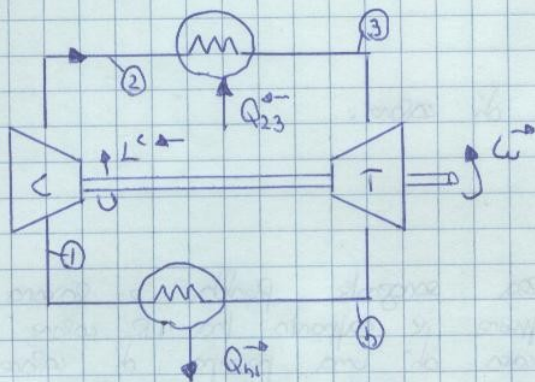


Un'evoluzione del ciclo di Joule è il **ciclo di Joule-Brayton**. Esso non viene scelto in un semplice sistema cilindro-pistone bensì in sistemi più complessi. Torniamo brevemente al ciclo di Joule. Nei processi $2 \rightarrow 3$ e $4 \rightarrow 1$ il cilindro-pistone opera scambiando contemporaneamente calore e lavoro. Questo problema del ciclo di Joule viene risolto con il ciclo Joule-Brayton. Esso viene realizzato tramite una macchina formata da un compressore, da una turbina, e da due scambiatori di calore. Schematicamente si ha:

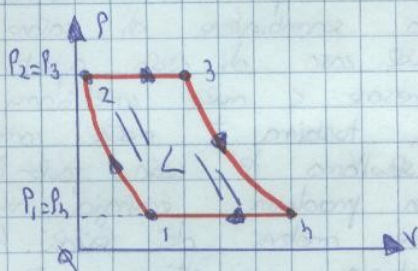


T = TURBINA
C = COMPRESSORE

Il simbolo dello scambiatore di calore è il seguente:



Questo ciclo è un ciclo simmetrico a gas ed è costituito da due trasformazioni isentropiche e da due trasformazioni isobare. Questo ciclo può essere realizzato anche come macchina generatrice. Graficamente si ha:



Essendo turbina e compressore montati sullo stesso asse (stesso motore), le variazioni che otteniamo da questa macchina è:

$$L_v = L^{T \rightarrow} - L^{C \leftarrow}$$

chiamiamo **rapporto di compressione (BACK RATIO)** la seguente espressione:

$$\frac{L^{C \leftarrow}}{L^{T \rightarrow}}$$

Tale rapporto vale $\frac{1}{n}$ in tutti i motori che funzionano con un ciclo Joule-Brayton. Qui il rapporto di compressione è:

$$R_p = \frac{P_2}{P_1}$$

mentre il rendimento è:

8h

$$\eta = 1 - F(1, R_p^{(K-1)/K}) = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{(R_p)^{K-1/K}}$$

Abbiamo già visto i concetti di efficacia o efficienza. Abbiamo visto che:

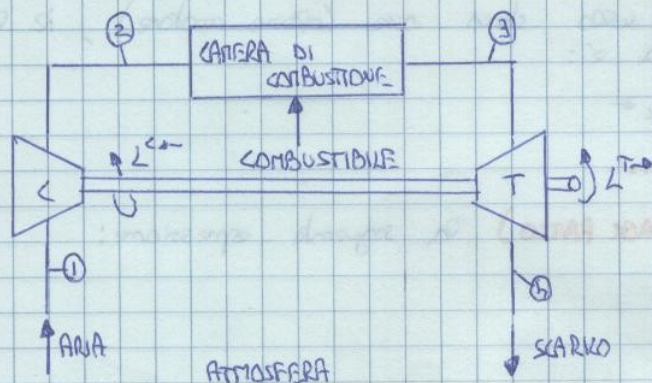
$$\varepsilon_F = \frac{Q_{FREDDO}}{L} \quad \text{per una macchina frigorifera}$$

$$\varepsilon_P = \frac{Q_{CALDO}}{L} \quad \text{per una pompa di calore}$$

cioè il rapporto tra il calore sottratto alla sorgente fredda e lavoro speso nel caso di una macchina frigorifera, oppure il rapporto tra il calore ceduto alla sorgente calda e il lavoro speso nel caso di una pompa di calore. Si definisce **efficienza isentropica** di una macchina operante la grandezza:

$$\varepsilon_s = \frac{L_{rev}}{L}$$

Questo ciclo è tipico dei motori a reazione nei quali il primo scambiatore di calore è una camera di combustione e il secondo scambiatore di calore è l'atmosfera. In questo caso il ciclo si dice **aperto**. Nel caso di ciclo aperto, l'aria proveniente dall'ambiente entra nel compressore C nelle condizioni dello stato 1 e i prodotti della combustione escono dalla turbina T nelle condizioni dello stato 4. I motori a turbo gas per esempio sfruttano il ciclo Joule-Brayton per il proprio funzionamento e quindi servono per produrre energia meccanica oppure energia elettrica. Possono essere utilizzati come motori dei veicoli. Attraverso un'elica o un altro motore che aziona la turbina, si ottiene una **turbo-elica**. Vediamo ora brevemente anche i motori a reazione:



Il combustibile in questione è il kerosene.

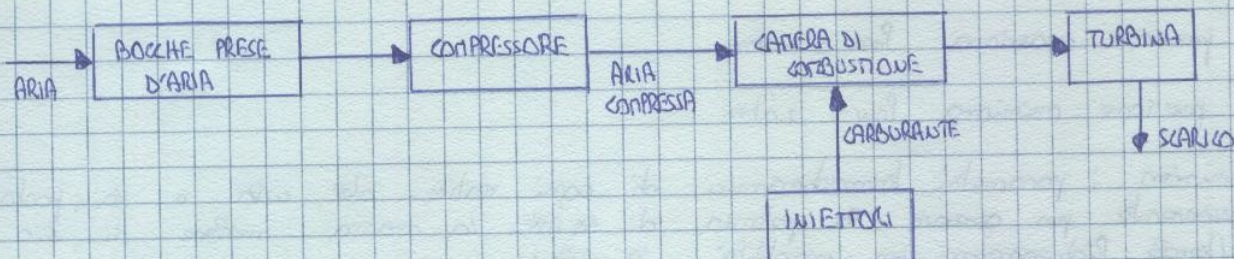
Nei motori a reazione si ha:

$$\frac{L_{CA}}{L_{TA}} = BR = 1$$

NB: $BR = \text{BACK RATIO}$.

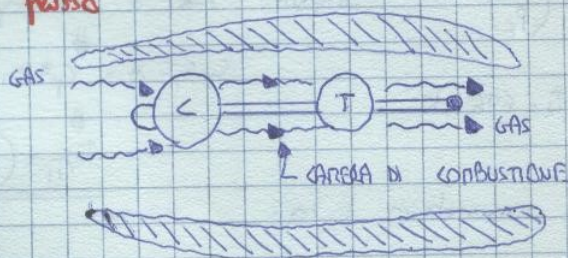
Cioè il lavoro prodotto dalla turbina se ne va tutto per far funzionare il compressore.

Un motore a reazione è sostanzialmente costituito da una turbina a gas, da una presa d'aria anteriore, dal compressore, dagli iniettori del combustibile, dalla camera di combustione, e dal condotto di scarico. In breve in un turbogelso c'è aria, aspirata dalle bocche della presa d'aria, viene "spalata" dal compressore ed immette nella camera di combustione. Schematicamente si ha:



Quindi nella camera di combustione è presente la miscela aria compressa e combustibile. Tramite un'accensione a candela inizia la fase di combustione della miscela. Essendo tale fase continua si ha un motore inalterabilmente della temperatura dei gas che si espande. Quando questi gas giungono alla turbina, produce lavoro, visto che il ciclo seguito è quello di Brayton, la macchina raggiunge rendimenti elevati se è elevata la rapporto di compressione e la temperatura del ciclo. Esistono due tipi di motori a reazione:

1) motori a singolo flusso



dove il flusso è unico.

2) motori a doppio flusso. In breve davanti al compressore viene posta una ventola in modo da dividere in due il flusso. Una parte di flusso (**flusso primario**) attraversa il motore mentre l'altra (**flusso secondario**) passa sopra e sotto questo motore. Si noti che il flusso primario ha massa minore del flusso secondario ma possiede una maggiore velocità visto che è compresso. I due flussi si mescolano nel ugelo in modo da far diminuire la temperatura dei gas di scarico, così si riduce anche il rumore. Definiamo **Bypass Ratio** la seguente espressione:

$$\text{Bypass Ratio} = \frac{\text{massa flusso secondario}}{\text{massa flusso primario}}$$

