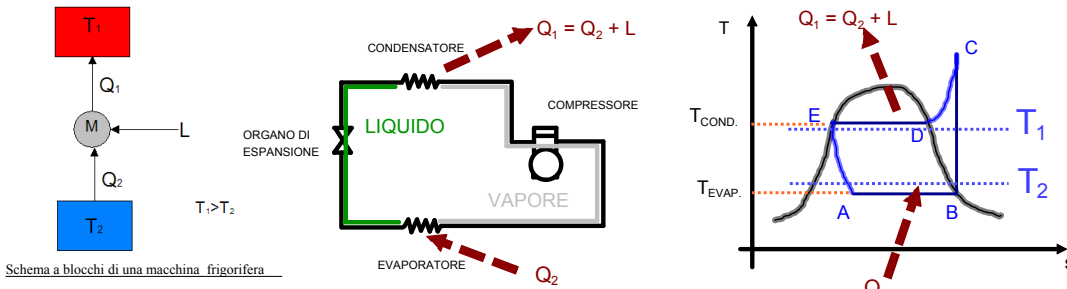


POMPA DI CALORE

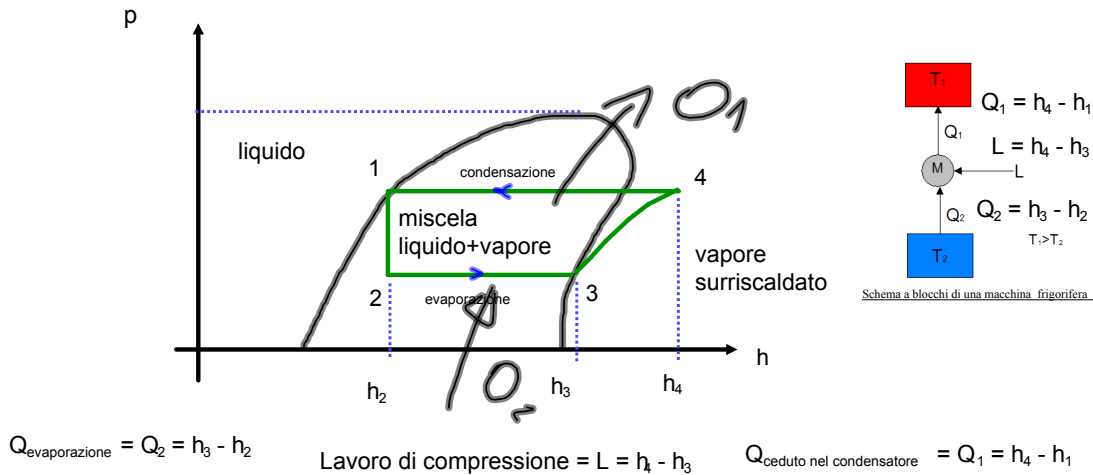


Dal punto di vista energetico una pompa di calore è certamente più vantaggiosa del riscaldamento elettrico, poichè il COP è, per definizione, maggiore di uno. Il COP esprime il rapporto tra l'energia termica resa (Q_2) e l'energia elettrica utilizzata (L).

Il valore ottimale di COP è quello del ciclo di Carnot inverso ed è dato da:

$$COP = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

CICLO FRIGORIFERO A COMPRESIONE DI VAPORE



$Q_{\text{evaporazione}} = Q_2 = h_3 - h_2$
 Lavoro di compressione = $L = h_4 - h_3$
 $Q_{\text{ceduto nel condensatore}} = Q_1 = h_4 - h_1$

scopo impianto:

