
Energia e Sviluppo Sostenibile

Termodinamica Applicata: Cicli Termodinamici

A. Servida - servida@unige.it



Cicli Termodinamici (1)

- E' una trasformazione (quasistatica) ciclica che riporta il sistema nello stesso stato iniziale (di equilibrio). Quindi:

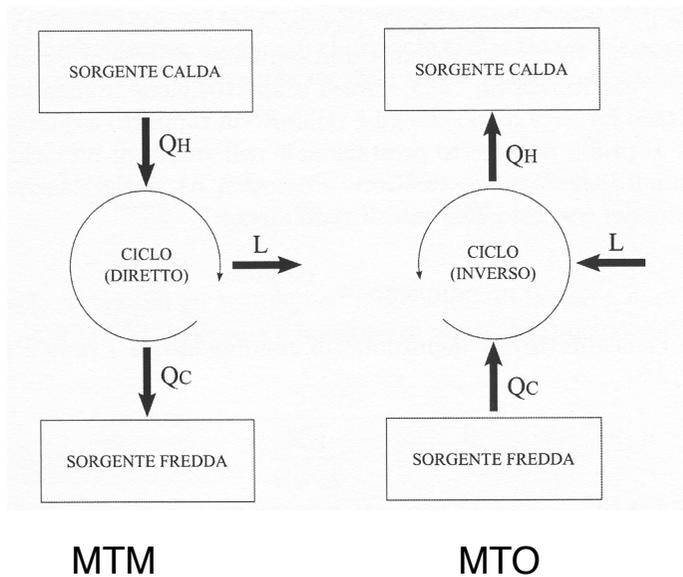
$$\Delta U = 0 \quad \implies Q = W_{\text{sist}}$$

cioè si ha la trasformazione di calore in lavoro!!!!

- **Macchina termica motrice** (MTM) sfrutta un ciclo termodinamico per trasformare calore in lavoro (energia meccanica).
- **Macchina termica operatrice** (MTO) sfrutta un ciclo termodinamico per scambiare calore tra una sorgente fredda ed una calda.

Cicli Termodinamici (2)

- Macchine termodinamiche *motrici e operatrici*



- Le MTO si suddividono in:

- ✓ *macchine frigorifere* (se l'obiettivo è estrarre Q_c dalla sorgente fredda);
- ✓ *pompe di calore* (se l'obiettivo è fornire Q_h al corpo caldo).

$$\eta = \frac{W}{Q_H}$$

Cicli Termodinamici (3)

- In una MTM si ha:

$$W = Q_H - Q_C \quad ; \quad (\text{rendimento}) = \eta = \frac{W}{Q_H} = 1 - \frac{Q_C}{Q_H}$$
$$\Delta S = -\frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_C}{T_C} \quad (18)$$

- Per le MTM *reversibili* deve essere: $\Delta S = 0$; negli altri casi possiamo definire $S_{\text{irr}} = \Delta S$ (S_{irr} è sempre > 0).
- Segue allora:

