

1-Introduzione

L'ingegneria in sé rappresenta un'approssimazione della teoria, in particolare nei sistemi energetici. I sistemi energetici sono legati necessariamente alla conversione dell'energia.

2-Terminologia

Macchina: Sistema energetico costituito da organi meccanici e impianti ausiliari opportunamente collegati con lo scopo di operare delle conversioni energetiche. Sistema che svolge lavoro meccanico e che converte una forma di energia in un'altra di caratteristiche diverse.

Macchina a Fluido Macchina che si serve di trasformazioni termodinamiche di un fluido per lo scambio/conversione di energia.

Impianto motore Sistema che converte forme di energia primaria in energia meccanica.

Impianto motore termico Sistema che converte energia termica (o ad essa riconducibile come la combustione o la fissione nucleare) in energia meccanica.

Tipologia di flussi energetici

Si dice flusso dell'energia l'insieme delle conversioni di questa, a partire dalle fonti primarie fino agli utilizzi finali.

Sono fonti primarie per la conversione di energia:

- La gravitazione: essa produce una quota da cui 'far cadere' l'acqua, in maniera spontanea; origina inoltre le maree;
- La radiazione solare: essa dà origine ai moti convettivi di aria e acqua, generando vento e correnti; è responsabile del processo di evaporazione dell'acqua, dell'innesco di processi biologici per la formazione dei combustibili, dell'energia radiante (irraggiamento Termico)
- Il 'Funzionamento del sistema solare': in questa categoria si annoverano il calore endogeno, come l'energia geotermica; il decadimento di alcuni materiali radioattivi, come una certa gamma di isotopi, che producono calore in piccole quantità, in alcuni casi recuperabili;

La conversione dell'energia raramente avviene in maniera diretta dalle fonti primarie all'energia elettrica; spesso si deve passare per fasi di conversione intermedia (es. termica e meccanica, da cui produco energia elettrica).

Fra tutte queste, l'energia idraulica rappresenta la più conveniente in assoluto, poiché si presentano dissipazioni molto basse nell'intero processo di conversione. L'uso di cicli termici, invece, comporta un rendimento minore per via di numerose dissipazioni, di cui si può avere un indice dal secondo principio della termodinamica. In questi casi, si può ricorrere ad opportuni sistemi di Harvesting per il recupero dell'energia altrimenti dispersa.

Usi finali dell'energia: illuminazione, impianti idraulici, usi industriali, "catena del freddo" (refrigerazione e cottura dei cibi)

Fabbisogno energetico-Costi

Legge del raddoppio del fabbisogno energetico: se il tasso di crescita del consumo energetico annuo di un paese è pari al 7% il fabbisogno energetico raddoppia in 10 anni. Il limite del 7% può essere superato dai paesi in via di sviluppo, mentre rimane intorno al 2-3% nei paesi con un'economia sviluppata.

L'incremento progressivo dei costi energetici è dettato dall'esaurimento delle risorse energetiche, dalle leggi di mercato, dall'aumento del fabbisogno, dall'introduzione (di recente) di norme sull'impatto ambientale.

L'energia elettrica necessaria al fabbisogno energetico mondiale prevista nel 2030 è doppia rispetto a quanta disponibile nel 2007, impiegherà il 44% delle risorse anziché il 36%(2007). Il 40% della CO₂ prodotta all'anno (10 miliardi di ton/anno) deriva dalla produzione di elettricità. Il problema del rapporto tra produzione energetica e ambiente è da considerarsi su scala globale. Inoltre, è da considerarsi l'aumento costante della popolazione, che segue una legge esponenziale a partire dal 1600 con la scoperta del metodo scientifico ed in seguito con la rivoluzione industriale, che ha ridotto la mortalità e ha comportato sviluppo economico e demografico. Questo ha avuto effetto anche sui consumi energetici, aumentati anch'essi; negli ultimi 150 anni l'aumento è stato esponenziale.

Rendimento-Potenza

Rendimento: indice della conversione della fonte energetica in energia utilizzata (più alto è meglio). Alla crescita dei consumi energetici si è assistito ad un progressivo aumento dei rendimenti, per via tanto dell'esaurimento di alcune fonti energetiche, quanto delle normative ambientali introdotte nel tempo.