raffreddare

riscaldare

$$\eta_F = \frac{Q_2}{L} = \frac{h_3 - h_2}{h_4 - h_3}$$

$$COP = \frac{Q_1}{L} = \frac{h_4 - h_1}{h_4 - h_3}$$

coefficiente di effetto utile frigorifero

coefficiente di prestazione

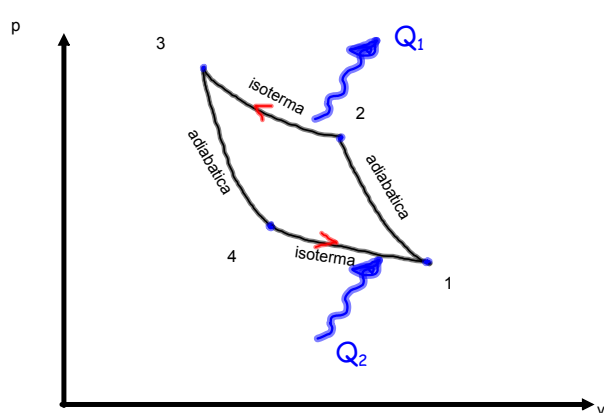
Ma il COP di una macchina non può essere maggiore di quello di una macchina ideale reversibile operante secondo il ciclo di Carnot inverso. Risulta quindi:

$$\eta_{F,IDEALE} = \frac{Q_2}{L} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$

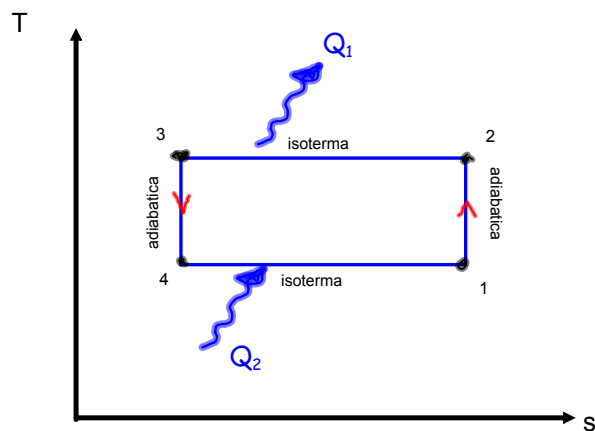
$$COP_{IDEALE} = \frac{Q_1}{L} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2}$$

$$\eta_{F,IDEALE} = \frac{Q_2}{L} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} = \frac{T_{EVAP.}}{T_{COND.} - T_{EVAP.}}$$

$$COP_{IDEALE} = \frac{Q_1}{L} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} = \frac{T_{COND.}}{T_{COND.} - T_{EVAP.}}$$