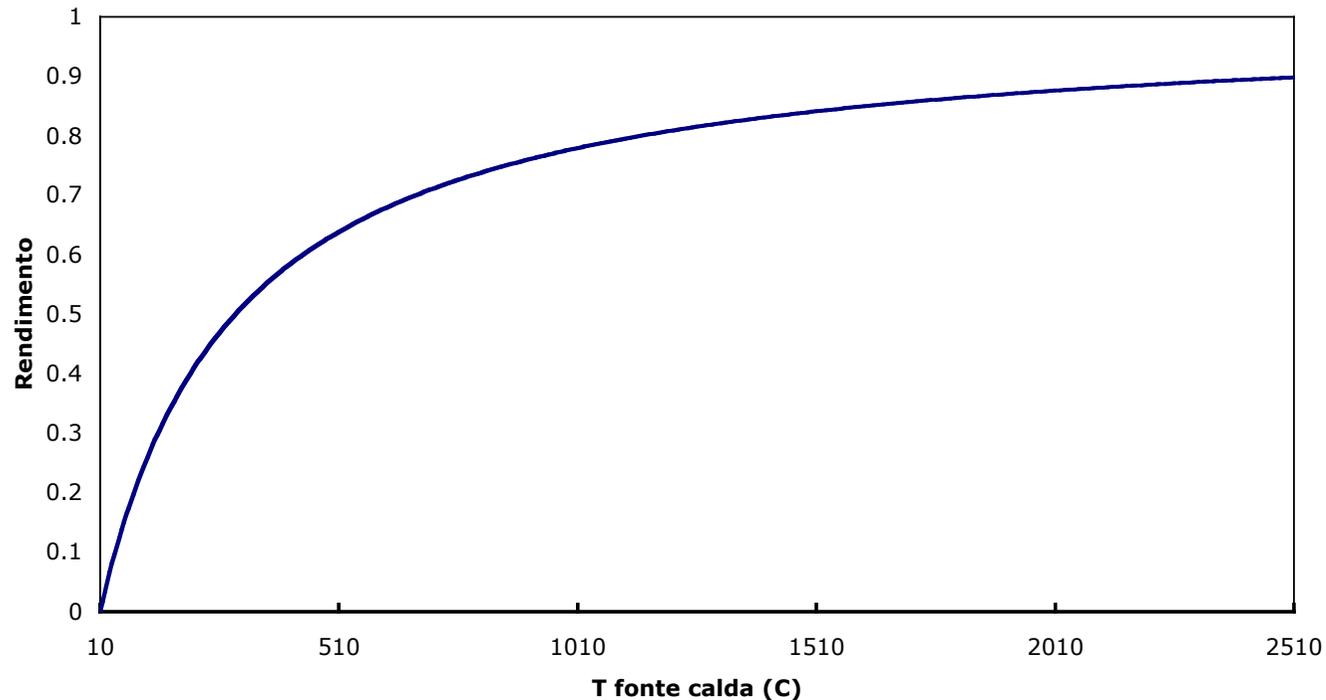
$$Q_C = Q_H \frac{T_C}{T_H} + T_C S_{\text{irr}} \quad ; \quad \eta = \frac{W}{Q_H} = 1 - \left(\frac{T_C}{T_H} + \frac{T_C S_{\text{irr}}}{Q_H} \right)$$
$$\eta = 1 - \frac{T_C}{T_H} - \frac{T_C S_{\text{irr}}}{Q_H} \quad ; \quad W = Q_H \left(1 - \frac{T_C}{T_H} \right) - T_C S_{\text{irr}} \quad (19)$$

Cicli Termodinamici (4)

- Segue che per una MTM reversibile (o macchina di Carnot):

$$\frac{Q_H}{T_H} = \frac{Q_C}{T_C} \quad ; \quad \eta_{\text{rev}} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$
$$W_{\text{rev}} = W_{\text{max}} = Q_H \left(1 - \frac{T_C}{T_H} \right) \quad (20)$$

Rendimento MTM reversibile



Cicli Termodinamici (5)

- Rendimento di secondo principio: η_{II} :

$$\eta_{II} = \frac{\eta}{\eta_{rev}} \quad (21)$$

η_{rev} : rappresenta il rendimento di un ciclo reversibile (Carnot) che opera tra le stesse temperature estreme.

