

## INTRODUZIONE

Lo scopo di questo capitolo è introdurre il lettore nei concetti che stanno alla base del mondo delle centrali termoelettriche. Verranno introdotti i concetti di base per comprendere il funzionamento di una centrale termoelettrica e verranno mostrate le tipologie più comuni di tali centrali.

### 3.1 BREVI CONCETTI DI FISICA

Il concetto fondamentale che sta dietro alla tecnologia legata alla produzione di energia elettrica in una centrale termoelettrica è il concetto di trasformazione dell'acqua in vapore. Quindi, per prima cosa, è necessario introdurre al lettore, alcuni concetti di base legati ai gas ed alla produzione di vapore. In Fisica, viene definito **fluido**, un liquido o un gas. E' risaputo, sempre dalla fisica di base, che in natura esistono vari tipi di corpi che grossolanamente possono essere classificati in:

1. **Corpi solidi**
2. **Corpi liquidi**
3. **Corpi gassosi**

Un corpo solido è un corpo che ha un proprio volume. Le molecole all'interno del corpo solido sono molto unite tra loro, ossia la distanza che le separa è minima. Si presti immediatamente attenzione alla seguente affermazione: un corpo solido può non essere un corpo rigido. Infatti, nella realtà, un corpo solido può anche deformarsi, cosa che un corpo rigido non può fare. Un esempio di corpo solido è un cubetto di ghiaccio, una sbarra di alluminio o di rame. Un corpo liquido invece è un corpo le cui molecole sono tra loro più distanti, e non ha un proprio volume, ma assume il volume del recipiente che lo contiene. Per esempio, l'acqua che comunemente beviamo è un liquido. Un gas invece non ha un volume proprio perché può comprimersi ed espandersi a piacere. Le molecole che compongono il gas sono ancora più distanti tra loro rispetto al caso del liquido. Pertanto, gli stati di aggregazione della materia sono tre.

E' possibile passare da uno stato di aggregazione all'altro tramite determinate trasformazioni che verranno descritte più avanti. In questo paragrafo ci concentreremo sui corpi gassosi e ne analizzeremo alcune fondamentali proprietà.

I fluidi sono in grado di cambiare la propria forma e di assumere la forma del recipiente che li contiene. Chiaramente i fluidi hanno dei "parametri" che in qualche modo li caratterizzano. Per esempio, possiamo caratterizzare un fluido in base alla sua densità. La densità per definizione è:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (3.1)$$

La **densità** di un fluido è quella grandezza che misura in qualche modo la quantità di massa contenuto nell'unità di volume e solitamente viene indicata con il simbolo  $\rho$ . La sua unità di misura è:  $\frac{Kg}{m^3}$ . Il valore della densità dipende sia dalle condizioni esterne della temperatura sia dalle condizioni della pressione. Per esempio, se si riscalda un fluido esso si espande e quindi naturalmente la sua densità diminuisce.

La pressione è un'altra grandezza che caratterizza un fluido (e quindi anche un gas). In fisica la si definisce come una grandezza scalare definita dal rapporto tra la forza agente su una superficie e l'area della superficie stessa.

$$P = \frac{F}{A}$$

L'unità di misura della pressione è chiaramente  $\frac{N}{m^2}$ . La pressione agisce sempre ortogonalmente alla superficie. In equilibrio statico, quando il fluido è in quiete, non ci sono spostamenti e pertanto anche se ci sono delle forze il loro lavoro è nullo. Si consideri ora la seguente situazione fisica che rappresenta in qualche modo un esempio classico. Si supponga di possedere un cilindro al cui interno vi è un fluido. Un **cilindro**, sostanzialmente, è l'organo all'interno del quale scorre il **pistone** il quale, con il suo movimento rettilineo ed alternato, determina le varie fasi di funzionamento di un motore.

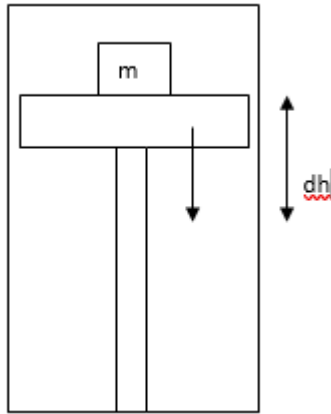


Figura 3.1: Cilindro-Pistone

La pressione atmosferica viene originata dalla forza gravitazionale. Esiste una particolare relazione tra pressione e profondità ed è data dalla **legge di Stevino**. Tale legge afferma che: la pressione cresce linearmente con la profondità. In sostanza più si scende in profondità più la pressione che viene esercitata sulle pareti del recipiente aumenta (un aumento proporzionale). Pertanto, tale legge è lineare. Formalmente la legge di Stevino si scrive così:

$$p_h = p_{atm} + \rho gh \quad (3.2)$$

Si analizzi nel dettaglio questa importantissima relazione. Con il termine  $p_{atm}$  si indica la **pressione atmosferica** ossia la pressione che si ha sul pelo libero dell'acqua (la pressione a cui solitamente siamo soggetti quotidianamente). Tale pressione vale:

$$p_{atm} = 1,013 \text{ bar}$$

Il **bar** è un'altra unità di misura della pressione. La pressione alla profondità 'h' è data dalla pressione sul pelo libero dell'acqua sommata con il prodotto della densità dell'acqua dell'accelerazione gravitazionale e della stessa profondità. Viene mostrato come giungere alla relazione 3.2. Un oggetto a profondità 'h' ha chiaramente una sua massa ed è soggetta ad una forza peso. Siccome la pressione è data dal rapporto tra la forza e l'area della superficie si ha:

$$p = \frac{F}{A} = \frac{mg}{A} = \frac{\rho Vg}{A} = \rho gh$$

Quindi la pressione alla profondità 'h' vale:  $\rho gh$ . In realtà bisogna poi sommarli la pressione atmosferica. Così si ottiene la legge di Stevino. Tale legge è di facile verifica. Basta immergersi ad una certa profondità per accorgersi degli effetti della pressione (dolore alle orecchie,..).

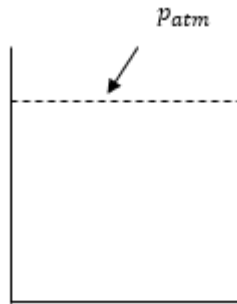


Figura 3.2: Pressione atmosferica

La legge è lineare e pertanto il grafico sarà una semplicissima retta, del seguente tipo:

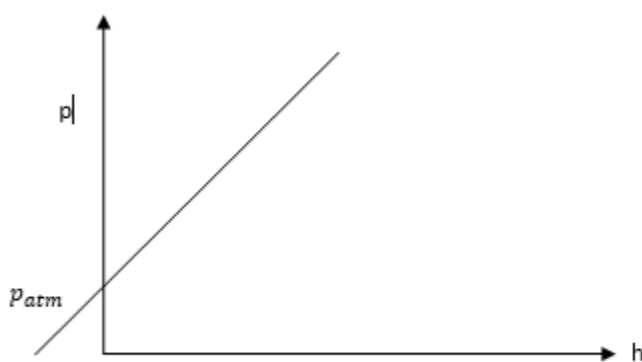


Figura 3.3: Equazione di una retta

l'equazione generale della retta è:  $y = mx + q$  dove  $m$  rappresenta la pendenza della retta e 'q' l'intersezione della stessa con l'asse delle  $y$ .

Nel nostro semplicissimo caso l'asse delle  $y$  è rappresentato dalle pressioni, l'asse delle  $x$  dalla profondità ed infine la pendenza della retta dal prodotto della densità dell'acqua per l'accelerazione gravitazionale 'g'. La legge di Stevino è valida **soltanto per i fluidi a densità costante**. L'acqua è un fluido a densità costante:

$$\rho_{acqua} = 10^3 \frac{Kg}{m^3} \quad (3.3)$$

Pertanto, vale la legge di Stevino. La pressione atmosferica invece diminuisce con l'altezza anche se tale decrescita non è lineare con l'altezza per via del fatto che la densità dell'aria non è costante. Giunti a questo punto, è importante introdurre altri due concetti di fisica fondamentali: il **principio dei vasi comunicanti** ed il **principio di Pascal**. Il primo principio afferma che, dati due serbatoi pieni di fluido ma aventi differenti livelli, se vengono collegati tra loro mediante una tubatura, raggiungono un equilibrio tra loro, ossia i livelli di fluido nei due serbatoi sono uguali.

