



Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca
M058 – ESAME DI STATO DI ISTITUTO PROFESSIONALE

CORSO DI ORDINAMENTO

Indirizzo: TECNICO DELLE INDUSTRIE MECCANICHE

Tema di: MACCHINE A FLUIDO

In un impianto termo-elettrico si ha:

- produzione di vapore $G_v = 20$ t/h;
- $p_{\max} = 45$ bar;
- t_{\max} di surriscaldamento = 623 K;
- pressione di condensazione = 0,50 bar.

Scelti opportunamente e motivatamente i dati mancanti, il candidato:

- 1) illustri le problematiche energetiche e ambientali;
- 2) schematizzi l'impianto indicando le trasformazioni termodinamiche nei singoli componenti;
- 3) riporti il ciclo ideale sul diagramma T-s;
- 4) determini il rendimento del ciclo termodinamico;
- 5) determini la potenza disponibile all'asse della turbina.

Svolgimento :

Il **problema energetico** è un termine coniato per indicare la crescente domanda di energia della società umana a fronte di una offerta di energia primaria legata a fonti di energia fossile ed esauribili. Si comincia a parlare di problema energetico soltanto con le prime crisi energetiche degli anni '70 del Novecento. Fino al '700 il fabbisogno di energia della società umana è limitato allo sfruttamento dell'energia animale e dell'energia termica. Qualsiasi sforzo e lavoro è compiuto con la forza muscolare degli uomini e degli animali. La combustione del legno è utilizzata prevalentemente per cucinare e per il riscaldamento delle case. L'energia eolica è, invece, utilizzata per il trasporto marittimo tramite le barche a vela. L'invenzione della macchina a vapore nel XVIII secolo segna l'inizio della Rivoluzione industriale. Lo sfruttamento dei combustibili fossili (carbone, petrolio, gas) consente di alimentare la meccanizzazione e l'automatizzazione

dei processi industriali. Le risorse energetiche diventano strategiche per le economie nazionali e cominciano a presentarsi i primi problemi ambientali in termini di inquinamento e deturpazione dell'ambiente. Non si può, tuttavia, ancora parlare di problema energetico. Al contrario, all'inizio del '900 l'uomo mostra piena fiducia nel progresso tecnologico e nella crescita economica infinita. La storia del problema energetico nel Novecento può essere suddivisa nelle seguenti fasi storiche.

- **Progresso e crescita infinita.** Nella prima metà del Novecento le principali riserve di energia sono abbondanti e l'energia può essere utilizzata dall'uomo a basso costo. Nel corso del XX secolo il fabbisogno energetico cresce in progressione geometrica. Negli anni '70 la domanda di energia è quattro volte superiore rispetto a quella di inizio secolo. Prevale la fiducia nel progresso tecnologico e l'idea della crescita economica infinita.
- **Shock petroliferi del '73.** Un primo rallentamento si presenta soltanto in occasione delle crisi energetiche del 1973-74, quando una stretta nell'offerta dei paesi produttori di petrolio costringe il mondo sviluppato (Nord del mondo) a scontrarsi con la scarsità e con la dipendenza dalle risorse energetiche straniere. Le riserve di energia fossile (gas, carbone, petrolio) sono concentrate in pochi paesi, molti dei quali si sono affrancati dal colonialismo europeo. Il costo dell'energia inizia a crescere rapidamente, mettendo in crisi l'economia industriale in Europa e in America. In questi anni si moltiplicano gli sforzi nell'efficienza energetica e nelle energie alternative. Nel mondo accademico si comincia a parlare di limiti dello sviluppo e di sviluppo sostenibile.
- **Problema ambientale.** Negli anni '70 l'umanità assiste anche alle conseguenze ambientali dello sviluppo su scala globale. L'inquinamento transnazionale, il buco nell'ozono e l'effetto serra si trasformano in un argomento politico e mediatico (problema ambientale) . Qualunque tipo di centrale termoelettrica (carbone, petrolio, gas) provoca inquinamento atmosferico, le centrali elettriche nucleari hanno un impatto elevato sull'ambiente in caso di incidente e le stesse centrali idroelettriche, pur essendo una fonte di energia pulita e rinnovabile, modificano profondamente l'ecosistema locale tramite la costruzione delle dighe. Sia il problema energetico che il problema ambientale spingono verso la ricerca di nuove fonti di energia e verso politiche di efficienza e di risparmio energetico.
- **Scoperta nuove riserve ed efficienza energetica.** Negli anni '80-90 la scoperta di nuove riserve petrolifere e l'incremento dell'efficienza energetica consentono ai paesi industrializzati del Nord del mondo di allentare il vincolo energetico, senza comunque risolvere il problema energetico. Il costo dell'energia si riduce e il problema energetico non è più una priorità nelle agende dei governi. Il problema ambientale, invece, prosegue il suo cammino politico con accordi finalizzati al contenimento delle emissioni CO₂ e degli altri inquinanti. Tra i vari accordi internazionali, spicca per importanza il Protocollo di Kyoto del 1997.
- **Sviluppo economico di Cina e India.** Negli anni duemila il fabbisogno energetico accusa una nuova fase di accelerazione a causa dello sviluppo economico dei paesi emergenti del Sud del mondo. In particolar modo della Cina e dell'India. Il costo dell'energia torna nuovamente a crescere. Soltanto la crisi economica globale del 2008 riesce a rallentare la crescita del fabbisogno energetico. L'assenza di una fonte energetica alternativa in grado di sostituirsi alle risorse energetiche fossili, in via di esaurimento, rende il problema energetico una delle questioni ancora da risolvere. Anche il problema