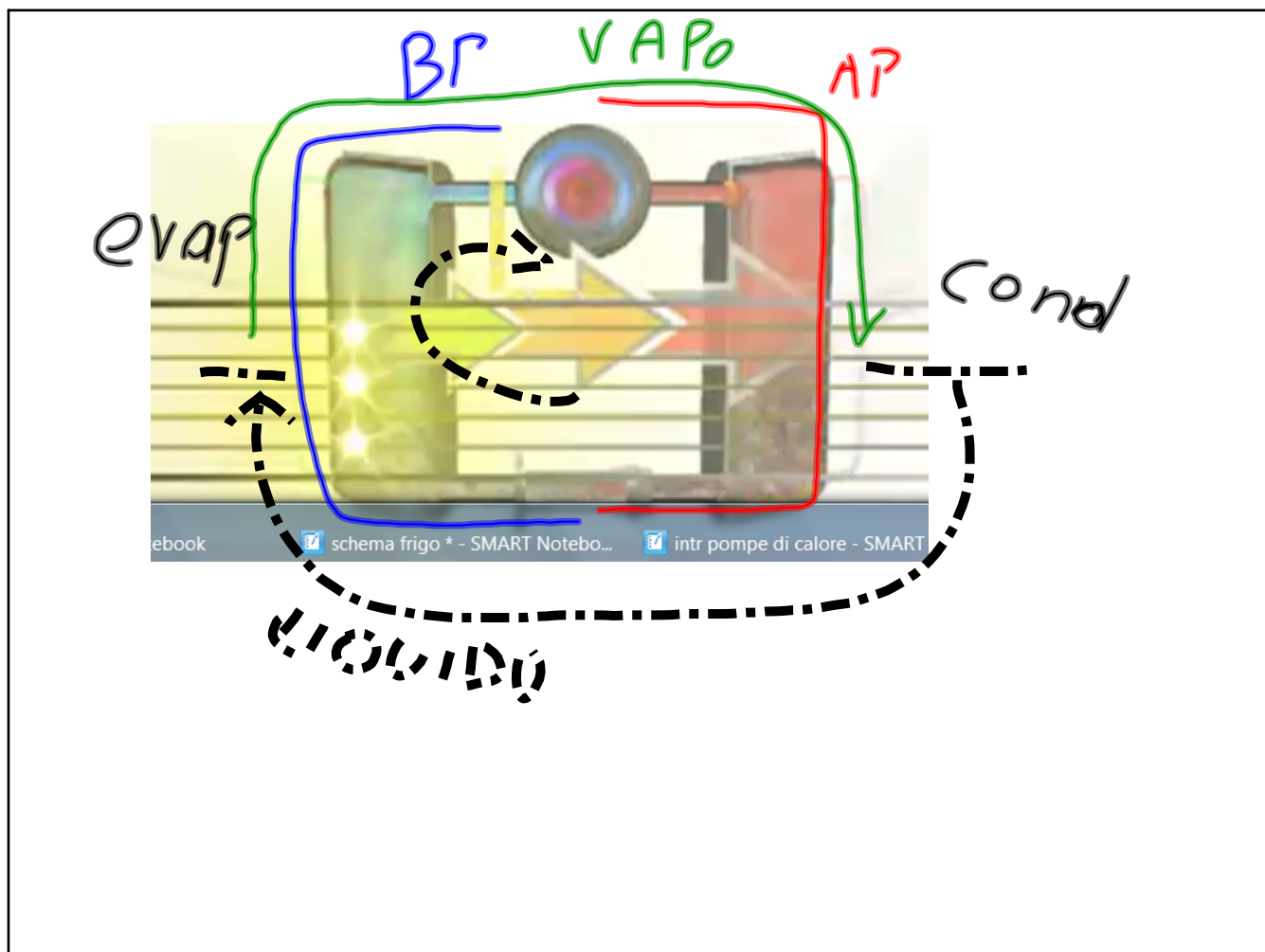


ciclo frigo di Carnot rappresentato nel diagramma p-v



ciclo frigo di Carnot rappresentato nel diagramma entropico

il rendimenti / coefficienti di una macchina frigorifera basata sul ciclo di carnot inverso valgono:

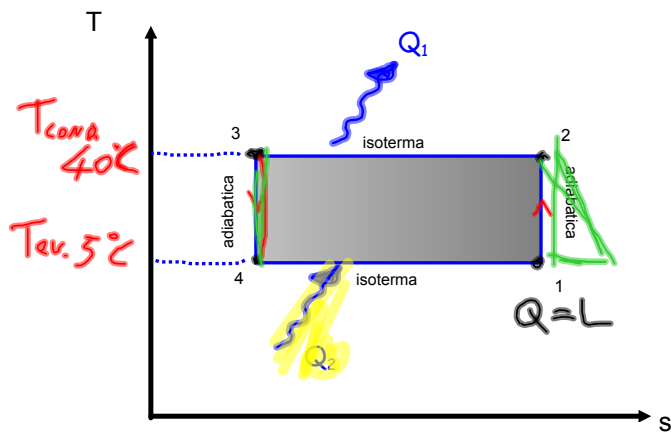


Una macchina frigorifera utilizza come refrigerante il Freon F12, che fornisce il calore $\dot{Q} = 200000$ frigorie/h. Conoscendo le due temperature $T_{ev}=5^{\circ}\text{C}$ e $T_{cond}=40^{\circ}\text{C}$, considerando la compressione isentropica ($S_2=S_1$) e l'espansione isoentalpica ($h_4=h_3$), determinare il coefficiente di effetto utile frigorifero, il coefficiente di prestazione, il calore prodotto \dot{Q}_1 , il lavoro assorbito \dot{L} .