- Per le MTO si definisce l'indice di prestazione *efficacia*, ε , (o *coefficient of performance*, COP) definito in base all'utilizzo della macchina stessa.
- Per una *MTO frigorifera* si definisce:

$$\varepsilon_{mf} = \text{COP}_{mf} = \frac{Q_C}{W} = \frac{Q_C}{Q_H - Q_C} = \frac{Q_C}{Q_C \left(\frac{Q_H}{Q_C} - 1 \right)} = \frac{1}{\left(\frac{Q_H}{Q_C} - 1 \right)} \quad (22)$$

Cicli Termodinamici (5)

- Poichè in una MTO frigorifera: $\Delta S = S_{\text{irr}} = \frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_C}{T_C}$ (23)

- segue:

$$\varepsilon_{\text{mf}} = \text{COP}_{\text{mf}} = \frac{1}{\frac{Q_C \frac{T_H}{T_C} - T_H S_{\text{irr}}}{Q_C} - 1} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_C} + \frac{T_H S_{\text{irr}}}{Q_C} - 1}$$
$$W = Q_H \left(\frac{T_H}{T_C} - 1 \right) + T_H S_{\text{irr}} \quad (24)$$

- Allora, in assenza di irreversibilità si ottiene:

$$\varepsilon_{\text{mf,rev}} = \text{COP}_{\text{mf,rev}} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_C} - 1} ; \quad W = Q_H \left(\frac{T_H}{T_C} - 1 \right) + T_H S_{\text{irr}}$$
$$W_{\text{rev}} = W_{\text{min}} = Q_H \left(\frac{T_H}{T_C} - 1 \right) \quad (25)$$

Cicli Termodinamici (6)

Per una MTO pompa di calore, l'efficacia è definita come:

$$\varepsilon_{pc} = \text{COP}_{pc} = \frac{Q_H}{W} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_C} = \frac{Q_H}{Q_H \left(1 - \frac{Q_C}{Q_H}\right)} = \frac{1}{\left(1 - \frac{Q_C}{Q_H}\right)} \quad (26)$$

- Quindi:

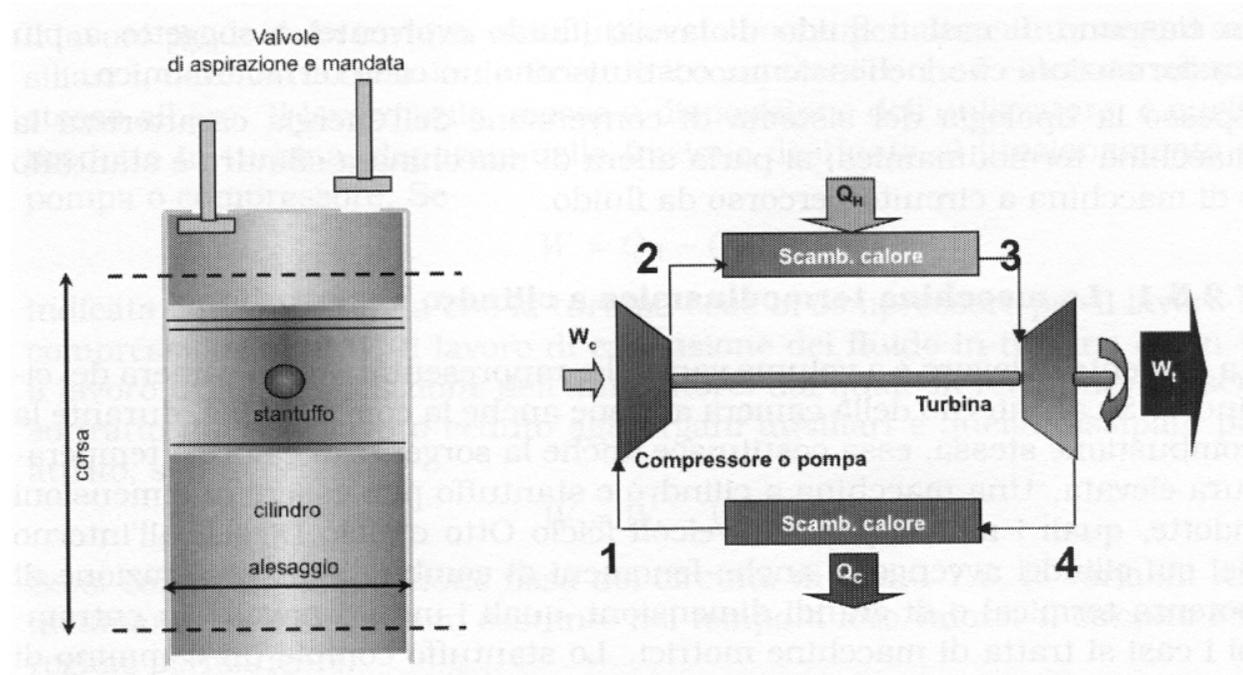
$$\varepsilon_{pc} = \text{COP}_{pc} = \frac{1}{1 - \frac{T_C}{T_H} + \frac{T_C S_{irr}}{Q_H}}$$
$$W = Q_H \left(1 - \frac{T_C}{T_H}\right) + T_C S_{irr} \quad (27a)$$