ambientale è ancora lontano dall'essere risolto. I principali paesi produttori di emissioni CO2 non partecipano al Protocollo di Kyoto, gli Stati Uniti d'America non ratificano il Protocollo mentre la Cina, in quanto paese in via di sviluppo negli anni '90, non è obbligata al rispetto degli accordi di Kyoto.

IMPATTO AMBIENTALE

La centrale termoelettrica inquina fortemente l'**aria** con i fumi della combustione. Il monossido di carbonio, l'anidride solforosa, gli ossidi di azoto, il piombo e gli idrocarburi sono detti inquinanti atmosferici primari. In particolari condizioni climatiche, e cioè quando l'aria non circola e gli inquinanti permangono a lungo nell'atmosfera, si verificano reazioni chimiche, favorite dalla luce del sole, che danno luogo a un insieme di prodotti, denominati nel loro complesso "smog", e che rappresentano gli inquinanti atmosferici secondari. Un discorso a parte va fatto per l'anidride carbonica, la quale è un componente naturale dell'aria, ed è indispensabile per tutti i processi biologici, ma è anche responsabile della regolazione della temperatura dell'aria.

L'anidride solforosa e gli ossidi di azoto, che si generano dalla combustione del carbone e dei derivati del petrolio, provocano il fenomeno delle piogge acide. Combinandosi con l'acqua piovana, l'anidride solforosa si trasforma in acido solforico e gli ossidi di azoto in acido nitrico, e poi ricadono al suolo. L'effetto di queste piogge è progressivo e insidioso, esse producono un accumulo di acidi nel terreno e nelle acque dei fiumi e dei laghi, danneggiando gravemente gli ecosistemi, a partire dalla vegetazione. L'enorme immissione di CO2 nell'atmosfera impedisce alla Terra di reirradiare nello spazio l'energia che riceve dal Sole, provocando l'effetto serra, cioè il riscaldamento dell'atmosfera, che, a sua volta, provoca l'aumento della temperatura dei ghiacci, determinando un innalzamento del livello del mare, e quindi la sommersione delle regioni costiere, che, come è noto, sono le regioni più popolate della Terra. Lo smog, il piombo e il monossido di carbonio agiscono in modo diretto sulla funzione respiratoria dei viventi, provocando gravi malattie polmonari.

Non trascurabili i **danni all'ecosistema** del corpo idrico utilizzato per gli scarichi termici dell'acqua.

L'impianto, come tutte le altre centrali del resto, occupando una certa superficie, normalmente recintata, allontana dalla zona la fauna e, i vari edifici connessi al suo funzionamento comportano sempre un certo impatto sull'ambiente dal punto di vista paesaggistico.