Potenza: quanto deve essere prodotto per soddisfare una specifica richiesta. Si misura in kW, il kWh è un'unità di misura dell'energia. La potenza è importante sia in valore assoluto, per quanto detto sopra, sia in termini di potenza specifica (riferita ad unità di massa o volume di fluido, ad es) in determinate applicazioni.

Impatto ambientale: effetto del sistema energetico sull'ambiente circostante; risulta molto importante al giorno d'oggi, specie sul piano economico e normativo. Si parla di interazione del sistema energetico con l'"ecosistema terra" costituito da terra, acqua ed aria. È importante monitorare l'impatto ambientale oggi (2015).

Energia elettrica

L'energia elettrica è difficile da stoccare. È possibile accumularne mediante opportuni bacini idroelettrici, batterie elettrochimiche, condensatori o induttori, sotto forma di energia elettrostatica o elettromagnetica; ciononostante, non è possibile stoccare grandi quantità. Questo comporta la necessità di un uso praticamente immediato dell'energia dopo la sua produzione. Sono ammessi degli eccessi di un certo quantitativo di energia, purché non risenta la rete elettrica (la frequenza di rete deve rimanere costante, 50-60Hz).

Il fabbisogno energetico non viaggia di pari passo con la produzione di energia nei vari paesi. Qualora la produzione energetica sia in deficit, si ovvia a ciò mediante l'importazione di energia da terzi, come nel caso dell'Italia (raddoppio dei consumi energetici in 25 anni circa). Recentemente l'introduzione degli impianti cogenerativi ha portato ad un aumento della produzione di energia.

Impianti di produzione energetica italiani

Idroelettrici: sfruttano l'energia potenziale dell'acqua accumulata in bacini, esistono impianti di pompaggio che vengono impiegati come veri e propri sistemi di accumulo di Energia. Gli impianti idraulici si suddividono in:

- impianti a serbatoio, accumulano acqua per produrre energia qualora necessario. La produzione è regolabile su base stagionale e pluriennale.
- impianti a pompaggio, la produzione di energia avviene durante il giorno, mentre la notte, costando di meno l'energia, lo stesso impianto viene alimentato da corrente esterna per il ripompaggio dell'acqua alla quota precedente la produzione energetica. La macchina usata (motrice-operatrice) ha un'efficienza intorno al 70%.
- impianti a bacino, la cui produzione è regolabile su scala settimanale o giornaliera
- impianti ad acqua fluente, producono energia in modo continuato, dipendono dal flusso d'acqua di alimentazione dell'impianto.

Produzione da fonti alternative:

Energia eolica – fonte rinnovabile ma poco controllabile, "funziona solo se c'è vento", è di difficile gestione, un eventuale sovraccarico di energia nuoce alla rete.

Idroelettrico (vedi sopra)

Biomasse – combustione di rifiuti. Particolarmente ostico al giorno d'oggi, è necessario non produrre diossina dalla combustione del PVC (la diossina si distrugge a 1800°C), si devono eliminare i metalli pesanti (Hg, Cd, V) che non bruciano in combustione, dev'essere prodotta meno CO possibile, in quanto tossica e inodore.

Biodiesel/bioliquidi – combustione ottenuta da sostanze derivate da esteri metilici. Diversi dai biogas, i quali si ottengono da fermentazione anaerobica (gas di discarica)

Geotermico a bassa temperatura- utilizzato per la maggiore come impianto di riscaldamento tramite pompe di calore, può essere usato per produrre energia (Toscana).

Fotovoltaico – produce grandi quantitativi di energia, ma in momenti concentrati della giornata, costringe altri impianti a produrre meno energia durante il suo funzionamento, onde evitare sovraccarichi sulla rete (gestione complessa).

Termoelettrico:

Impianti termonucleari – alto costo dell'impianto, basso costo di esercizio; rendimenti inferiori al 40%, ma potenza elevata, oltre i 1000 MW

Impianti termoelettrici tradizionali (cicli vapore) - potenza elettrica molto elevata, rendimenti inferiori al 40%; combustibili carbone (5000MW) o olio combustibile (7000MW) (combustibili in esaurimento).

Turbogas - rendimento inferiore al 40%, potenza massima fino a 250MW, fino agli anni '70 erano usati solo per coprire carichi di punta, oggi non più.