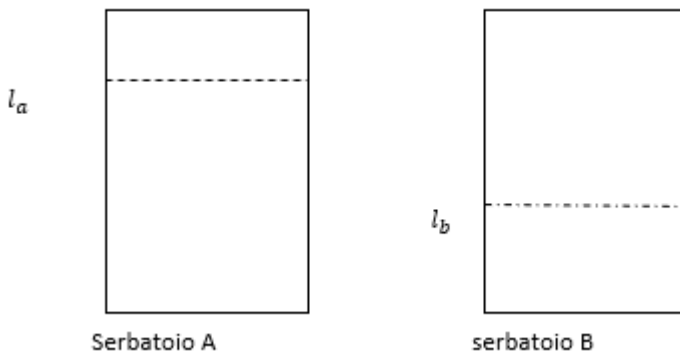


Figura 3.4: Due serbatoi isolati

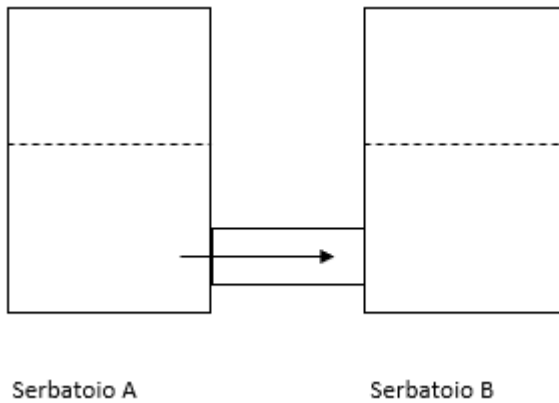


Figura 3.5: Serbatoi comunicanti

Chiaramente nella condizione di equilibrio si ha:

$$l_a = l_b$$

Dove con  $l_a$  si intende il livello di fluido presente nel serbatoio A mentre con  $l_b$  si intende il livello di fluido presente nel serbatoio B. Il fluido scorre sempre dal serbatoio con livello di fluido maggiore verso il serbatoio avente minor fluido. Il secondo principio da enunciare invece è il principio di Pascal il quale afferma che se consideriamo una massa di fluido, in un punto qualunque di questa massa (**alla stessa profondità**) di fluido la pressione è uguale in tutte le direzioni.

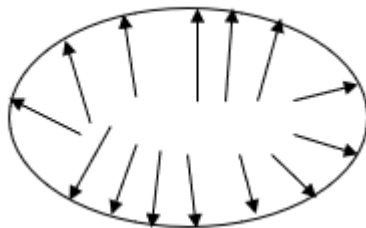


Figura 3.6: Principio di Pascal

Si introduce ora un altro importante principio dell'idrostatica. Il **principio di Archimede**. Il principio di Archimede afferma che un corpo immerso in un fluido è soggetto ad una forza diretta verso l'alto pari in modulo al peso del fluido spostato ed applicata nel centro di massa di quest'ultimo. Si consideri un corpo di massa  $m$  e che occupa un volume  $V$  immerso in un liquido (acqua).

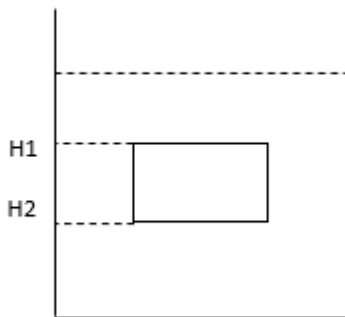


Figura 3.7: Principio di Archimede

Se la superficie superiore del corpo si trova ad una profondità che si indica con  $h_1$  allora su di essa agirà la pressione:

$$p_{h1} = p_{atm} + \rho g h_1$$

Analogamente sulla superficie inferiore che si trova ad una profondità che indichiamo con  $h_2$  agirà la pressione:

$$p_{h2} = p_{atm} + \rho g h_2$$

Allora la differenza di pressione sarà uguale a:

$$p_2 - p_1 = \rho g (h_2 - h_1)$$

Siccome  $h_2$  è maggiore di  $h_1$  ne segue che la pressione  $p_2$  risulta essere maggiore della pressione  $p_1$  e pertanto la differenza precedente risulta essere maggiore di zero.

$$p_2 - p_1 > 0$$

Per il principio di Pascal, tutte le forze orizzontali si annullano e quindi ne segue che:

$$p_2 - p_1 = \frac{F_2}{A_2} - \frac{F_1}{A_1} > 0$$

Quindi:

$$\frac{F_2}{A_2} - \frac{F_1}{A_1} = \rho g(h_2 - h_1) > 0 \rightarrow \text{se } A_1 = A_2 \rightarrow \rho g(h_2 - h_1)A = F_2 - F_1$$

Pertanto, se si indica con  $F_t$  la differenza delle precedenti forze si ottiene:

$$F_t = \rho gV = mV$$

In sostanza, se si immerge un determinato corpo solido in un liquido, il livello di tale liquido si alza e questo significa ovviamente che una certa quantità di liquido viene per forza di cose spostata verso l'alto. Maggiore è il volume del corpo solido inserito nel fluido e maggiore è la quantità di liquido spostata. Un corpo solido immerso in un fluido riceve una spinta verso l'alto uguale in modulo al peso di liquido che sposta. Il peso di liquido spostato è dato dalla seguente relazione:

$$\text{peso liquido} = m_l g$$

Dove con  $m_l$  si indica la massa del liquido e 'g' è chiaramente l'accelerazione gravitazionale. Si può riscrivere la precedente formula anche nel seguente modo:

$$\text{peso liquido} = m_l g = \rho_l V_l g$$



Siccome il volume di liquido spostato è uguale al volume del corpo solido si può anche riscrivere la precedente relazione nella seguente maniera:

$$peso\ liquido = m_l g = \rho_l V_s g$$

Dove  $V_l$  è il volume del liquido mentre  $V_s$  è il volume del solido. Pertanto, la spinta di Archimede è data da:

$$spinta\ S = m_l g = \rho_l V_s g$$

Quindi quando un corpo è immerso in un fluido esso subisce due forze. Una forza peso diretta verso il basso ed una spinta di Archimede diretta verso l'alto. Siccome:

$$peso\ corpo = m_s g = \rho_s V_s g$$

$$Spinta\ S = m_l g = \rho_l V_s g$$

Ne segue che se il peso è maggiore della spinta di Archimede allora il corpo scende verso il basso ed affonda. Questo equivale a dire che:

$$\rho_s V_s g > \rho_l V_s g \rightarrow \rho_s > \rho_l \quad (3.4)$$

Pertanto, se la densità del corpo solido è maggiore della densità del corpo liquido allora il corpo sprofonda. Viceversa, se la densità del corpo è minore della densità del liquido il corpo emerge. Quando il corpo è parzialmente fuori dal liquido, il volume della parte immersa diminuisce e quindi diminuisce la spinta di Archimede. Il corpo continua a emergere finché si raggiunge l'equilibrio, cioè finché la spinta diventa uguale al peso. Pertanto, si ha la seguente condizione:

$$\rho_s = \rho_l$$

Analogo discorso vale in generale se un corpo viene immerso in un gas.

Si definisce ora il concetto fondamentale di **portata**. Innanzitutto, la portata è una grandezza scalare che solitamente si indica con la lettera  $Q$ . Si analizzi il caso di un tubo in cui scorre del fluido, per esempio acqua:



Figura 3.8: Tubo in cui scorre acqua

Il tubo ha una sezione di area  $A$  ( $m^2$ ) ed una lunghezza  $L$  (m). la portata mi rappresenta la quantità di fluido (in questo caso di acqua) che attraversa una determinata sezione di area  $A$  nell'unità di tempo  $t$ . Formalmente la portata si definisce nel seguente modo:

$$Q = \frac{A \cdot L}{t} = \frac{V}{t} \quad (3.5)$$

Dove  $V$  è il volume di fluido. L'unità di misura della portata è:  $\frac{m^3}{s}$ .