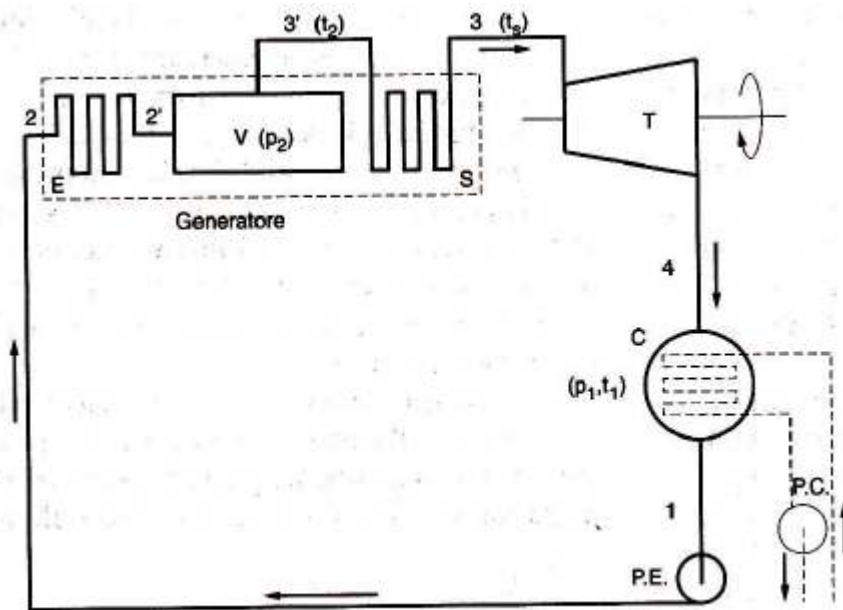
Nella sala macchine sia le turbine, sia i generatori di corrente producono un rumore costante di parecchi decibel che, a lungo andare, provoca danni all'udito degli operatori, per cui, questi, devono essere sottoposti a periodici controlli medici.

Le macchine elettriche, quali gli Alternatori e le Dinamo, per effetto dello strisciare delle spazzole sul collettore generano un certo scintillio. L'arco voltaico scompone l'Ossigeno dell'aria O2 in O, che legandosi poi ad altre molecole, forma Ozono O3, gas velenoso dal caratteristico odore di aglio.

CIRCUITO ELEMENTARE E CICLO TERMODINAMICO

Schematicamente l'impianto, nella sua configurazione essenziale e sotto riportato, è costituito da :

- Una pompa di estrazione P.E. ;
- Un generatore di calore (preriscaldatore, caldaia e surriscaldatore) ;
- Una turbina a vapore T ;
- Un condensatore C ;



Iniziamo lo studio, considerando il ciclo semplice a portata costante, in cui le trasformazioni termodinamiche ideali subite dall' acqua per convertire in lavoro parte del calore sviluppato dalla combustione nel generatore di vapore sono, facendo riferimento alla sopra riportata figura, le seguenti :