Cicli combinati – rendimenti fino al 60%, sempre più usati; potenza fino a 400 MW per unità.

Generazione distribuita: generare in prossimità del luogo di consumo, integrando anche il calore (freddo) – poligenerazione.

Risparmio Energetico: riduce il consumo di combustibile e l'impatto ambientale. Soluzione "socialmente" da introdurre non solo tecnologicamente.

4-Classificazione macchine

Macchina: apparato meccanico con eventuali ausiliari atto alla conversione di energia dalle fonti primarie a forme più accessibili

Macchina a fluido: macchina che realizza uno scambio energetico mediante un apposito fluido di lavoro

1) Classificazione in base al tipo di scambio energetico:

Macchine operatrici – usano energia per aumentare quella del fluido (ad es, quella potenziale)

Macchine motrici – convertono energia primaria (del fluido) in energia meccanica

2) Classificazione in base al fluido di lavoro

Macchine idrauliche – operano su fluidi incomprimibili con variazioni di temperatura trascurabili. Se presenti, sono dovuti a dissipazioni per attrito e non a scambi termici voluti. Poiché vi è poca differenza di temperatura, anche gli effetti dissipativi sono ridotti. La macchina produce grazie alla differenza di energia potenziale del fluido.

Macchine termiche – operano su fluidi comprimibili, mediante scambi termici, di conseguenza sono soggette a variazioni notevoli di temperatura (la temperatura alta comporta un'entalpia elevata nel fluido). Le variazioni di energia potenziale sono invece trascurabili.

(esempio: turbina idraulica e turbina a gas; la prima è una macchina idraulica, la seconda una macchina termica)

3) Classificazione in base al moto degli organi meccanici (quelli preposti allo scambio energetico con il fluido)

Macchine rotative – con componenti rotanti, possono operare con grandi portate e ad alta velocità; il funzionamento è continuo e il limite della macchina è dato dalla sua resistenza alla forza centrifuga, le forze d'inerzia sono costanti nel tempo.

Macchine alternative – presentano componenti in moto alternato tra due posizioni, presentano andamento discontinuo e variabile nel tempo, operano quindi con velocità del fluido evolvente ridotta e con basse portate (rispetto alle macchine rotative)

4) Classificazione in base al regime di funzionamento

Macchine discontinue (o volumetriche)- solitamente alternative, il lavoro varia in modo discontinuo e si susseguono nello stesso volume diverse fasi del ciclo di funzionamento, introducendo porzioni di fluido in un volume della macchina; esempio – compressori alternativi, fanno uso di un pistone per aspirare e comprimere l'aria.

Macchine dinamiche (o turbomacchine) – il fluido e la macchina sono a contatto continuo e il lavoro viene prodotto appunto con continuità; solitamente si tratta di macchine rotative, in cui ogni componente è predisposta a una determinata fase del ciclo

Classificazione Turbomacchine

In base al percorso del fluido

- Turbomacchine assiali: il flusso prevalente del fluido è in direzione parallela all'asse della macchina; facilita la disposizione di più stadi consecutivi (disposizione multistadio)

- Turbomacchine radiali: il flusso prevalente del fluido ha direzione radiale, consente di massimizzare lo scambio energetico nel singolo stadio

- Turbomacchine a flusso misto: il flusso prevalente è asso-radiale, unisce gli effetti delle precedenti due tipologie di turbomacchina

- Turbomacchine a flusso periferico: il flusso prevalente è tangenziale rispetto alla struttura della macchina; si presenta in poche applicazioni, la più nota è la turbina idraulica Pelton

Turbine idrauliche

.Turbina Pelton : flusso tangenziale, opera con grandi salti di quota o con grandi portate, eventualmente con ugello regolabile

.Turbina Francis: è una turbomacchina, spesso con pale regolabili

.Turbina Kaplan

Per quanto riguarda le pale della turbina, occorre prevenire il fenomeno della cavitazione, ovvero la formazione di bolle d'aria o gas all'interno della turbina, che possono danneggiare o rompere le pale; nel caso di turbine a vapore, occorre prevenire una condensazione incontrollata: le gocce d'acqua che si possono formare, urtando le pale della turbina, possono romperle nella fase di espansione del fluido.

Le turbine a gas, invece, sono più simili, in linea di massima, a dei serbatoi in pressione con alta temperatura.