Ovviamente, è possibile esprimere la portata in svariati modi, esplicitando la dipendenza dalla velocità o dalla densità. Per esempio:

$$Q = A \frac{v}{t} \quad (3.6)$$

Dove viene esplicitata la dipendenza dalla velocità. 'A' è sempre l'area della sezione del condotto (tubo). Siccome:

$$\rho = \frac{m}{V} \rightarrow V = \frac{m}{\rho} \rightarrow Q = \frac{m}{\rho t} \quad (3.7)$$

Con quest'ultima relazione è stata esplicitata anche la dipendenza della portata dalla densità.

### 3.2 BREVI CONCETTI SUI GAS

Il **gas perfetto** o **ideale** costituisce un modello astratto del comportamento dei gas cui tendono molti gas reali a pressioni prossime a quella atmosferica. Per questo motivo, per semplicità di trattazione, verrà studiata la seguente equazione detta **equazione fondamentale dei gas ideali**:

$$PV = nRT \quad (3.8)$$

Dove:

P=pressione

V=volume

N= numero di moli

R= costante

T=Temperatura

Da questa legge si ricavano altre leggi fondamentali, come, per esempio, la **legge di Boyle** la quale afferma che a temperatura costante, il volume di una massa di gas è inversamente proporzionale alla sua pressione. Infatti, si ipotizzi di dover gestire una **trasformazione isoterma** ossia una trasformazione che permetta di far transitare un generico sistema da uno stato A ad uno stato B mantenendo costante la temperatura. Quindi:

$$T_A = T_B$$

Pertanto, si ha:

$$P_A V_A / nR = P_B V_B / nR \rightarrow P_A V_A = P_B V_B$$

La legge di **Gay-Lussac** afferma invece che mantenendo la pressione costante (**trasformazione isobara**) aumentando la temperatura aumenta il volume. Infatti:

$$V_f = V_i(1 + \alpha T) \quad (3.9)$$

Dove, con il termine  $\alpha$  ci si riferisce ad una costante caratteristica dei gas. Una **seconda legge di Gay-Lussac** invece afferma che in **una trasformazione isocora** ossia in una trasformazione a volume costante un aumento di temperatura corrisponde ad un aumento di pressione. Quindi:

$$P_f = P_i(1 + \alpha T) \quad (3.10)$$

### 3.3 LE CENTRALI TERMOELETTRICHE

Le centrali termoelettriche sono centrali che producono energia elettrica sfruttando il vapore generato dall'acqua. Per questo motivo sono solitamente installate vicino a corsi d'acqua. La trasformazione dell'acqua in vapore avviene a pressione e temperature costanti.



Figura 3.9: Trasformazioni dell'energia in una centrale termoelettrica

Le centrali termoelettriche possiedono una serie di sistemi atti a convertire l'energia. L'energia utilizzata per far partire il ciclo è l'energia chimica derivante dalla combustione di determinati combustibili. I componenti di base di una centrale termoelettrica sono:

- **CALDAIA**, componente fondamentale all'interno del quale avviene la reazione di combustione. All'interno della caldaia circola dell'acqua fredda.
- **SCAMBIATORE DI CALORE**, ossia una macchina termica in grado di trasferire calore.

- **CONDENSATORE**

La seguente figura mostra uno schematico di un impianto presente in una centrale termoelettrica.

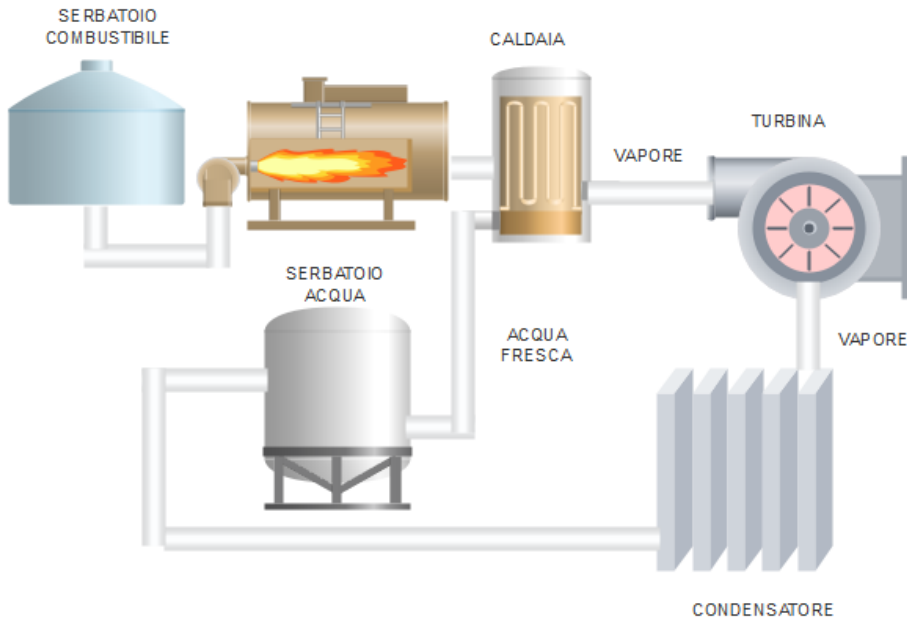


Figura 3.10: Ciclo centrale termoelettrica

L'acqua nella caldaia viene riscaldata a circa 300°C trasformandosi in vapore. Successivamente ulteriormente riscaldata grazie ad uno scambiatore di calore per acquisire ulteriore pressione. Il vapore surriscaldato viene convogliato verso una turbina, la quale girando trasferisce energia di moto/meccanica all'alternatore il quale, a sua volta ruotando genera energia elettrica.

Il vapore che esce dalla turbina viene riportato allo stato liquido nel **condensatore** e "ripompato" nella caldaia.

Solitamente, con il termine SCAMBIATORE DI CALORE ci si riferisce ad una particolare apparecchiatura nella quale il calore viene trasferito da un fluido “caldo” verso un fluido “freddo”.

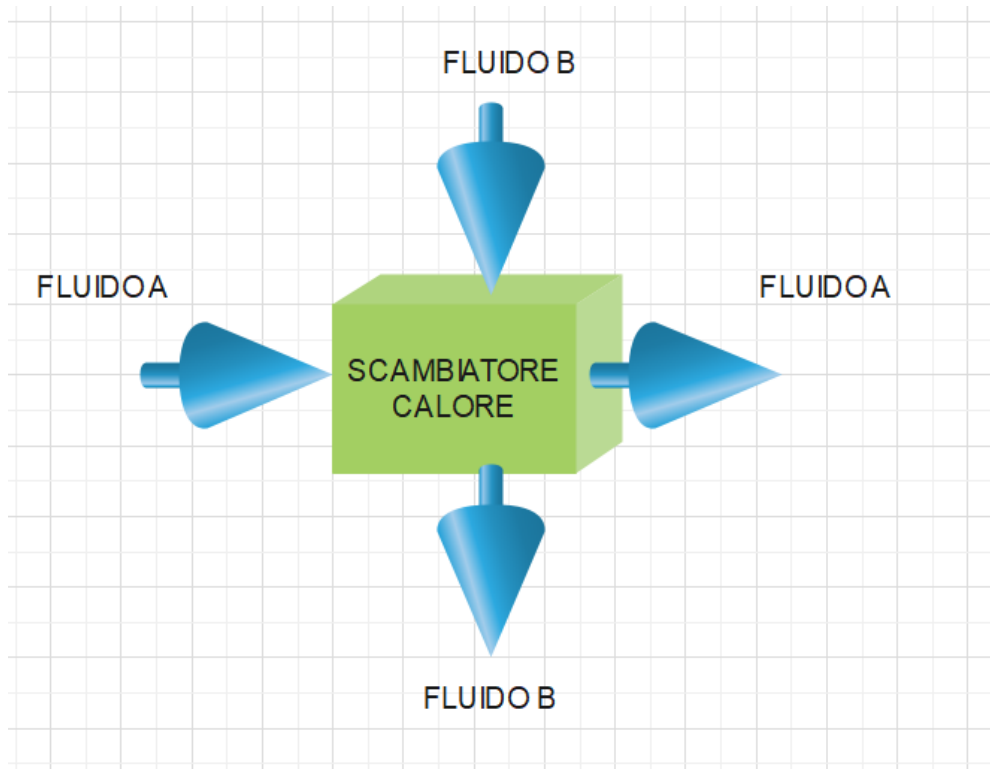


Figura 3.11: Scambiatore di calore

Il fluido A viene anche detto **fluido prodotto** (è il fluido che deve essere scaldato o raffreddato) mentre il fluido B viene detto **fluido di servizio**. La maggior parte degli scambiatori di calore industriali sono detti “**a superficie**” in quanto i due fluidi sono separati da una superficie metallica diatermica e quindi il trasferimento di calore avviene per contatto termico (**conduzione**). Una parete può essere **adiabatica**, se non permette scambio di calore tra due corpi in contatto con tale superficie oppure può essere **diatermica** se permette tale passaggio di calore.