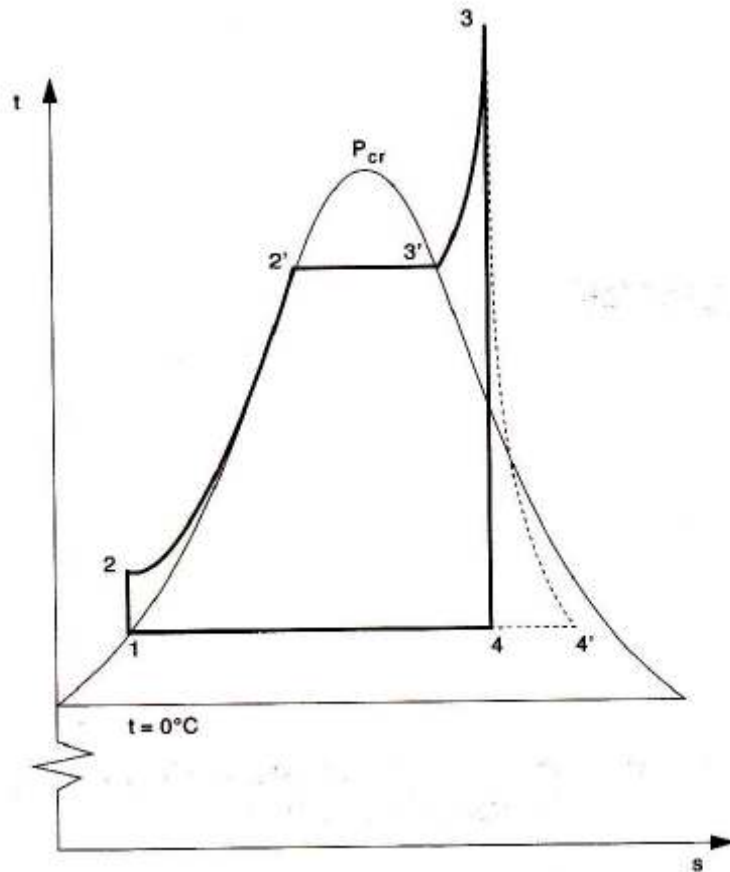
1-2) TRASFORMAZIONE ADIABATICA : l' acqua viene compressa dalla pressione P_1 , a cui si trova il vapore all' uscita del condensatore, fino alla pressione P_2 , all' interno della caldaia, subendo un incremento di temperatura (entalpia) trascurabile (lavoro speso dalla pompa); quindi, possiamo considerare, praticamente, la temperatura del punto 1 corrispondente alla temperatura del punto 2 e la chiameremo T_1 .

2-3) TRASFORMAZIONE ISOBARA : l' acqua viene riscaldata dalla temperatura T_1 corrispondente alla pressione P_2 , fino alla temperatura T_2 corrispondente alla pressione P_2 e quindi vaporizzata a pressione costante; eventualmente, come riportato nello schema, il vapore viene surriscaldato, sempre a pressione costante P_2 , a temperatura T_3 superiore a quella di vaporizzazione T_2 . Il processo avviene nel cosiddetto generatore di vapore all' interno del quale si evidenziano l' economizzatore, il vaporizzatore ed il surriscaldatore.

3-4) TRASFORMAZIONE ADIABATICA : consiste nell' espansione del fluido dalla pressione P_2 vigente nel generatore a quella del condensatore P_c ; la trasformazione si realizza nella turbina e fornisce il lavoro utile al ciclo;

4-1) TRASFORMAZIONE ISOBARA : il vapore scaricato dalla turbina alla pressione P_1 viene completamente condensato a pressione costante, riduzione di entropia, dallo stato di vapore-umido viene ricondotto allo stato liquido con cui aveva iniziato il ciclo.

Il ciclo limite, detto ciclo Rankine-Hirn, che corrisponde allo schema appena descritto, puo' essere rappresentato sui vari piani cartesiani: costruiremo quello, richiesto dal tema ministeriale, di calore T-S.



La fase di compressione 1-2 si svolge nella pompa di estrazione del condensato , la fase 2-3' riguarda il riscaldamento del liquido e avviene parte nell' economizzatore 2-2' e parte nella caldaia propriamente detta. La fase 2'-3' di vaporizzazione si compie nei tubi bollitori o nei grossi corpi della caldaia. Le fasi 3-3', 3'-4, 4-1, si svolgono rispettivamente nel surriscaldatore, nella turbina e nel condensatore. Il punto 4' è caratterizzato da una entropia e una entalpia maggiore rispetto al caso limite, evidenziando contemporaneamente un minor lavoro utile in turbina T e un maggior calore rilasciato al condensatore C.

Prendendo in esame i dati del tema ministeriale, analizzeremo punto per punto le varie fasi del ciclo limite e determineremo il rendimento termodinamico dello stesso.

Partendo dalla fase 1-2, trasformazione adiabatica, l' acqua viene compressa dalla pressione $P_1 = 0,5$ bar, a cui si trova il vapore all' uscita del condensatore, fino alla pressione $P_2 = 45$ bar, all' interno della caldaia; il lavoro di compressione, svolta dalla pompa, è piccolo rispetto a quello di espansione nella turbina per cui può essere trascurabile. Praticamente si può considerare $T_1 = T_2$.