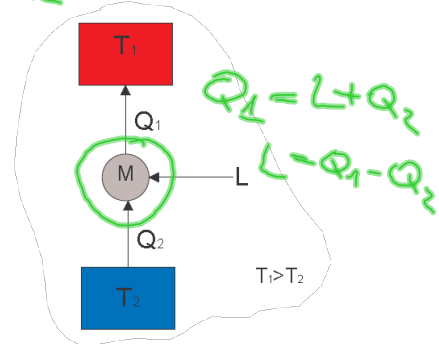
Qui sotto sono rappresentati i dati del problema e il diagramma p-h:

Trasformazione	Pressione (BAR)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Entalpia specifica (KJ/Kg)
1	3,6	5	353,6
2	9,6	50	371,1
3	9,6	40	238,5
4	3,6	5	238,5

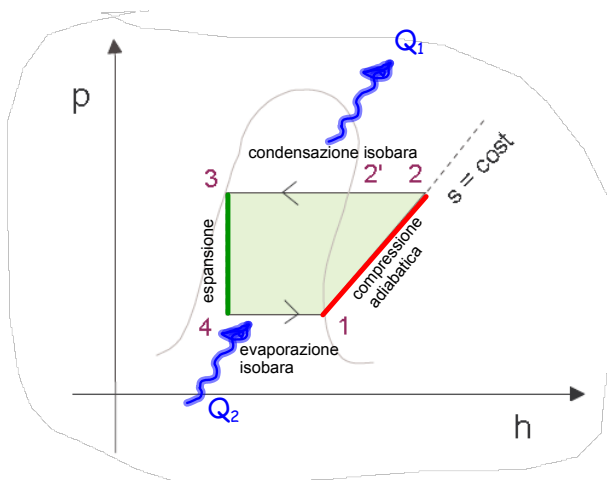
$$\dot{Q} = 200000 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} = 2326 \text{ kW} = \dot{Q}_2$$



ciclo frigo di Carnot rappresentato nel diagramma entropico



questo è il diagramma tipico di un fluido refrigerante:



casi dell'esercizio:

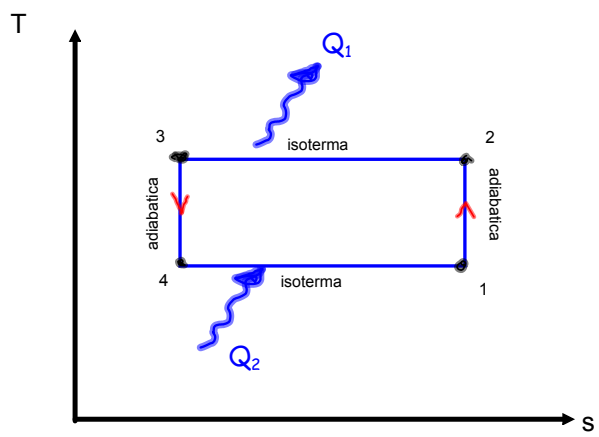
- compressione isoentropica (cioè adiabatica)
- espansione isoentalpica

Se si conosce il diagramma p-h del fluido refrigerante si ricavano le entalpie dei 4 punti.

Trasformazione	Pressione (BAR)	Temperatura (°C)	Entalpia specifica (KJ/Kg)
1	3,6	5	353,6
2	9,6	50	371,1
3	9,6	40	238,5
4	3,6	5	238,5

$$Q_1 = L + Q_2 \text{ cioè } COP = 1 + \eta_f$$

il coefficiente di una macchina frigorifera basata sul ciclo di carnot inverso avrebbe