La seguente figura mostra la distinzione tra parete adiabatica e parete diatermica.

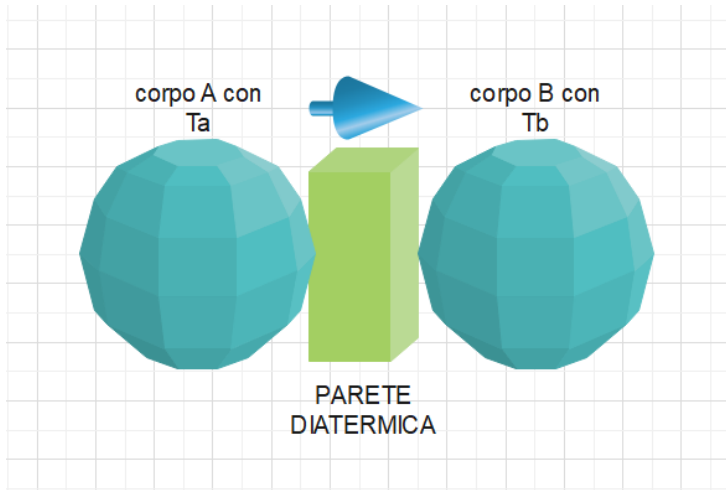


Figura 3.12: Parete diatermica

Nella parete diatermica mostrata in figura 3.12 il calore circola per contatto termico dal corpo più caldo con temperatura  $T_a$  verso il corpo più freddo con temperatura  $T_b$  ( $T_a > T_b$ ). Questo scambio termico prosegue fino al raggiungimento dell'equilibrio termico ( $T_a = T_b$ ). In una parete adiabatica invece tale passaggio di calore non avviene e quindi non si raggiungerà mai l'equilibrio termico.

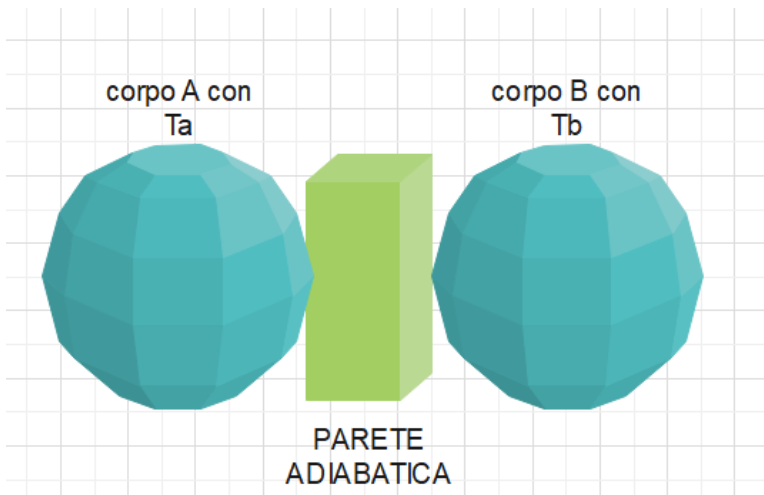


Figura 3.13: Parete adiabatica

E' bene ricordare che, l'adiabaticità in natura non esiste. C'è sempre un minimo scambio di calore. La figura seguente mostra un esempio di scambiatore di calore.



Figura 3.14: Scambiatore di calore

La figura riportata qui sotto mostra la **centrale termoelettrica di Cassano d'Adda**, proprietà dei A2A e costruita nel 1961 con un gruppo vapore da 75MW. Nel 1984 è stato aggiunto il secondo gruppo a vapore da 320 MW. Il camino da dove uscivano i fumi è incredibilmente alto (207 metri). La potenza installata dell'impianto ha raggiunto il ragguardevole numero di 1000MW ottenuti combinando tre turbogas con due turbine a vapore.

Nel paragrafo successivo verrà descritta la tecnologia del turbogas e del ciclo combinato.





Figura 3.15: Centrale termoelettrica di Cassano d'Adda

La seguente figura invece mostra dal basso la ciminiera della centrale termoelettrica di Cassano d'Adda. La tecnologia detta a ciclo combinato è una particolare tecnologia che permette di produrre energia elettrica da combustibili in forma gassosa. Tale tecnologia si basa sull'utilizzo di più turbine combinate tra di loro. Tali turbine a gas vengono anche dette **turbogas**.

I cicli combinati nascono allora dall'idea di recuperare il calore contenuto nei fumi scaricati dalle turbine a gas per convertirlo, attraverso un opportuno ciclo termodinamico, in ulteriore potenza elettrica. Il ciclo combinato accoppia una turbina a gas ad un ciclo a vapore d'acqua. Nel paragrafo successivo verrà illustrato nel dettaglio il procedimento.



Figura 3.16: La ciminiera

### **3.4 IL CICLO COMBINATO**

Una centrale a ciclo combinato possiede un rendimento termico maggiore rispetto ad una tradizionale centrale termoelettrica. In questa tipologia di centrale il gas usato per generare energia viene combusto in una turbina a gas collegata con un alternatore. I gas che fuoriescono dalla turbina a gas sono molto caldi e vengono, di fatto, utilizzati per riscaldare dell'acqua per farla diventare vapore. Tale vapore viene convogliato in una turbina a vapore per generare ulteriore energia elettrica.

Pertanto, un ciclo combinato è composto da due fluidi operativi che compiono due cicli termodinamici con l'obiettivo di aumentare l'efficienza di una centrale termoelettrica. I due fluidi in questione sono:

- Il gas
- L'acqua

Anche in quest'ottica verranno analizzati i vantaggi e gli svantaggi di un ciclo combinato. Si analizzano prima i vantaggi.

#### VANTAGGI:

- Riduzione del consumo di combustibile fossile, perché il riscaldamento, nel ciclo a gas, viene effettuato con gas naturale. L'evaporazione invece avviene per mezzo del recupero del calore disponibile nei gas di scarico.
- Un maggior rendimento rispetto ad un centrale termoelettrica tradizionale. E' bene ricordare che la potenza prodotta dalla turbina a vapore va a sommarsi a quella prodotta dal Turbogas e pertanto il ciclo combinato gas/vapore presenterà prestazioni migliori rispetto al ciclo termodinamico tradizionale (Joule-Brayton).

#### SVANTAGGI:

- Una centrale a turbogas ha un basso rendimento (presa singolarmente) che è circa il 30%. Con il ciclo combinato il rendimento sale al 56%.

Nel paragrafo successivo verranno trattati nel dettaglio i cicli termodinamici.