Per mezzo delle tabelle del vapor d' acqua alle varie pressioni, interpolando, si ricavano i valori di temperatura T_1 , entalpia h_1 e entropia s_1 relativa alla curva limite inferiore del punto 1; per cui :

$$T_1 = 81,35 \text{ °C ;}$$

$$h_1 = 340,6 \text{ KJ/Kg ;}$$

$$s_1 = 1,0912 \text{ KJ/Kg ;}$$

$$P_1 = 0,5 \text{ bar (valore del tema ministeriale).}$$

Per le ragioni esposte in precedenza, possiamo far coincidere i valori termodinamici del punto 1 con i valori del punto 2, per cui :

$$T_2 = 81,35 \text{ } ^\circ\text{C} ;$$

$$h_2 = 340,6 \text{ KJ/Kg} ;$$

$$s_2 = 1,0912 \text{ KJ/Kg} ;$$

$$P_2 = 45 \text{ bar (valore del tema ministeriale)}.$$

Durante la fase 2-2', trasformazione isobara, l' acqua viene riscaldata, apporto di calore da parte del preriscaldatore o economizzatore, dalla temperatura T1 alla temperatura T2 a pressione costante; come si osserva dal ciclo Rankine-Hirn per il punto 2', la temperatura da raggiungere T2 corrisponde a quella della curva limite inferiore alla pressione corrispondente P2 ; per cui, consultando le tabelle e interpolando si ricavano i seguenti valori :

$$T_2' = 257,41 \text{ } ^\circ\text{C} ;$$

$$h_2' = 1122,1 \text{ KJ/Kg} ;$$

$$s_2' = 2,8612 \text{ KJ/Kg} ;$$

$$P_2' = 45 \text{ bar (valore del tema ministeriale)}.$$

Durante la fase 2'-3', trasformazione isobara, continuando l' apporto di calore all' acqua da parte della caldaia, il liquido si trasforma gradualmente in vapore mantenendo costante la temperatura e la pressione; come si osserva dal ciclo Rankine-Hirn, l' entropia da raggiungere del punto 3' corrisponde a quella della curva limite superiore alla pressione corrispondente P2 per cui, mediante le tabelle del vapor d' acqua, possiamo ricavare :

$$T_3' = 257,41 \text{ } ^\circ\text{C} ;$$

$$h_3' = 2797,7 \text{ KJ/Kg} ;$$

$$s_3' = 6,0191 \text{ KJ/Kg} ;$$

$$P_3' = 45 \text{ bar (valore del tema ministeriale)}.$$

Nella fase 3'-3, trasformazione isobara, proseguendo a fornire calore al vapore nel surriscaldatore, l' aeriforme si trasforma in vapore surriscaldato e si innalza la temperatura dal valore T2 al valore T3 a pressione costante; proprio in questa fase si permette di innalzare la temperatura massima del ciclo, oltre la curva limite superiore, per aumentare il lavoro che viene, poi, svolto nella turbina all' atto dell' espansione del vapore. Mediante le tabelle del vapore surriscaldato, possiamo ricavare le proprietà termodinamiche del punto 3, per cui :

$$T_3 = 350 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow 623 \text{ K (valore del tema ministeriale)};$$

$$h_3 = 3083,3 \text{ KJ/Kg} ;$$

$$s_3 = 6,5182 \text{ KJ/Kg} ;$$

$P_3 = 45 \text{ bar}$ (valore del tema ministeriale).

Durante la fase 3-4 , trasformazione adiabatica che consiste nell' espansione del fluido dalla pressione vigente P_2 e temperatura T_3 a quella nel condensatore P_1 e T_1 ; la trasformazione si realizza nella turbina e fornisce il lavoro utile al ciclo. Il punto 4, come si nota nel ciclo termodinamico, si trova all' interno della campana delle due curve limite, nella zona definita di vapore saturo umido a titolo elevato, il valore dell' entalpia non puo' essere letto direttamente sulle tabelle, ma deve essere calcolato tenendo conto che il titolo esprime un' aliquota di fluido allo stato liquido e la rimanente aliquota allo stato di vapore. La relazione utilizzata è la seguente :

$$h_4 = h_1 + (h_v - h_1) \cdot X_4 .$$

dove :

h_4 è l' entalpia corrispondente al punto 4 all' interno della campana ;

h_1 è l' entalpia del fluido allo stato liquido, con titolo nullo $X = 0$, riferita al punto 1 del ciclo ;

h_v è l' entalpia del fluido allo stato di vapore, alla temperatura T_1 e alla pressione P_1 del punto 4 con titolo unitario $X = 1$.