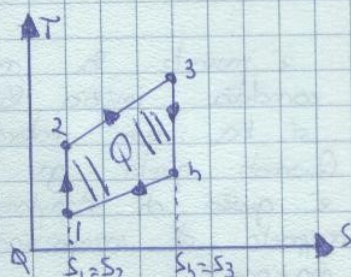
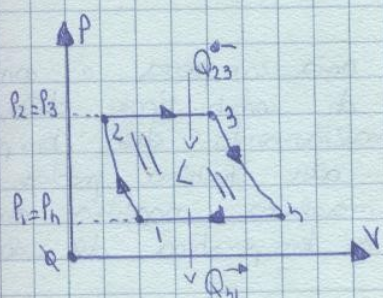
Si noti che sia la turbina sia il compressore sono di tipo assiale. Vediamo ora un esempio del ciclo di Joule-Brayton.

86

Una centrale elettrica di potenza utilizza un impianto a turbina a gas a ciclo Brayton nel quale il fluido di lavoro è aria. Sono note:

- la temperatura massima del ciclo $T_{MAX} = 1200\text{ K}$
- la temperatura minima del ciclo $T_{MIN} = 300\text{ K}$
- la pressione massima $P_{MAX} = 8\text{ atm}$
- la pressione minima $P_{MIN} = 2\text{ atm}$

Si determinino i parametri termodinamici di ogni vertice del ciclo e la portata di aria occorrente per generare la potenza di 50 MW. La massa molare di aria è pari a 29 kg/kmol . Richiediamo per comodità il ciclo:



Imponiamo: $\begin{cases} T_{MAX} = T_3 \\ T_{MIN} = T_1 \end{cases} \Rightarrow T_2 = T_1 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$

Quindi: $T_2 = 696,4\text{ K}$

$\begin{cases} P_{MAX} = P_2 = P_3 \\ P_{MIN} = P_1 = P_4 \end{cases}$

Imposti: 1-2 è isentropica

$$S_2 - S_1 = Q = C_p^* m \frac{T_2}{T_1} - R^* m \ln \frac{P_2}{P_1}$$

$$\Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

Si come il ciclo di Brayton è simmetrico si ha:

$$T_3 = T_1 \cdot \frac{T_3}{T_2} = 696,4\text{ K}$$

Quindi il rendimento è:

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 0,426$$

Da esso si può ottenere il lavoro scambiato per unità di massa del fluido di lavoro:

$$L = m q_{23} = m c_p (T_3 - T_2) = 1,15 \cdot 10^6\text{ J/kg}$$

Quindi concludendo si ha:

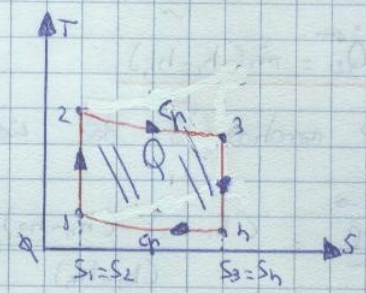
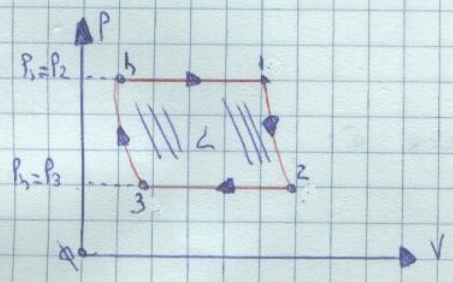
$$P = L \cdot G \quad \text{dove} \quad G = \frac{P}{L} = \frac{50 \cdot 10^6}{1,15 \cdot 10^6} = 43,48\text{ kg/s.}$$

G è la portata di aria occorrente.