### 3.5 I CICLI TERMODINAMICI

Per **ciclo termodinamico** si intende una trasformazione che permette ad un sistema di partire da uno stato iniziale, attraversare tutta una serie di stati intermedi per giungere ad uno stato finale che è uguale allo stato iniziale di partenza. Quindi:

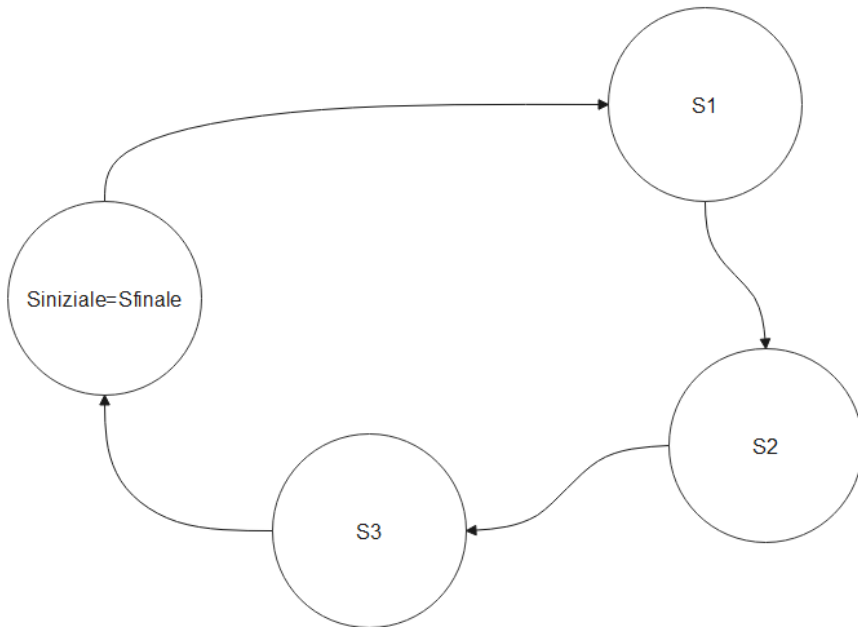


Figura 3.18: Ciclo termodinamico

Esistono svariati cicli termodinamici come, per esempio, il **ciclo frigorifero** mostrato nella seguente figura. Un ciclo frigorifero è un ciclo termodinamico inverso in quanto viene percorso nel senso opposto rispetto ai cicli termodinamici tradizionali (e quindi il lavoro  $<0$ ). Per esempio, un ciclo termodinamico tradizionale è il ciclo che consente di generare lavoro ( $L>0$ ) e che viene percorso in senso orario.

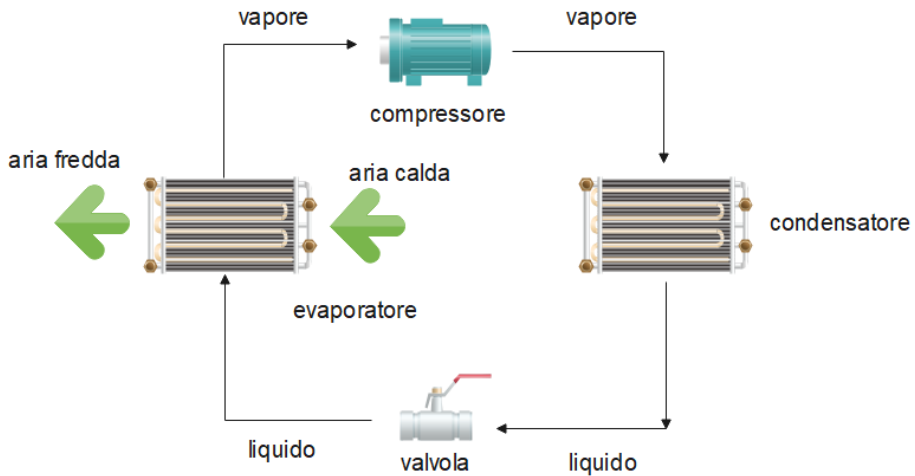


Figura 3.19: Ciclo frigorifero

In fisica solitamente si indica con  $L$  il **lavoro** e con  $Q$  il **calore**. Brevemente:

- $Q > 0$  -> il sistema genera calore e lo trasferisce all'ambiente esterno
- $Q < 0$  -> il sistema assorbe calore dall'esterno
- $L > 0$  -> Il sistema produce lavoro (espansione)
- $L < 0$  -> Il sistema subisce lavoro dall'ambiente (compressione)

Si supponga di avere a disposizione la seguente situazione:

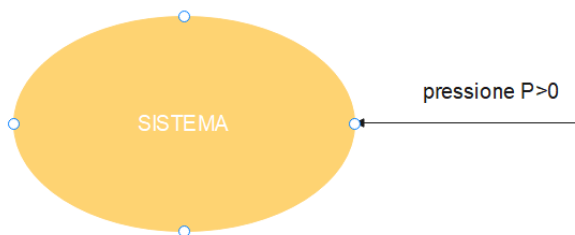


Figura 3.20: Pressione agente sul sistema

Una pressione di questo tipo comporta una riduzione del volume del sistema ed in questo caso si parla **compressione** del medesimo. Viceversa, se la pressione è diretta verso l'ambiente esterno si parla di **espansione** e qui il volume del sistema tende ad aumentare.

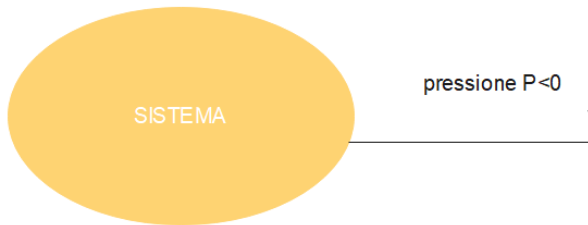


Figura 3.21: Pressione negativa diretta verso l'esterno

Si osservi il seguente grafico. In questo grafico viene mostrata una espansione del volume del sistema che transita dallo stato termodinamico '1' allo stato termodinamico '2' in seguito ad un abbassamento della pressione. Il sistema in questo caso produce un lavoro pari al prodotto della pressione per la variazione di volume. Quindi:

$$L = P(V_2 - V_1) \quad (3.11)$$

Questo significa che il sistema ha generato un lavoro per potersi espandere. La figura 3.22 mostra un tipico grafico sul piano P-V (Pressione-Volume) in cui si vede chiaramente che al diminuire della pressione aumenta il volume. Si definisce isocora una trasformazione che il sistema subisce e che avviene a volume costante, come viene mostrato nel grafico 3.32.

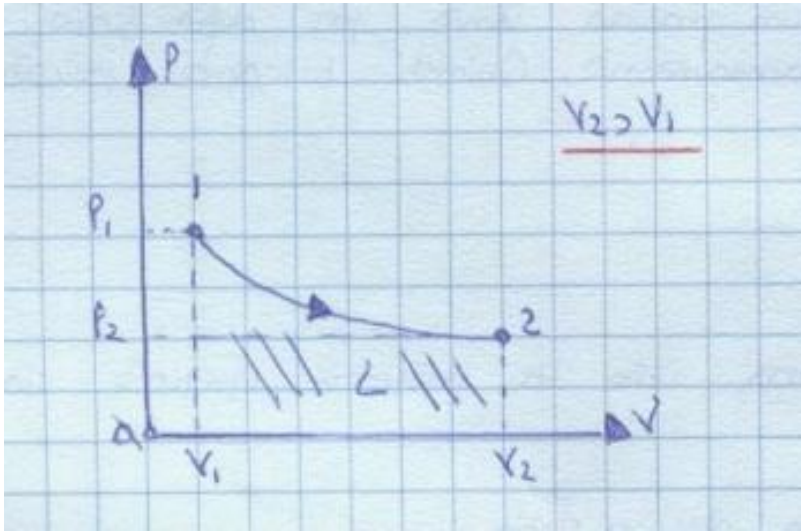


Figura 3.22: Trasformazione piano P-V

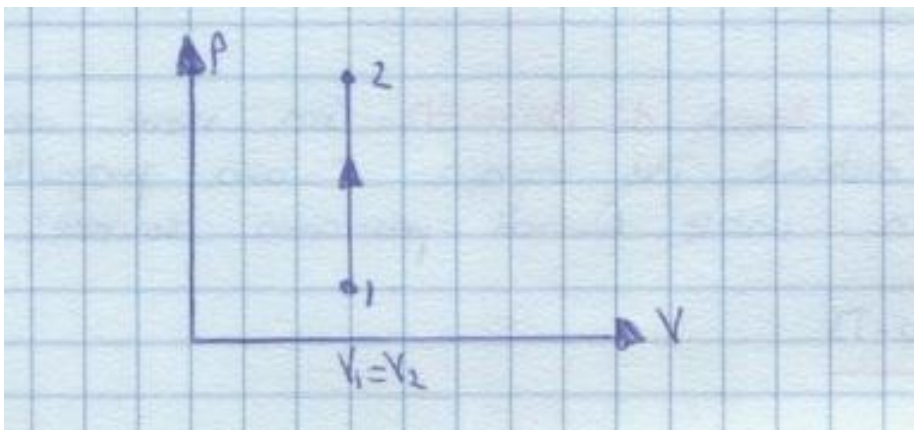


Figura 3.23: Trasformazione isocora

Di seguito viene descritto brevemente un classico ciclo termodinamico: il **ciclo di Carnot**.