- Quindi in assenza di irreversibilità:

$$\varepsilon_{pc,rev} = \text{COP}_{pc,rev} = \frac{1}{1 - \frac{T_C}{T_H}}$$
$$W_{rev} = W_{min} = Q_H \left(1 - \frac{T_C}{T_H}\right) \quad (27b)$$

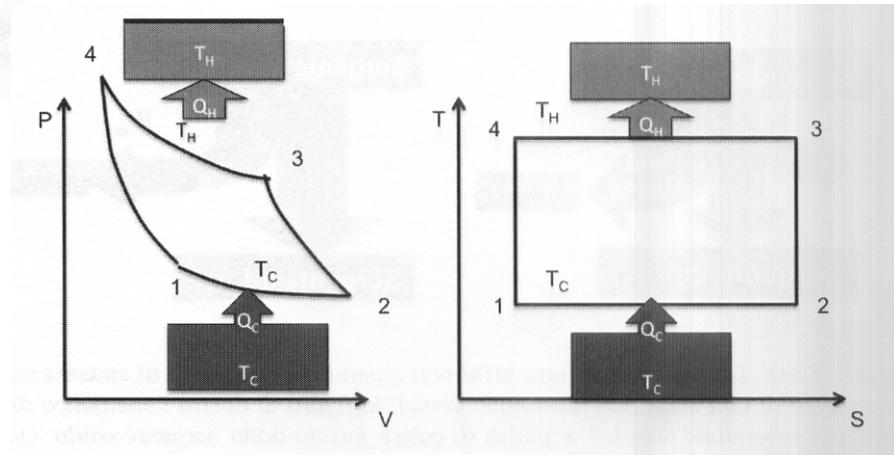
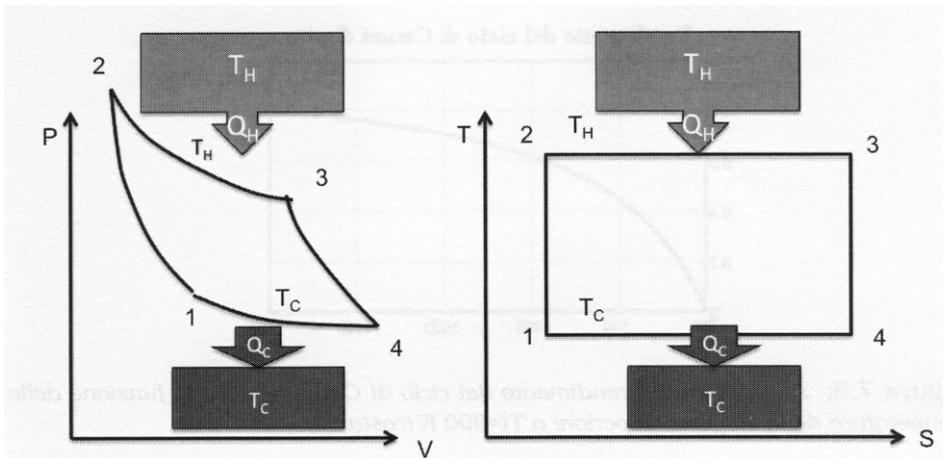
Macchine Termodinamiche per la Conversione di Energia

- Sono di due tipi:
 - a cilindro e stantuffo;
 - a circuito chiuso.