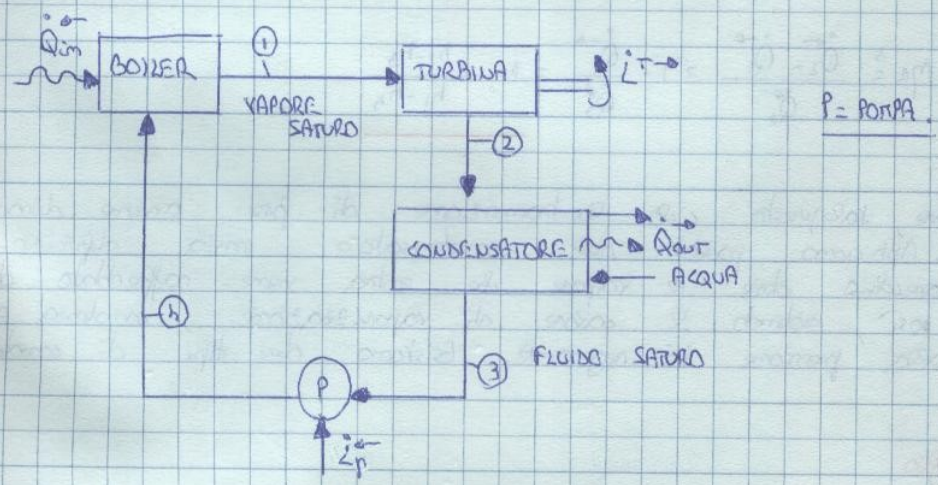
Parliamo ora dei cicli a vapore, in cui il fluido operante è vapore. Le macchine funzionanti con questi cicli operano attraverso un cambiamento di fase del fluido di lavoro. Noi vedremo due cicli di questo tipo:

- 1) ciclo Rankine
- 2) ciclo frigorifero a vapore

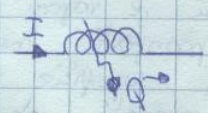
Iniziamo a parlare del ciclo Rankine. Questo ciclo, nella sua formulazione ideale, è costituito da un'espansione isentropica attraverso una turbina per portare il vapore saturo alla pressione di ingresso del condensatore. A sua volta il condensatore preleva del calore dal fluido fino a farlo condensare a liquido saturo. Poi diciamo che il liquido saturo viene compresso da un processo isentropico. Questa trasformazione viene fatta da una pompa ideale. Il tutto viene poi fatto passare attraverso un boiler per portarlo, a pressione costante, allo stato di vapore saturo. Quindi graficamente si ha:



Quindi schematicamente abbiamo:



Il boiler viene utilizzato per riscaldare il fluido (tipicamente acqua). Esso è composto sostanzialmente da una bobina di filo conduttore, che per effetto joule, dissipa calore se percorso da corrente.



Quindi l'acqua compressa a una temperatura inferiore a quella del punto critico viene fatta riscaldare a pressione costante nel boiler (caldiera), dove evapora producendo vapore surriscaldato. Questo viene fatto espandere adiabaticamente fino a una temperatura convenientemente oltre il punto di saturazione, per poi venire condensato in un condensatore. A questo punto, il liquido ancora saturo viene portato alla pressione del boiler.

Supponiamo che la turbina sia reversibile e operi stazionariamente. Abbiamo che: (28)

$$\dot{Q}_T = \dot{m}(h_1 - h_2)$$

In quanto riguarda il condensatore si ha:

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m}(h_2 - h_3)$$

mentre il lavoro sulla pompa è dato da:

$$\dot{Q}_P = \dot{m}(h_4 - h_3)$$

Infine, il calore scambiato dal boiler è:

$$\dot{Q}_2 = \dot{m}(h_1 - h_4)$$

Quindi in conclusione il rendimento del ciclo Rankine è:

$$\eta_R = \frac{\dot{Q}_T - \dot{Q}_P}{\dot{Q}_2} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{(h_1 - h_4)}$$

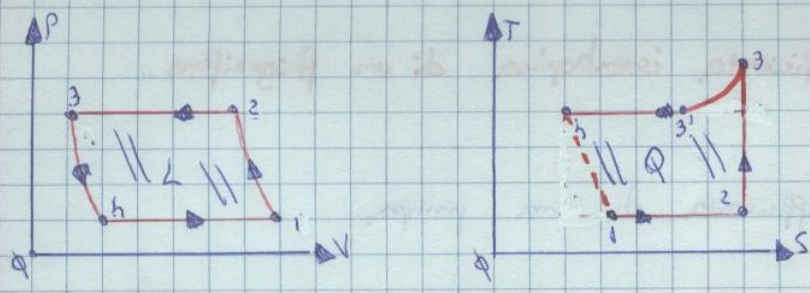
Possiamo anche scrivere:

$$\eta_R = \frac{\dot{Q}_2 - \dot{Q}_1}{\dot{Q}_2} = 1 - \frac{\dot{Q}_1}{\dot{Q}_2} = 1 - \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_4}$$