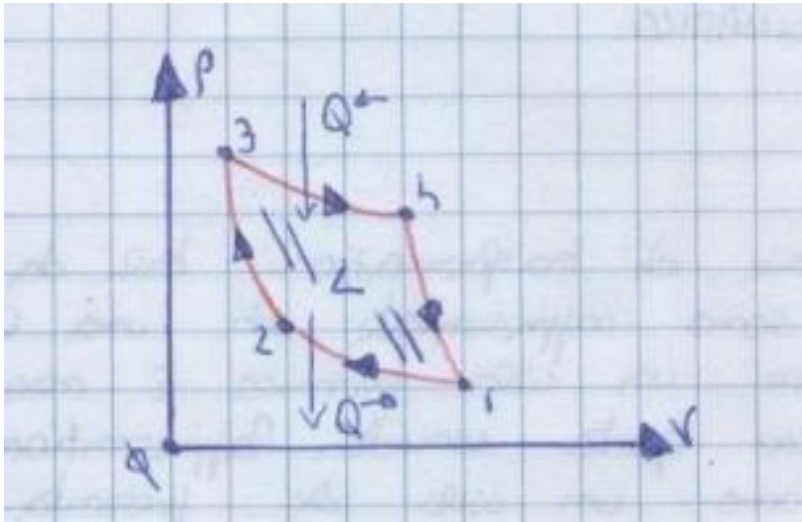


Figura 3.24: Ciclo di Carnot

Tale ciclo è composto da due trasformazioni adiabatiche reversibili e da due trasformazioni isoterme anch'esse reversibili. Si ricordi che una **trasformazione adiabatica** non consente lo scambio di calore con l'esterno. Una **trasformazione isoterma** è una trasformazione termodinamica che avviene a temperatura costante. La trasformazione  $T_{1,2}$  è una trasformazione isoterma ed in particolare è una compressione isoterma (aumento della pressione e diminuzione del volume). La trasformazione  $T_{2,3}$  è una trasformazione adiabatica. Il ciclo di Carnot è reversibile, ossia può essere percorso nel senso inverso. E' un ciclo ideale con rendimento massimo, pertanto il ciclo di Carnot non può essere utilizzato in ambito industriale in quanto è composto da trasformazioni reversibili e quindi per definizione è lento. Infatti, nelle macchine termiche industriali non solo dobbiamo ottenere un buon rendimento, ma anche una notevole velocità di trasformazione del calore in lavoro. Quindi, per forza di cose, servono altri cicli teorici. I cicli industriali teorici sono suddivisi in due macro-categorie:

- **Cicli a gas**
- **Cicli a vapore**



Nei cicli a gas ovviamente il fluido operante è un gas, mentre nei cicli a vapore il fluido operante è vapore. Il ciclo mostrato di seguito è un ciclo a gas chiamato **ciclo otto**.

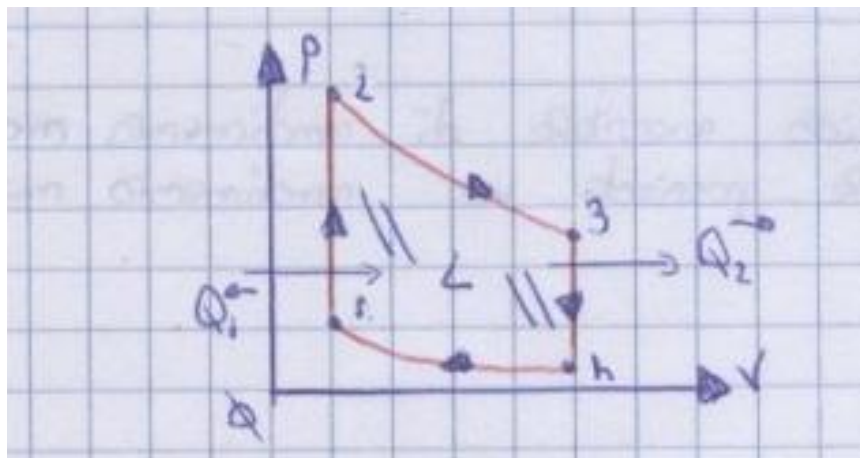


Figura 3.25: Ciclo otto

Si supponga di avere a disposizione una miscela di aria e benzina in un cilindro. Inizialmente il sistema si trova nello stato chiamato STATO 1. Successivamente si fa scoccare una scintilla che accende la miscela la quale produrrà un riscaldamento del gas interno dato dalla combustione volume costante (trasformazione isocora) ed un aumento della pressione fino al raggiungimento dello stato chiamato STATO 2. In questa trasformazione si ha un'acquisizione dall'esterno di calore.

Successivamente, nella trasformazione 2-3 si ha un aumento di volume a discapito della pressione (espansione adiabatica), con conseguente discesa del pistone verso il suo punto morto inferiore (punto più basso della corsa del pistone). A questo punto si apre la valvola di scarico e fuoriesce il gas combusto (trasformazione 3-4) con espulsione di calore e diminuzione della pressione a volume costante (altra trasformazione isocora). Quindi, il sistema giunto nello stato 4 è pronto a ricevere altra miscela di aria e benzina per far ripartire il ciclo. Il ciclo otto è il tipico ciclo dei motori a miscela.

Si chiama **rapporto di compressione** il seguente rapporto:

$$R = V_4/V_1 = V_{max}/V_{min} \quad (3.12)$$

Oltre al ciclo otto esiste un altro ciclo molto utilizzato che è il **ciclo Diesel**. Di seguito ne viene riportato il grafico P-V.

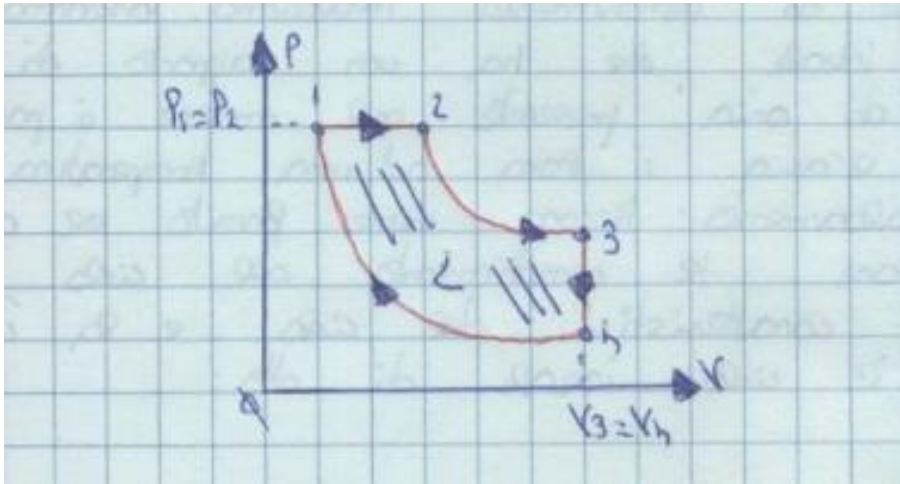


Figura 3.26: Ciclo Diesel

Questo ciclo, tipico dei motori ad accensione per compressione, ha la caratteristica che il calore viene introdotto nel fluido a pressione costante invece che a volume costante, come nel caso del ciclo otto. Quindi, nella prima trasformazione dallo stato 1 allo stato 2, si ha una espansione isobara (a pressione costante) del gas. Successivamente, si abbassa la pressione ma si ha ancora un aumento di volume. Nella transizione 3-4 si ha lo scarico del gas con conseguente riduzione di volume del sistema “cilindro-pistone”.

Un altro ciclo molto importante ed utilizzato è il **ciclo di Joule**, mostrato nella figura sottostante. La caratteristica del ciclo di Joule è che nelle trasformazioni 2-3 e 4-1 il sistema scambia lavoro e calore con l’ambiente esterno.