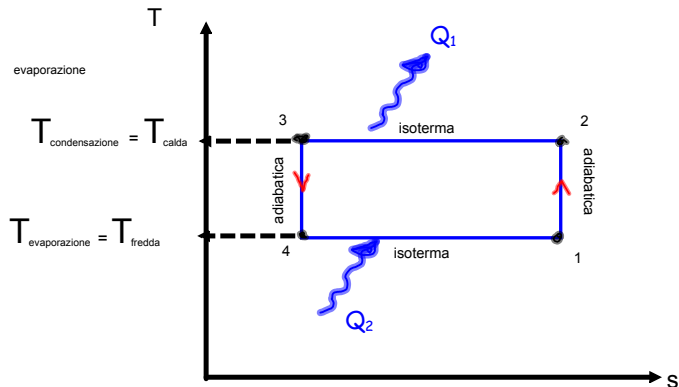


ciclo frigo di Carnot rappresentato nel diagramma entropico

ESERCIZIO 1

Si abbia un motore elettrico che fornisce lavoro per azionare una macchina frigorifera di Carnot. L'interno della macchina frigorifera è a 0°C . L'acqua liquida a 0°C è convertita in ghiaccio a 0°C . Per convertire 1g di ghiaccio in 1g di liquido sono necessari 334 J/g. Se la temperatura esterna è di 20°C , quanta massa di ghiaccio si produrrà in 1 minuto usando un motore con 0,25 hp che lavora di continuo? Si assuma che il frigorifero sia perfettamente isolato e che i rendimenti abbiano i valori più alti possibili.

RISOLUZIONE 1:



ciclo frigo di Carnot rappresentato nel diagramma entropico

- la temperatura della sorgente calda è quella dell'ambiente circostante a 20°C
- la temperatura della sorgente fredda è di 0°C

Quindi il coefficiente di effetto utile della macchina frigorifera di Carnot si calcola così:

$$\eta_f = \frac{T_e}{T_c - T_e} = \frac{T_F}{T_c - T_f}$$

$$\eta_f = \frac{T_F}{T_c - T_F} = \frac{273,15}{293,15 - 273,15} = 13,66$$

formula di conversione:

$$1 \text{ hp} = 745,7 \text{ W}$$

$$\text{potenza motore elettrico} : 0,25 \text{ hp} = 0,25 \cdot 745,7 \text{ W} = 186,425 \text{ W}$$

Il funzionamento continuo di un motore da 0,25 hp (186,425 W) fornisce un equivalente termico di lavoro pari al prodotto della potenza del motore per il tempo di funzionamento (in secondi ovviamente):

$$\text{in 1 minuto: } 186,425 \text{ W} \cdot 60 \text{ s} = 11185,5 \text{ J}$$

Il prodotto del coefficiente di effetto utile per l'energia fornita dal motore in un minuto di funzionamento fornisce la quantità di calore che la macchina frigorifera è in grado di sottrarre alla sorgente fredda. Risulta quindi:

$$\eta_F = \frac{Q_2}{L} \rightarrow Q_2 = \eta_F \cdot L = 13,66 \cdot 11185,5 = 152793,93 \text{ J}$$

$$\text{se } \Delta h_{\text{fusione}} = 334 \frac{\text{J}}{\text{g}} \text{ allora : } Q_2 = Q_{\text{fusione}} = m \cdot \Delta h_{\text{fusione}}$$

$$m = \frac{Q_{\text{fusione}}}{\Delta h_{\text{fusione}}} = \frac{152793,93 \text{ J}}{334 \frac{\text{J}}{\text{g}}} = 457,5 \text{ g}$$

ESERCIZIO 2

La temperatura normale di ebollizione dell'elio è di 4,216 K. Il calore di vaporizzazione è di 84 J/mol. Quale potenza del motore (in hp) sarà necessaria per far funzionare un frigorifero che deve condensare 2 mol/min di elio gassoso a 4,216 K in liquido alla stessa temperatura? Si assuma che la temperatura ambiente sia 300 K e che il coefficiente di effetto utile del frigorifero sia pari al 50% del valore massimo per ciclo reversibile.