Ciclo di Carnot

- E' un ciclo ideale costituito da due isoterme (lungo le quali si realizzano gli scambi di calore) e da due isoentropiche (una di compressione e una di espansione).



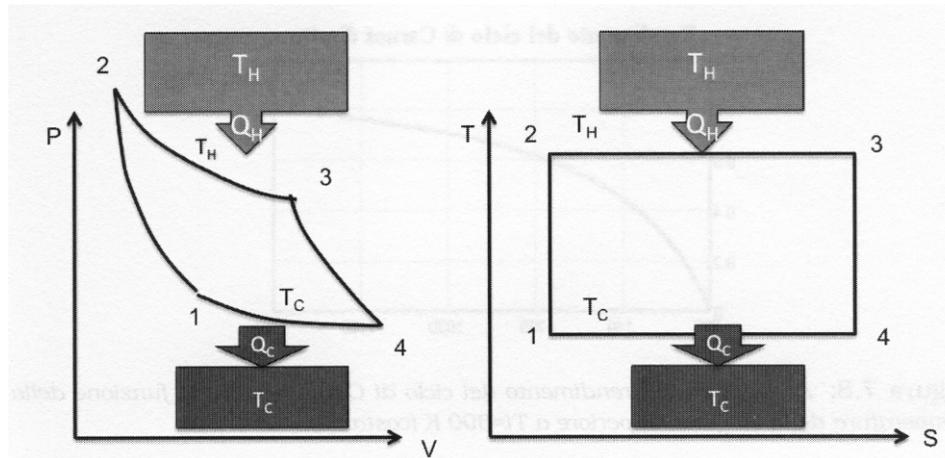
Ciclo di Carnot Diretto (1)

- Dal primo principio della termodinamica:

$$Q_H - Q_C - W = 0 \Rightarrow W = Q_H - Q_C \quad (28)$$

- Per una MTM di Carnot reversibile, la variazione di entropia è nulla, quindi:

$$\Delta S = -\frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_C}{T_C} = 0 \Rightarrow \frac{Q_H}{T_H} = \frac{Q_C}{T_C} \quad (29)$$



$$\eta = \frac{Q_H - Q_C}{Q_H} = \frac{T_H - T_C}{T_H} = 1 - \frac{T_C}{T_H} = \eta_{\text{rev}} \quad (30)$$

Ciclo di Carnot Diretto (2)

- Per una MTM che operi in modo irreversibile, si ha:

$$\Delta S = S_{\text{irr}} = -\frac{Q_H}{T_H} + \frac{Q_C}{T_C} > 0 \quad (31)$$

- Quindi, rispetto a una macchina di Carnot che assorbe lo stesso calore Q_H e lavora tra le due temperature, T_H e T_C , sia ha:

$$Q_C > (Q_C)_{\text{rev}} = Q_H \frac{T_C}{T_H} \quad (32)$$

- In altre parole, la MTM non reversibile scarica una maggiore quantità di calore al "pozzo" freddo (e quindi produce meno lavoro, W).

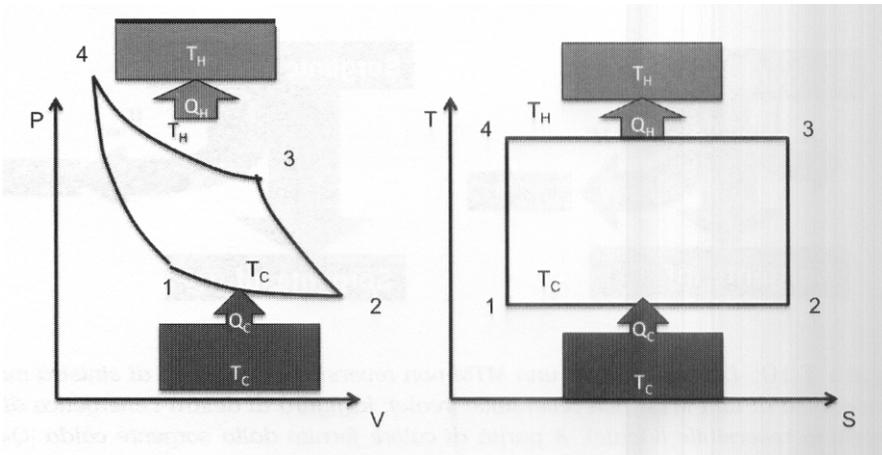
Ciclo di Carnot Inverso (1)