Nelle macchine energetiche il fluido evolvente può essere liquido, vapore o gas per le macchine motrici, liquido o gas nelle macchine operatrici.

Nei cicli a gas solitamente si adottano macchinari in grado di compiere numerosi stadi di compressione, mentre si presenta una espansione relativamente ridotta, in quanto quest'ultimo processo è favorito naturalmente (deflusso da pressioni alte a pressioni basse); il compressore invece opera al contrario rispetto al processo naturale, di conseguenza richiede più stadi di compressione e dimensioni del macchinario maggiori. Il compressore può essere assiale, centrifugo e radiale, oppure centrifugo asso-radiale; il compressore è una macchina operatrice dinamica e idraulica; può essere sia rotativa, che alternativa, nella seconda per comprimere il fluido si fa uso solitamente di un pistone.

Funzionamento generico di una turbina

Un 'impianto' con turbina è caratterizzato dall'insieme di compressore, anche a più stadi, camera di combustione e turbina; spesso i vari organi vengono calettati sullo stesso albero.

Il fluido evolvente viene introdotto nel compressore dall'esterno (solitamente aria o acqua), per poi passare in camera di combustione, dove riceve calore dalla reazione del combustibile. In seguito il fluido passa in turbina per l'espansione e viene rilasciato verso l'esterno, qualora sia possibile (nei cicli Brayton – Joule aperti il fluido evolvente è l'aria dell'atmosfera che viene rilasciata).

Tipologie di turbina a gas:

- Turbogetto (turbo jet)
- Turboelica (turboprop)
- Turboventola (turbofan)
- Afterburning turbojet

5-Combustibili e combustione

-Combustione

Si definisce rendimento di combustione il rapporto tra l'energia ottenuta dalla combustione e l'energia presente in teoria nel combustibile, data dal prodotto della massa (in kg) per il potere calorifico (MJ/kg).

Non è possibile al giorno d'oggi effettuare una combustione senza prevedere un recupero energetico di sorta.

La potenza termica data dalla combustione è espressa dal prodotto del potere calorifico del combustibile (kJ/kg) per la portata in massa di quest'ultimo (kg/s).

-Combustibile

Il combustibile viene di norma messo in relazione con la sua temperatura e/o pressione in determinate condizioni di misura; si parla dunque di 'standard metri cubi' o di 'normal metri cubi' o ancora 'standard-normal metri cubi', ad indicare le diverse condizioni di temperatura e pressione al variare del metodo di misurazione del volume di combustibile.

Il potere calorifico del combustibile è fortemente influenzato dall'umidità: un combustibile secco brucerà subito (condizione ottimale), un combustibile umido dovrà prima seccare (potere calorifico diverso, anche se si tratta dello stesso materiale). Il potere calorifico viene valutato sulla base di prelievi del materiale da impiegare come combustibile; nel caso di combustibili solidi, è necessario tener conto del fattore umidità legato alle circostanze del prelievo, per quanto detto sopra; nel caso di combustibili liquidi il prelievo deve essere effettuato in modo tale da garantire una soluzione liquida uniforme e concorde con le normative vigenti.

Tipologie di combustibile:

- .combustibili solidi – carbone, la cui qualità dipende dal sito da cui viene prelevato; biomasse;
- .combustibili liquidi – Kerosene, costoso e a basso contenuto di zolfo, usato per lo più in ambito aeronautico; Gasolio, come il kerosene ma più economico (leggermente più zolfo); Olio combustibile, ottimo, ma contiene derivati tossici quali Hg e V, scarti che prima non venivano considerati (oggi non è legale utilizzare combustibili con derivati tossici)
- .combustibili gassosi – LNG (liquid natural gas); C2+, ad alto contenuto di carbonio, ma è pesante; gas naturale, le cui caratteristiche variano in base al sito in cui si effettua il prelievo
- .combustibili da recupero – ottenuti da processi chimici diversi, quali i gas da siderurgica (con basso potere calorifico) o i gas da raffinaria
- .combustibili non convenzionali – syngas, gas ottenuto dagli scarti di raffinaria (esempio)

La CO₂ di natura non è un combustibile, per rendere questa sostanza partecipe del processo di combustione (e usare quindi il carbonio in esso contenuta) è necessario impiegare dell'idrogeno, non presente in natura e molto

complicato da produrre. La sostanza con la percentuale più alta di idrogeno nella sua composizione chimica è il metano (CH₄).

