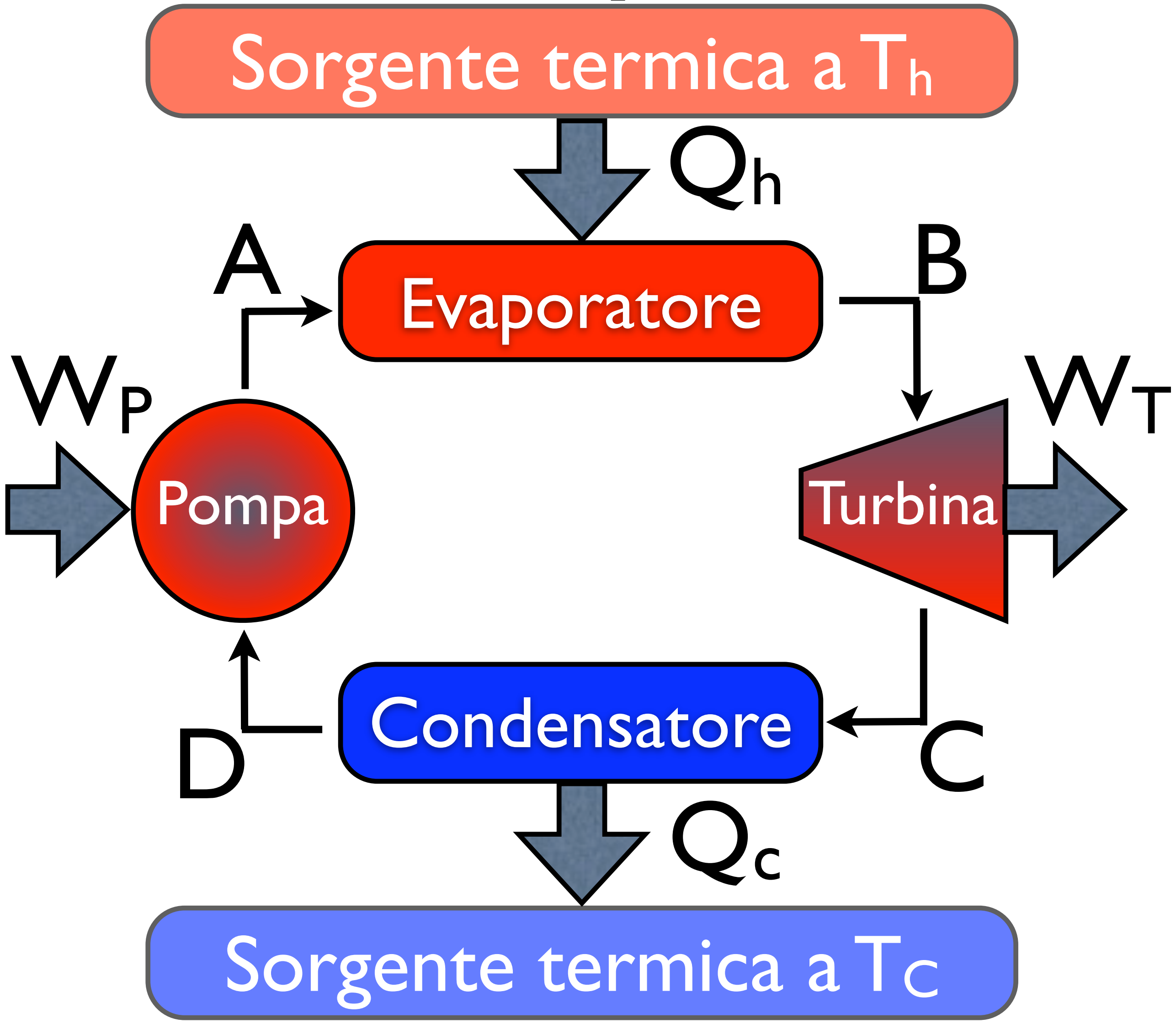
$$0=Q_h+Q_c+W_T+W_P$$

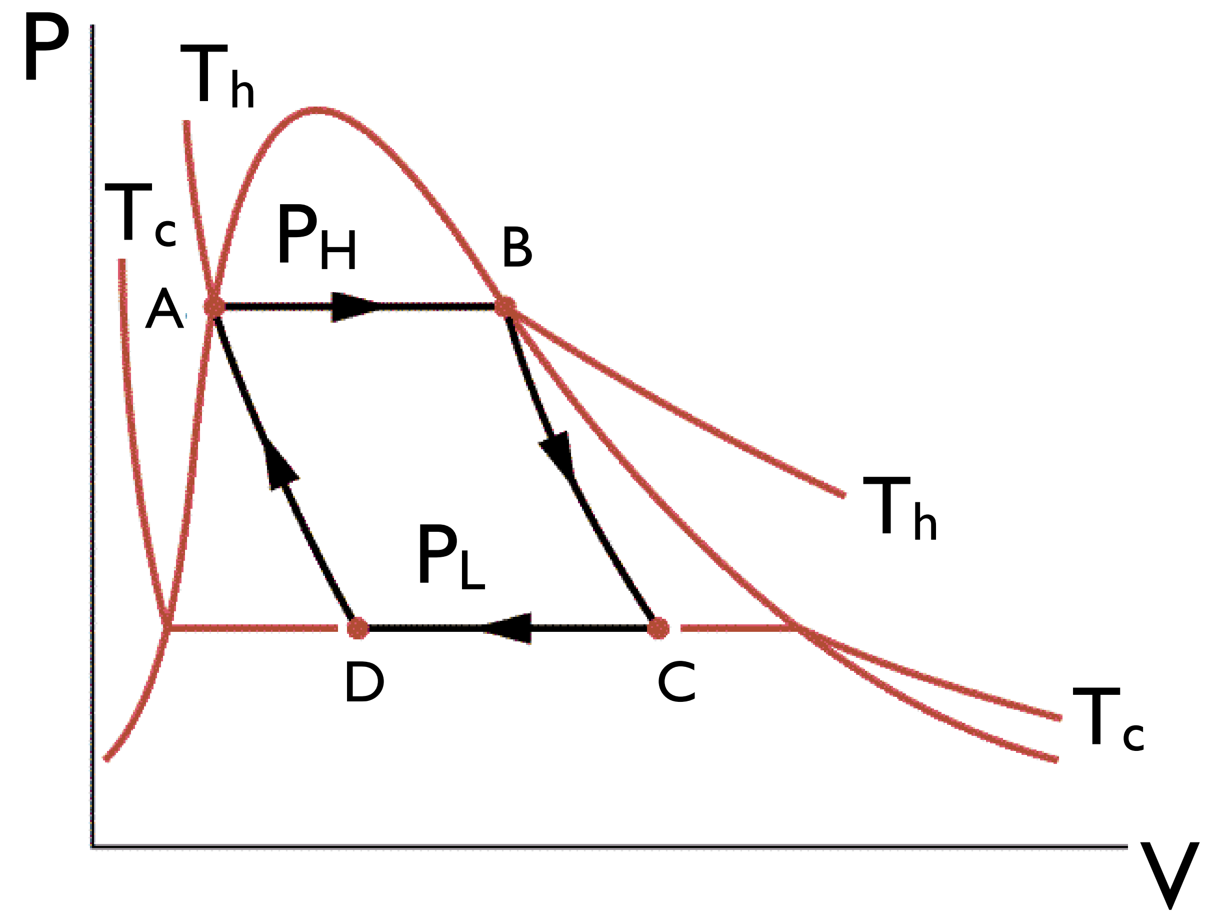
Variazione di entropia

$$0=\frac{Q_h}{T_h}+\frac{Q_c}{T_c}$$

Percorso	Lavoro	Calore
A→B	-	$\dot{Q}_h = T_h \Delta S$
B→C	$\dot{W}_T=\Delta H$	-
C→D	-	$Q_c = T_c \Delta S$
D→A	$W_P=\Delta H$	-

Un'altra possibile macchina di Carnot





Bilancio di energia

$$0=Q_h+Q_c+W_T+W_P$$

Variazione di entropia

$$0=\frac{Q_h}{T_h}+\frac{Q_c}{T_c}$$

Percorso	Lavoro	Calore
A→B	-	$\dot{Q}_h = T_h \Delta S$
B→C	$\dot{W}_T=\int VdP$	-
C→D	-	$Q_c = T_c \Delta S$
D→A	$\dot{W}_P=\int VdP$	-