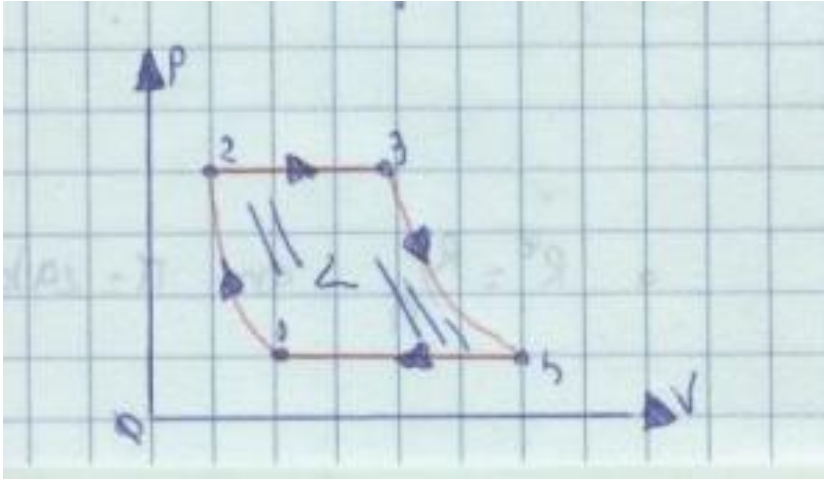


Figura 3.27: Ciclo di Joule

Una evoluzione del ciclo di Joule è il ciclo di **Joule-Brayton** nel quale le trasformazioni non vengono svolte in un sistema tradizionale cilindro-pistone bensì in sistemi ben più complessi.

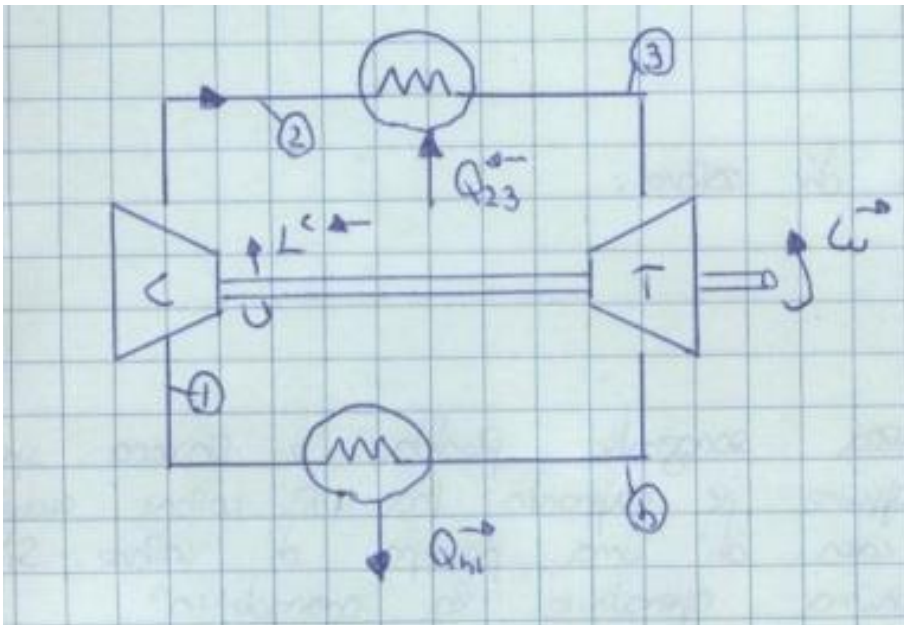


Figura 3.28: Ciclo Joule-Brayton

Il simbolo mostrato in figura è il simbolo dello scambiatore di calore.



Figura 3.29: Scambiatore di calore

Nella figura 3.28, “C” è il **compressore** mentre con “T” si indica la **Turbina**. Tale ciclo costituisce il rendimento ideale per le turbine a gas ed è alla base di gran parte dei sistemi per la produzione di energia elettrica.

I cicli illustrati fino ad ora sono i cicli a gas. Per quanto riguarda i cicli a vapore, viene fornita una breve descrizione del **ciclo Rankine** e del **ciclo frigorifero a vapore**. Un ciclo Rankine è un ciclo in cui si ha una espansione isoentropica 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 facendolo diventare liquido saturo. Poi, ovviamente, il liquido saturo viene compresso ed immesso in un boiler per portarlo, a pressione costante, allo stato di vapore saturo, come viene mostrato di seguito.

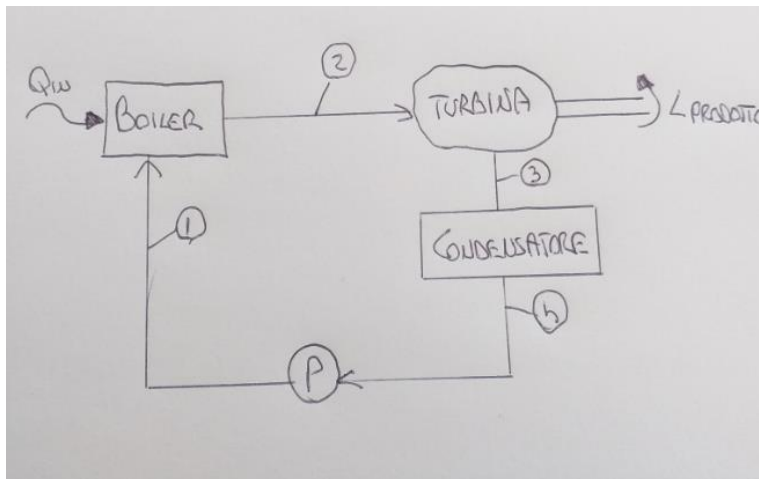


Figura 3.30: Ciclo Rankine

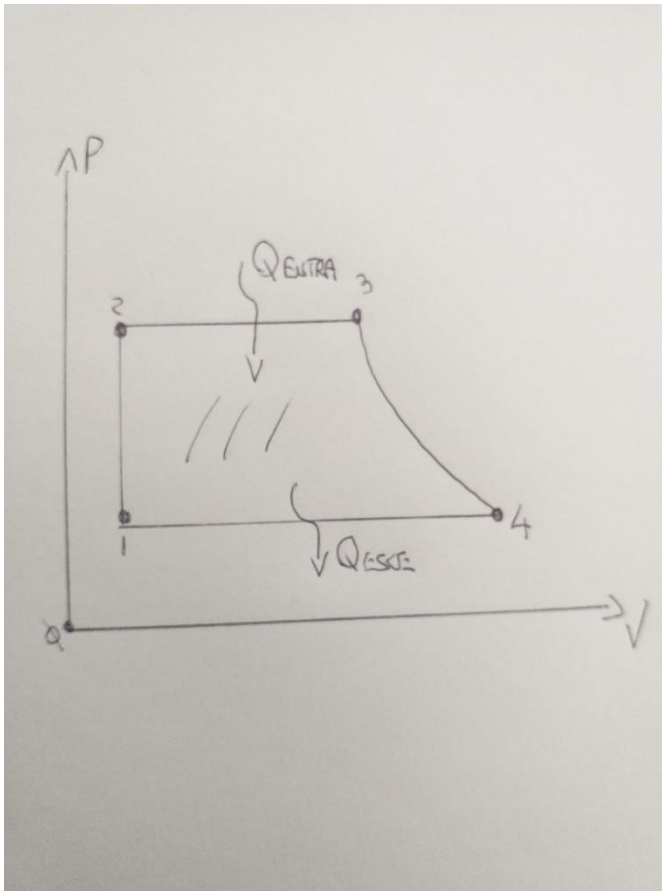


Figura 3.31: Piano P-V del ciclo Rankine

Per **vapore saturo** si intende un fluido in cui coesistono liquido e vapore. Un processo di si dice **isoentropico** quando avviene con una entropia costante. **L'entropia**, è una grandezza fisica che si denota solitamente con la lettera 'S' e che definisce il grado di equilibrio raggiunto da un sistema in un dato momento. In un processo isoentropico, non vi è scambio di calore e di materia con l'ambiente circostante e pertanto è un processo adiabatico reversibile.