RISOLUZIONE 2:

Le temperature tra cui funziona il ciclo inverso sono 300 K e la temperatura normale di ebollizione dell'elio 4,216 K. Il coefficiente di effetto utile massimo della macchina frigorifera è dato dalla seguente formula:

$$\eta_f = \frac{T_e}{T_c - T_e} = \frac{T_F}{T_c - T_F} = \frac{4,216}{300 - 4,216} = 0,01425$$

quindi quello effettivo sarà: $\eta = 0,5 \cdot \eta_f = 0,5 \cdot 0,01425 = 0,007125$

La potenza termica che la macchina frigorifera deve sottrarre alla sorgente fredda è:

$$Q_2 = \frac{n_{He} \cdot \Delta h_{vap}^{He}}{60} = \frac{2 \cdot 84}{60} = 2,8 W$$

La potenza del motore deve essere:

$$1 W = \frac{1}{745,7} hp$$

$$\eta_F = \frac{Q_2}{L} = \frac{\dot{Q}_2}{\dot{L}} \rightarrow \dot{L} = \frac{\dot{Q}_2}{\eta} = \frac{2,8}{0,007125} = 393 W = 393 \cdot \frac{1}{745,7} hp = 0,527 hp$$

ESERCIZIO 3:

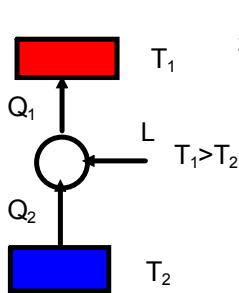
Se un impianto elettrico a combustibile fossile, operante tra 540 e 50°C, alimenta una pompa di calore che opera tra 25 e 5°C, quanto vale la quantità di calore fornita ad una casa per unità di calore estratto dalla caldaia della centrale termica? Si considerino i seguenti casi:

- 1) assumere che i rendimenti siano uguali ai valori massimi teorici
- 2) assumere che il rendimento dell'impianto sia il 70% del valore massimo e che il coefficiente di effetto utile della pompa di calore sia il 10% del valore massimo
- 3) se un bruciatore può sfruttare l'80% dell'energia di un combustibile fossile per riscaldare la casa, sarebbe più economico, in termini di consumo totale di combustibile fossile, usare una pompa di calore o un bruciatore? Fare i calcoli sia per il caso 1) che per il caso 2).

RISOLUZIONE 3:

Per calcolare il calore fornito dalla pompa di calore occorre conoscere l'energia fornita dalla centrale di potenza. Il rendimento per il ciclo termico reversibile della centrale di potenza è:

$$\eta_c = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{(50 + 273)}{(540 + 273)} = 1 - \frac{323}{813} = 0,6$$



$$\eta_c = \frac{L}{Q_1} \quad \text{Quindi l'energia fornita dalla centrale è: } L$$

$$L = \eta_c \cdot Q_1 \quad \text{se } Q_1 = 1 \Rightarrow L = \eta_c$$

Allora l'energia fornita al ciclo termico è pari numericamente al rendimento del ciclo.

il coefficiente di effetto utile del ciclo inverso della pompa di calore è definito come il rapporto tra il calore ceduto alla sorgente calda ed il lavoro speso:

$$COP = \frac{Q_2}{L} = \frac{Q_{CASA}}{L}$$

$$\text{se } COP = \frac{Q_2}{L} = \frac{Q_{CASA}}{L} \Rightarrow COP = \frac{Q_2}{\eta_c} \Rightarrow Q_2 = COP \cdot \eta_c$$

a) Nel caso di macchina reversibile di Carnot si calcola così:

$$COP = \frac{T_c}{T_c - T_f} = \frac{(25 + 273,15)}{(25 + 273,15) - (5 + 273,15)} = \frac{298,15}{298,15 - 278,15} = 14,91$$

$$Q_2 = COP \cdot \eta_c \cdot 1J = 14,91 \cdot 0,6 \cdot 1 = 8,946 J$$

b) Nel caso dei rendimenti dati:

$$Q_2 = (0,10 \cdot COP) \cdot (0,7 \cdot \eta_c) \cdot 1J = 0,626 J$$

c) Nel caso dato:

$$\text{è come dire: } Q_2 = 0,80 \cdot 1 = 0,8 J$$

rispetto ai casi di prima:

- a) è meglio la pompa di calore
- b) conviene usare il bruciatore