L'idrogeno non è propriamente un combustibile, in quanto non perviene a combustione. È considerato un vettore energetico, poiché ad esso competono i trasferimenti di energia (l'energia prodotta in eccesso da una centrale può essere "immagazzinata" producendo idrogeno, da utilizzare in reazione con CO₂ per recuperare energia); l'idrogeno viene prodotto artificialmente mediante trattamento di fossili o reazioni di idrolisi. Viene impiegato in alcuni combustibili, come nell'idrazina (propulsione dei razzi).

Le ceneri prodotte dalla combustione non sono a loro volta combustibile, ma possono passare di fase per l'applicazione di calore; è necessario non disperdere troppe ceneri nell'ambiente circostante la sede ove avviene la combustione.

Per la valutazione delle caratteristiche di un combustibile, ci si può riferire a un relativo nomogramma statistico, che pone in relazione il potere calorifico e la percentuale di volatile ottenuti dall'analisi approssimata del combustibile con le percentuali di idrogeno e carbonio del combustibile stesso. Idrogeno e ossigeno sono elementi positivi nei fenomeni di combustione, mentre il loro composto H₂O (acqua) inibisce la combustione e abbassa il potere calorifico mediante umidità. Convenzionalmente, per ricavare il tenore di ossigeno contenuto in un combustibile, occorre conoscere il tenore delle altre sostanze, ricavando così l'ossigeno dal completamento a 100.

NH₄ e CO₂ non sono combustibili, assorbono calore e temperatura, rallentando i processi di combustione. Dal tenore di NH₄ ricavo la % (in media) di N presente nelle ceneri.

Calcoli stechiometrici nella combustione:

Massa minima di ossigeno comburente - massa di ossigeno ottenuta mediante calcoli stechiometrici a partire dalla reazione chimica di combustione, è utile calcolarla per determinare l'efficienza di alcune tipologie di impianto

Aria stechiometrica: 79% N₂, 21% di O₂. È l'aria che serve nei calcoli stechiometrici affinché avvenga la combustione.

Aria secca: O₂, N₂; Aria umida: N₂, H₂O

Eccesso d'aria: quantitativo d'aria in aggiunta, che dipende dalla forma della camera di combustione; o brucia o fuoriesce dalla camera, in ogni caso la si perde.

Massa fumi: $a+1-R$, R è il residuo di ceneri per unità di combustibile.

Legge di Hess-Laplace

La ΔH di reazione è data dalla somma algebrica delle ΔH dei singoli componenti di reazione

$$\Delta H_{\text{reazione}} = \Delta H_f \text{ prodotti} - \Delta H_f \text{ reagenti}$$

Formula di Dulong

La formula di Dulong è una formula empirica per il calcolo del ΔH superiore associato alla reazione di combustione

$$\Delta_c H_s^\circ = 32,79 \text{ MJ/kg } w(C) + 150,4 (w(H) - w(O)/8) + 9,26 w(S) + 4,97 w(O) + 2,42 w(N)$$

Ove $w(i)$ è la frazione massica dell'*i*-esimo elemento in combustione (O=ossigeno, H=idrogeno, C= carbonio, N=azoto, S=zolfo).

6 – Rendimenti

I rendimenti sono indice della conversione energetica. Più è alto il rendimento, maggiore sarà, a parità di potenza impiegata, la potenza convertita. Questo ha effetti sul costo dell'impianto energetico: un generico sistema energetico (il cui costo solitamente viene valutato in €/kW) prevede dei costi fissi e dei costi in funzione del tempo. I costi fissi sono legati al costo delle apparecchiature utilizzate e alle tasse del paese ove viene costruito l'impianto, si distribuiscono nel tempo e vengono ammortizzate dalla produzione; i costi variabili sono legati all'utilizzo annuo dell'impianto. Maggiore sarà il rendimento dell'impianto, minore il costo annuo dello stesso; impianti con rendimento più elevato sono più convenienti e con migliori prestazioni.

Generalmente, più un impianto è di grandi dimensioni, più il suo costo è basso, relativamente alla produzione.