Come si può facilmente notare, in questo ciclo la trasformazione di fase avviene durante le due trasformazioni isobore. Abbiamo parlato del condensatore senza definirlo. Un condensatore, è un apparecchio dove il vapore che entra viene raffreddato da un refrigerante (acqua) e così, cedendo il calore di vaporizzazione, condensa alla temperatura corrispondente alla pressione in regime. Esistono due tipi di condensatori:

- 1) condensatori a miscuglio
- 2) condensatori a superficie

I condensatori a miscuglio sono quelli in cui il vapore e l'acqua refrigerante vengono a diretto contatto e quindi vengono pompati insieme da una pompa che li porta fuori dall'apparecchio. I condensatori a superficie invece sono quelli in cui l'acqua refrigerante e il fluido sono separati da una parete metallica, attraverso la quale si ha la trasmissione di calore. Dello ciò, analizziamo ora i cicli frigoriferi. Questi cicli altro non sono che dei cicli a vapore in cui però il fluido non è l'acqua bensì è un gas che va sotto il nome di **freon**. Puntualmente il freon è un gas che danneggia l'ozono. In questo capitolo noi utilizzeremo il R22. Vediamo come viene rappresentato sul piano (P,v) il ciclo:

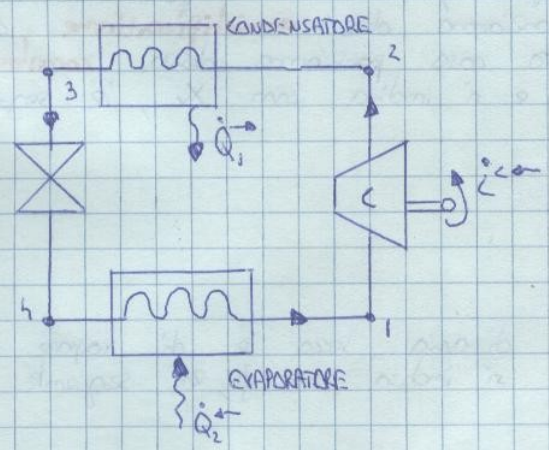


Si ricordi che una **macchina frigorifera** è una macchina termica operante nella quale il fluido operante percorre un ciclo termico in senso antiorario. In queste condizioni dunque il fluido assorbe il calore da una sorgente a bassa temperatura (refrigerante) e lo cede ad una sorgente ad alta temperatura (condensatore). Abbiamo una piccola parentesi sulle macchine operatrici: per queste macchine si definisce **efficienza** la seguente espressione:

$$\varepsilon = \frac{T_F}{T_C - T_F} \quad (\text{per una macchina frigorifera}).$$

$$\varepsilon = \frac{T_C}{T_C - T_F} \quad (\text{per una pompa di calore}).$$

Questo coefficiente è un indice della capacità del processo di convertire l'energia al fine di soddisfare gli obiettivi a fronte di una sola spesa energetica. Torniamo ora al ciclo frigorifero. Ci troviamo nella stato 1. Il sistema subisce un'espansione a pressione costante ($h \rightarrow 1$) e assorbe del refrigerante la quantità di calore Q_1 . Secondo la trasformazione ($1 \rightarrow 2$) il vapore viene compresso adiabaticamente fino alla pressione $P_2 > P_1$. Giunti nello stato 2, il vapore viene compresso isobaricamente e viene ceduto il calore Q_2 alla sorgente calda. Nello stato 3 il vapore subisce un'espansione adiabatica che lo riporta nelle condizioni iniziali. Quindi schematicamente si ha:



L'**evaporatore** svolge la funzione inversa del condensatore e cioè permette il passaggio della fase solida a quella gassosa.

Quindi il processo $1 \rightarrow 2$ viene svolto da un compressore, il processo $2 \rightarrow 3$ da un condensatore, il processo $3 \rightarrow h$ da un evaporatore. Quindi ricapitolando tutte le macchine termiche a ciclo inverso sono macchine frigorifere in quanto trasportano calore da un serbatoio a temperatura inferiore verso un serbatoio a temperatura superiore. Quando le macchine frigorifere vengono utilizzate per fornire calore ad un serbatoio maggiore preferendo da una a temperatura minore, esse vengono chiamate **pompe di calore**. Ricapitolando, per queste macchine si hanno i seguenti coefficienti:

$$\varepsilon_p = \frac{Q_p}{Q_c + Q_p} \quad \begin{cases} Q_p = \text{calore assorbito} \\ Q_c = \text{calore ceduto} \end{cases}$$