X_4 è il titolo del fluido allo stato di vapore saturo umido, alla temperatura o pressione corrispondente al punto 4 all' interno della campana.

Per determinare il valore di h_v , è necessario consultare le tabelle del vapor d' acqua e interpolando con i valori noti di pressione e temperatura si ricava :

$$T_4 = 81,35 \text{ °C} ;$$

$$h_v = 2646 \text{ KJ/Kg} ;$$

$$s_v = 7,5947 \text{ KJ/Kg} ;$$

$P_4 = 0,5 \text{ bar}$ (valore del tema ministeriale) .

Essendo la trasformazione della turbina isoentropica, come si evidenzia nel diagramma a entropia costante, si deduce che l' entropia nel punto 4 coincide con quella del punto 3, quindi, se :

$$s_4 = s_1 + (s_v - s_1) \cdot X_4 .$$

Dall' inversione della espressione di cui sopra, avendo come incognita X_4 e sapendo che s_4 è uguale a s_3 , si ottiene :

$$X_4 = (s_3 - s_1) / (s_v - s_1) .$$

$$X_4 = (6,5182 - 1,0912) / (7,5947 - 1,0912) = 0,834 .$$

Ritornando al calcolo dell' entalpia del punto 4, precedente, sapendo che h_1 e h_v sono i valori corrispondenti e già ricavati alla condizione di liquido e di vapore alla pressione P_1 , si ottiene :

$$h_4 = 340,6 + (2646 - 340,6) \cdot 0,834 = 2263 \text{ KJ/Kg} .$$

Infine, disponendo di tutti i dati necessari, si passa la calcolo del rendimento del ciclo limite :

$$\eta_l = (h_3 - h_4) / (h_3 - h_2) .$$

$$\eta_l = (3083,3 - 2263) / (3083,3 - 340,6) = 0,3 .$$

Consideriamo, per poter determinare la potenza netta all' asse della turbina, di utilizzare come combustibile nel generatore di vapore del gas naturale con $H_{ci} = 50100 \text{ KJ/Kg}$ e un rendimento del generatore di calore pari a $\eta_g = 0,90$. Attraverso tali dati, assunti di proprio arbitrio, ma coerenti, possiamo determinare la portata di combustibile mediante la seguente relazione :

$$G_c = G_v \cdot (h_3 - h_2) / (\eta_g \cdot H_{ci}) .$$

Dove : G_v è la portata di vapore, definita dal tema, $20 \text{ t/h} \rightarrow 20000 \text{ Kg/h}$.

$$G_c = 20000 \cdot (3083,3 - 340,6) / (0,90 \cdot 50100) = 1216 \text{ Kg/h} .$$

Sapendo che il rendimento globale dell' impianto corrisponde a :

$$\eta_i = (3600 \cdot N) / (G_c \cdot H_{ci}) .$$

Dall' inversione della espressione di cui sopra, avendo come incognita N la potenza netta , si ottiene :

$$N = (\eta_i \cdot G_c \cdot H_{ci}) / 3600 .$$

Dove η_i corrisponde al rendimento globale dell' impianto; ovvero sia :

$$\eta_i = \eta_g \cdot \eta_t \cdot \eta_l .$$

Assumeremo, ad arbitrio, il valore di $\eta_i = 0,20$; per cui :

$$N = (0,20 \cdot 1216 \cdot 50100) / 3600 = 3384 \text{ Kw} .$$

Determiniamo, anche, il rendimento della turbina :

$$\eta_t = (3600 \cdot N) / G_v \cdot (h_3 - h_4) .$$

$$\eta_t = (3600 \cdot 3384) / 20000 \cdot (3083,3 - 2263) = 0,74 .$$

oppure, con un secondo metodo :

$$\eta_t = \eta_i / \eta_g \cdot \eta_l .$$

$$\eta_t = 0,20 / 0,90 \cdot 0,30 = 0,74 .$$