Il ciclo Rankine viene sfruttato solitamente nelle centrali termoelettriche che sfruttano il vapore saturo per generare energia elettrica. Prima di passare ad analizzare il ciclo frigorifero, è bene fare due precisazioni sul condensatore. Un condensatore è un apparecchio dove il vapore che entra viene raffreddato da un refrigerante (acqua) in modo tale che, cedendo il calore di

vaporizzazione, condensa alla temperatura corrispondente alla pressione ivi regnante. Ci sono due tipologie di condensatori:

- **Condensatori a miscuglio**
- **Condensatori a superficie**

I condensatori a miscuglio sono quelli in cui il vapore e l'acqua refrigerante vengono a diretto contatto e quindi pompati insieme da una pompa che li porta fuori dall'apparecchio. I condensatori a superficie invece sono quelli in cui l'acqua refrigerante ed il fluido sono separati da una parete metallica, attraverso la quale si ha la trasmissione di calore.

Un ciclo frigorifero è un ciclo a vapore in cui però il fluido non è acqua bensì un gas che va sotto il nome di **Freon**. Purtroppo, il Freon è un gas che danneggia l'Ozono e pertanto, in passato, si utilizzava solitamente il gas **R22 (messo al bando dall'U.E)**.

Una generica macchina frigorifera il cui ciclo è stato evidenziato in figura 3.19, è una macchina termica operatrice nella quale il fluido operante percorre un ciclo termodinamico in senso antiorario. In queste condizioni, dunque, il fluido assorbe il calore da una sorgente a bassa temperatura e lo cede ad una sorgente ad alta temperatura. Per questo tipo di macchine si definisce un importantissimo parametro chiamato **efficienza** e definito come:

$$\varepsilon = \frac{T_F}{T_C - T_F} \quad (3.13)$$

Dove:

$T_F$  = temperatura sorgente fredda

$T_C$  = temperatura sorgente calda

Questo coefficiente è un indice della capacità del processo di convertire l'energia al fine di soddisfare gli obiettivi, a fronte di una certa spesa energetica.

### 3.6 LE CENTRALI A CARBONE

La centrale a carbone è una tipologia di centrale termoelettrica altamente inquinante. La figura seguente mostra uno schema di massima del funzionamento di una centrale a carbone.

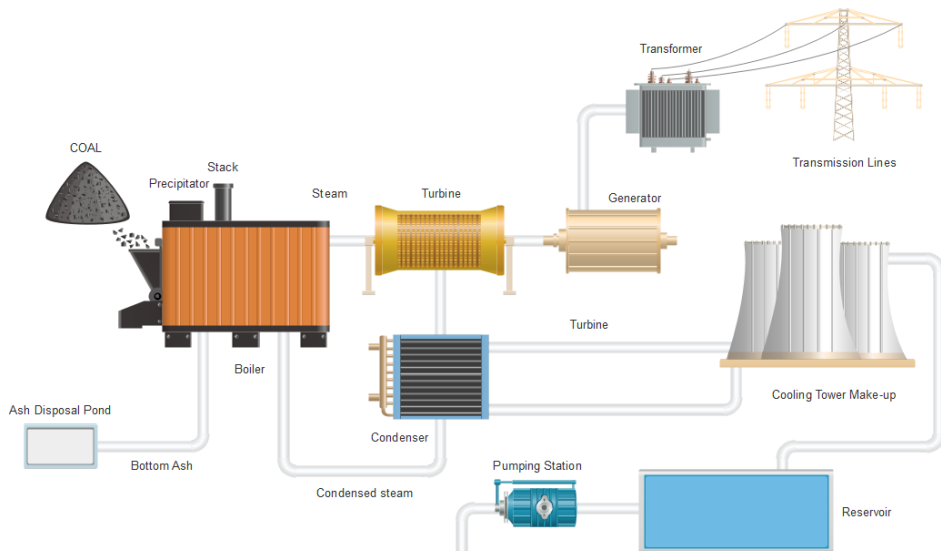


Figura 3.32: Centrale a carbone

Una centrale termoelettrica a carbone è simile ad una centrale termoelettrica standard. Pertanto, è composta da una caldaia, una turbina, un alternatore, un impianto di raffreddamento, un bruciatore.

Durante il processo di generazione dell'energia elettrica, l'acqua all'interno della caldaia subisce una fase di pre-riscaldamento, nel quale si raggiungono temperature di 300° e in seguito subisce il **processo di degasazione** tramite una **torretta degasante**. Pertanto, un degasatore termico è una specie di scambiatore di calore nel quale avviene la degasazione termica dell'acqua. In poche parole, la degasazione termica è quel processo di trattamento dell'acqua che consente di rendere l'acqua adatta a determinati impieghi.

Infatti, l'obiettivo del degasaggio termico è quello di ridurre l'ossigeno presente nel vapore surriscaldato. Va ricordato che nei cicli tradizionali termodinamici l'acqua è spesso costretta a cambiamenti di fase (liquido -> vapore saturo o surriscaldato). Questo comporta un notevole aumento di temperatura e pressione. Questo comporta che l'acqua debba presentare il minor numero di impurità possibile. La presenza di ossigeno può portare a fenomeni di corrosione delle tubature e dei macchinari vari. La fase di degasaggio avviene facendo precipitare dall'alto di una torre dell'acqua nebulizzata mentre dal basso si insuffla del vapore.

Il funzionamento di una centrale a carbone si basa sul ciclo Rankine. In particolare, si sfrutta il carbone come materia prima il quale viene bruciato per produrre energia elettrica. Solitamente la caldaia è situata a fianco della sala macchine al cui interno sono presenti: il condensatore ed il gruppo turbina-alternatore. La figura seguente mostra un esempio di caldaia con relativo bruciatore. Una caldaia può anche essere alta 50 metri al cui interno sono presenti molti fasci di tubi collegati a serpentina. E' all'interno di questo fascio di tubi che l'acqua scorre. Questi tubi arrivano a raggiungere temperature di circa 300°C.

Il vapore ad elevate pressioni che esce dalla caldaia entra, tramite tubatura, nella sala macchine dove va a "colpire" le pale di una turbina facendola ruotare. Il vapore esausto rientra nel condensatore dove viene raffreddato. In uscita del condensatore si ha acqua allo stato liquido.





Figura 3.33: Caldaia

Chiaramente anche una centrale a carbone presente vantaggi e svantaggi.

#### **VANTAGGI:**

- E' una forma di combustibile facile da trasportare e stoccare
- Ci sono buone riserve che sono ancora disponibili
- Il prezzo del carbone è stabile nel tempo

#### **SVANTAGGI:**

- La combustione del carbone genera **anidride carbonica** ( $CO_2$ ) e **anidride solforosa** ( $SO_2$ ). Mentre l'anidride carbonica non è

inquinante ma climalterante, l'anedride solforosa è un forte irritante delle vie respiratorie. Inoltre, reagendo con l'acqua essa ritorna sulla terra sotto forma di piogge acide. Inoltre, è da tenere presente che il carbone contiene arsenico, mercurio, uranio e altri isotopi radioattivi naturali, che rilasciati nell'ambiente comportano la **contaminazione radioattiva dell'aria**.

Da qualche anno a questa parte esistono delle tecniche particolari chiamate tecniche **CCS (Carbon Capture and Storage)** le quali permettono di catturare l'anedride carbonica e stoccarla in appositi siti. Sostanzialmente esistono due tipi di tecniche per la cattura dell'anedride carbonica emessa dalla combustione delle fonti fossili:

- **Alla fonte** -> ossia sfruttando delle tecniche che permettono di assorbire o deviare il flusso delle emissioni direttamente dallo scarico degli impianti.
- **Dall'aria** -> sottraendo anedride carbonica dall'atmosfera.

Nel primo caso si sfruttano dei ventilatori per spingere l'anedride carbonica verso opportuni filtri in ceramica i quali, di fatto, trattengono il gas pericoloso. Questo sistema è ad alto costo energetico ed economico. Inoltre, in attesa di essere spedita verso lo stoccaggio sotterraneo, **la CO<sub>2</sub> dev'essere stoccata in contenitori specifici**. Questo comporta un ennesimo costo che si aggiunge a tutti gli altri. Nel secondo caso invece sfrutta tecniche di geoingegneria.