I rendimenti si suddividono in:

- rendimento di Carnot
- rendimento ideale
- rendimento del ciclo limite
- rendimento reale
- rendimento interno

Il rendimento di Carnot (<1) è irrealizzabile ed è il limite massimo ai rendimenti ideali, si realizza nel modo più semplice: ciclo termodinamico con due scambiatori di calore (sorgente/pozzo).

Il ciclo ideale dipende dalle trasformazioni ideali ed ha un rendimento minore o uguale a quello di Carnot, mai superiore.

Il ciclo limite, a differenza dei due precedenti che operano con fluidi e macchine ideali, fa uso di fluido reale e macchine ideali: rappresenta il limite massimo raggiungibile mediante conoscenze tecnologiche, usando un fluido le cui proprietà sono "reali" e dipendono dal sito dove lo si preleva; il suo rendimento è sempre minore di un qualsiasi rendimento ideale.

il rendimento del ciclo reale è associato all'uso di macchine e fluidi reali, ed è sempre strettamente minore del rendimento del ciclo limite; è l'unico ciclo realizzabile.

Il rendimento interno è il rapporto tra il rendimento reale e quello ideale, valutato su una singola macchina; è indice della funzionalità di quest'ultima.

Ausiliari d'impianto

Ausiliari: componenti secondari dell'impianto che competono al funzionamento del ciclo termodinamico (sono spesso necessari)

Gli ausiliari provocano perdite sul rendimento globale dell'impianto, ciononostante vanno comunque inseriti per garantirne il funzionamento.

Il collegamento degli ausiliari può avvenire in due modi:

.prelevando parte dell'energia elettrica da mandare in rete – in tal modo si usa la rete come un accumulatore di energia, prelevando da essa quanto necessario ai co-impianti; si riduce il numeratore del rendimento globale (energia prodotta);

.ricevendo energia da una fonte esterna per alimentare gli ausiliari – aumenta il denominatore del rendimento globale (si applica più energia);

Ausiliari d'impianto estremamente importanti per gli impianti a vapore:

turbopompa – azionata da uno spillamento in turbina, regola la pompa di alimento; utile perché la portata di alimento dipende dal numero di giri della pompa, può essere anche di qualche MW;

degasatore – è uno scambiatore rigenerativo a miscela; elimina dal fluido gli in condensabili (nocivi per l'impianto a vapore, H₂, O₂, Aria, N); è un componente fondamentale.

7 – Cicli vapore

Entalpia ed entropia vengono misurate in base a delle variazioni, non esistono strumenti specifici ad oggi per misurarle (non esistono entalpometri o entropometri).

Nei diagrammi di stato, il punto critico rappresenta le condizioni termodinamiche tali da definire un passaggio di stato istantaneo.

È possibile incrementare il rendimento del ciclo Rankine (ciclo motore a vapore):

- Agendo sulla pressione al condensatore
- Agendo sulla pressione in caldaia
- Agendo sulla temperatura del vapore surriscaldato

Pressioni più basse al condensatore determinano un maggiore salto entalpico per l'espansione, consentendo di ottenere più energia dalla trasformazione; si abbassa la temperatura di saturazione del fluido (equazione di Clapeyron); diminuisce il calore da scaricare mediante il condensatore; si abbassa il titolo del fluido evolvente; tuttavia, il punto di fine trasformazione coincide con l'ingresso al condensatore, è necessario prevedere una temperatura del fluido superiore a quella ambiente, in modo da effettuare lo scarico del calore.

Il condensatore è il componente dell'impianto a contatto diretto con l'ambiente esterno, dipende dunque dalle condizioni ambientali.

Pressioni più alte nel vaporizzatore definiscono effetti minori rispetto alla pressione al condensatore, specie per alti valori di pressione (dall'equazione di Clapeyron); alza la temperatura media a cui si converte energia, migliorando l'efficienza del ciclo; se combinato con la regolazione della pressione al condensatore, occorre innalzare la temperatura massima di operatività del ciclo, così da non abbassare troppo il titolo del fluido in espansione (liquido in turbina a gocce ad alta velocità).

L'aumento della temperatura di esercizio migliora l'efficienza (e il rendimento) dell'intero impianto; non si devono eccedere soglie troppo elevate previa la formazione di ossidi a caldo nelle tubazioni e l'inaffidabilità del vapore.