- Dal primo principio della termodinamica:

$$-Q_H + Q_C + W = 0 \Rightarrow Q_H = W + Q_C \quad (33)$$

- Per una MTO di Carnot reversibile, la variazione di entropia è nulla, quindi:

$$\Delta S = \frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_C}{T_C} = 0 \Rightarrow \frac{Q_H}{T_H} = \frac{Q_C}{T_C} \quad (34)$$



Efficacia pompa di calore di Carnot

$$\varepsilon_{pc,rev} = COP_{pc,rev} = \frac{Q_H}{W} = \frac{1}{1 - \frac{T_C}{T_H}} \quad (35)$$

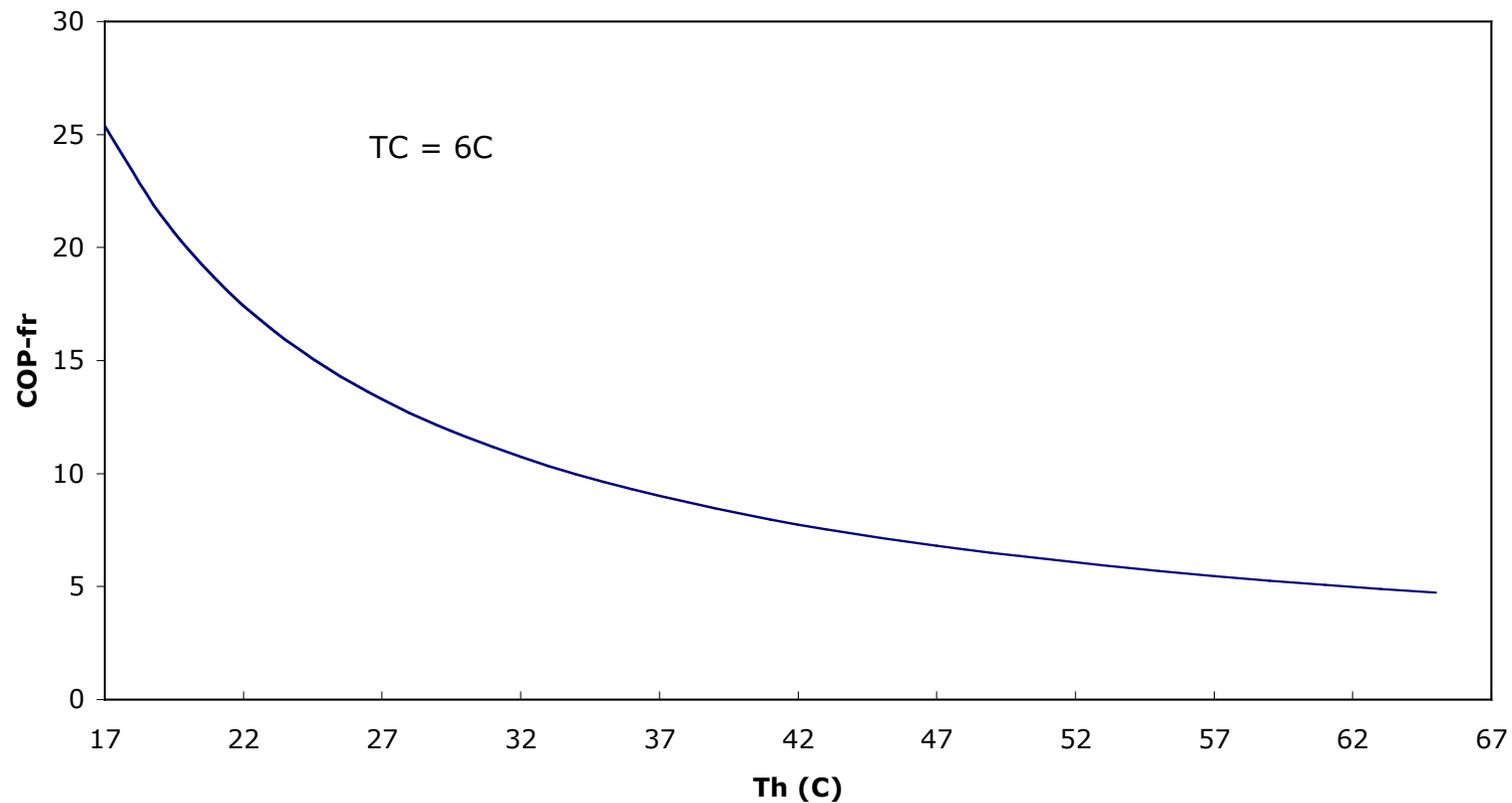
Efficacia macchina frigorifera di Carnot

$$\varepsilon_{fr,rev} = COP_{fr,rev} = \frac{Q_C}{W} = \frac{1}{\frac{T_H}{T_C} - 1} \quad (36)$$

Ciclo di Carnot Inverso (2)

- Efficacia della macchina frigorifera di Carnot.

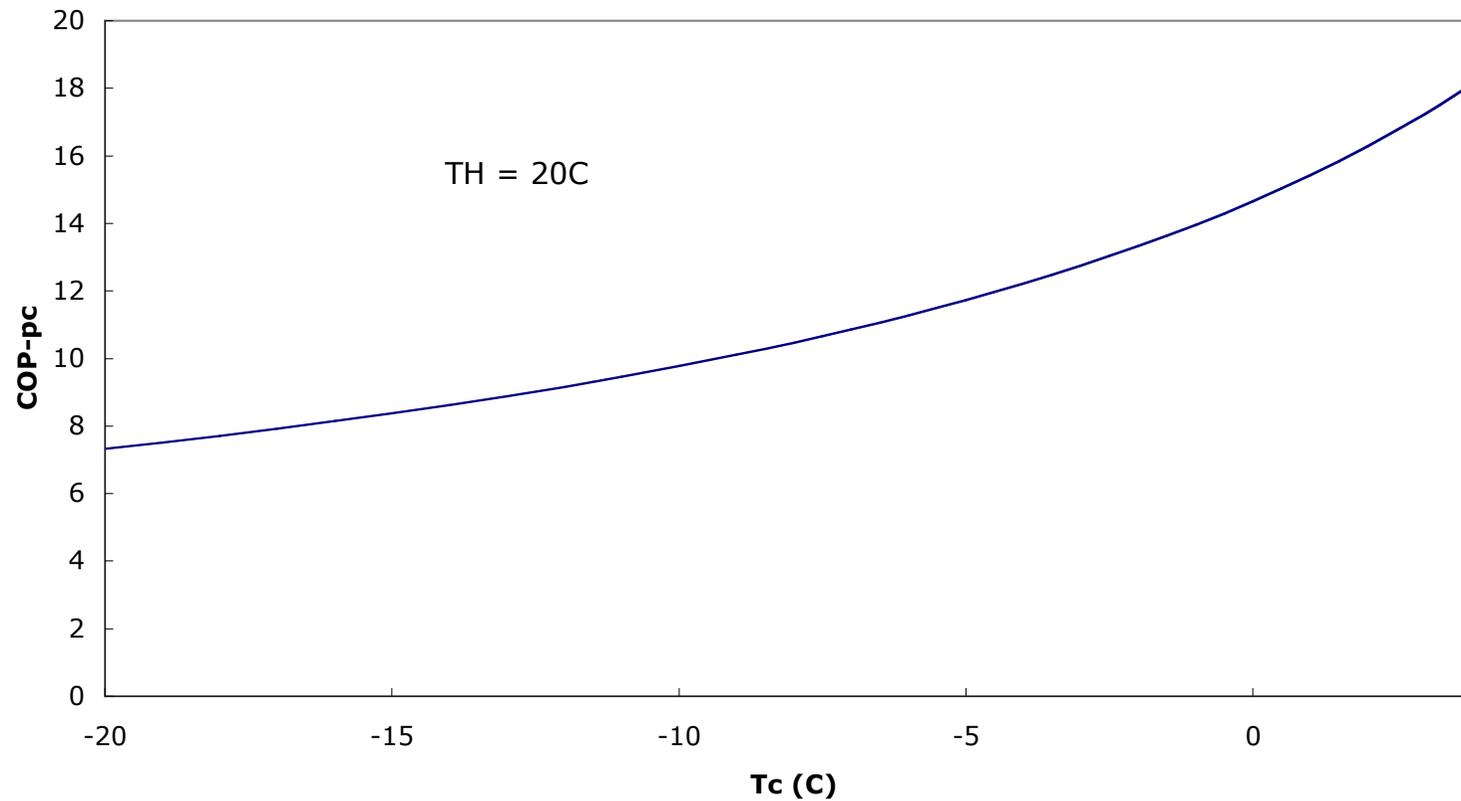
COP macchina frigorifera



Ciclo di Carnot Inverso (3)

- Efficacia della pompa di calore di Carnot.

Efficacia pompa di calore



Ciclo di Carnot Inverso (4)

- Per una MTO che operi in modo irreversibile, si ha:

$$\Delta S = S_{\text{irr}} = \frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_C}{T_C} > 0 \quad (37)$$

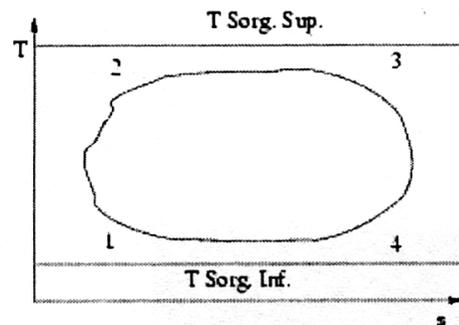
- Quindi, rispetto a una macchina di Carnot che assorbe lo stesso calore Q_C e lavora tra le due temperature, T_H e T_C , sia ha:

$$Q_H > (Q_H)_{\text{rev}} = Q_C \frac{T_H}{T_C} \quad (38)$$

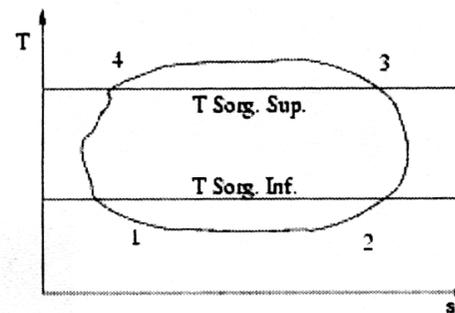
- In altre parole, la MTO non reversibile scarica una maggiore quantità di calore al "pozzo" caldo (e quindi assorbe più lavoro, W).

Temperature Sorgenti/Pozzi di Calore

- Nella pratica, il sistema che subisce la trasformazione ciclica scambia calore con le sorgenti/pozzi sfruttando una forza motrice finita, ΔT .
- Quindi, a seconda che si consideri il *ciclo diretto* (a) o *quello inverso* (b), le temperature delle sorgenti/pozzi sono disposte in modo differente rispetto a quelle lungo le quali si realizzano gli scambi di calore!!!



(a)



(b)