

10.11 Conservazione, forme e conversione dell'energia

Cuore del nostro studio saranno i due principi della termodinamica (*the two laws of thermodynamics*). Il *primo* riguarda la conservazione dell'energia (*conservation of energy*): l'energia, anche se esiste in una molteplicità di forme e può convertirsi da una forma a un'altra, si conserva. Il *secondo* principio stabilisce dei limiti (*limits*) nella quantità di calore (*heat*) che può essere convertito in lavoro (*work*) da sistemi che promuovono le trasformazioni di energia per mezzo di ciò che noi chiameremo un ciclo (*cycle*). Calore e lavoro sono mezzi nei quali l'energia può venire trasferita da una regione a un'altra. Ma sono tra loro diversi: nel caso del calore, il trasferimento di energia (*energy transfer*) è causato da una differenza di temperatura tra regioni; come lavoro possiamo invece rimanere al concetto familiare di una forza che agisce su una distanza. Esamineremo più avanti questi due concetti; al momento ciò che è bene tenere a mente è che calore e lavoro sono meccanismi (*mechanisms*) per trasferire energia e che non potranno mai venire collegati a qualsiasi forma di energia immagazzinata.

Le diverse *forme*, in cui si manifesta l'energia, vengono classificate sulla base della loro caratteristica fisica o della loro origine. La *Figura 10.11* raccoglie le forme di energia di maggiore interesse in uno schema semplice e mostra i processi di conversione (*conversion*) che avvengono per passare da una forma a un'altra.

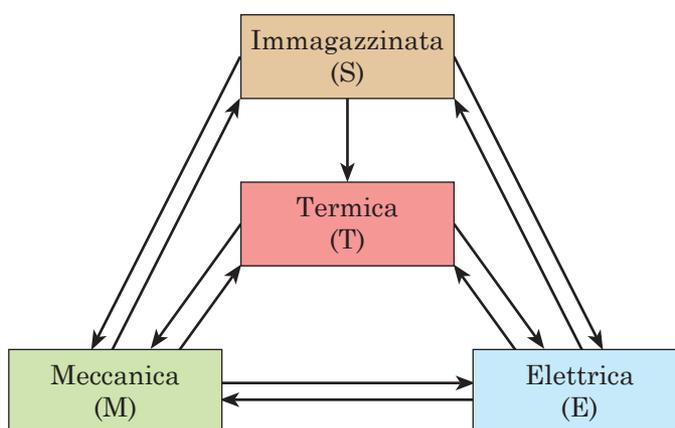


Fig. 10.11 - Il triangolo dell'energia. I quattro rettangoli individuano differenti forme di energia; le frecce indicano le conversioni nel passare da una forma a un'altra. Anche se nel passare da una forma a un'altra le conversioni non possono mai essere complete, l'energia si conserva.

Come esempi delle diverse forme di energia **immagazzinata** (*Stored energy*), si può citare l'energia:

- *chimica* contenuta nei combustibili, che viene rilasciata durante la combustione, e quella *elettrochimica* delle batterie;
- *nucleare*, che viene rilasciata durante la fissione;
- *dell'acqua* dietro la diga di un impianto idroelettrico;
- *solare*, che può essere ulteriormente suddivisa in energia *irradiata* dal Sole e utilizzata con pannelli *fotovoltaici*, ed energia del *vento*, delle *onde* e dei combustibili da *biomassa*;
- *geotermica* presente nelle profondità della Terra.

L'energia **termica** (*Thermal energy*) è la forma di energia posseduta da qualsiasi corpo che abbia una temperatura T superiore allo zero assoluto ($T = 0$ K); lo zero assoluto è la temperatura più bassa che teoricamente si può ottenere in qualsiasi sistema. Il teorema di

Nernst, chiamato anche terzo principio della termodinamica, afferma che serve una quantità di energia infinita per raffreddare un corpo fino allo zero assoluto. Così la temperatura dello zero assoluto non potrà mai essere raggiunta. Il posto più freddo finora conosciuto, con una temperatura di soli $-272\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1 K), è la nebulosa Boomerang (nella costellazione del Centauro) che dista 5000 anni luce dalla Terra.

La quantità di energia termica posseduta da un corpo è legata all'ampiezza di oscillazione delle molecole: le oscillazioni sono più ampie a temperature elevate e si riducono a temperature inferiori. L'energia termica rappresenta sia l'energia immagazzinata in una regione ad alta temperatura sia l'energia che può essere trasferita come calore a oppure da una regione. Il *calore* è quindi una via per trasferire energia e, come tale, non può essere associato a una qualsiasi forma di energia immagazzinata.

L'energia **meccanica** (*Mechanical energy*) è la somma di *energia potenziale* (*potential energy*), energia posseduta da un corpo per effetto della sua altezza rispetto a un punto di riferimento, ed *energia cinetica* (*kinetic energy*), energia posseduta da un corpo in movimento. L'energia potenziale iniziale di un corpo, lasciato libero in un campo soggetto all'azione della gravità e in assenza di resistenza provocata dall'attrito dell'aria, a mano a mano che cade si trasforma in energia cinetica (cresce la velocità), mentre la somma delle due energie rimane la stessa. Si può esemplificare l'energia meccanica con il lavoro fornito dall'albero di un motore o di una turbina oppure con il lavoro assorbito da una pompa. Anche il lavoro, come il calore, è un meccanismo per trasferire energia e non può essere associato all'energia immagazzinata.

L'energia **elettrica** (*Electric energy*) può essere fornita da un generatore o da una batteria oppure assorbita da un motore elettrico. L'energia elettrica è la forma più diffusa di energia, avendo il rendimento più alto quando trasportata in grande quantità su lunghe distanze (*Figura 10.12*).

Il passaggio da una forma di energia a un'altra può avvenire per *conversione diretta* (*direct conversion*) dell'energia con rendimenti piuttosto elevati, anche superiori al 70%. Un esempio è rappresentato dagli aerogeneratori (*wind turbines*) della *Figura 10.9-b*: l'energia immagazzinata (S), associata alla velocità del vento, viene convertita prima in energia meccanica (M) al passare del vento attraverso le pale di un rotore fissato su un albero e quindi mediante un moltiplicatore di giri viene trasferita al generatore elettrico (E), seguendo il percorso $S \Rightarrow M \Rightarrow E$.



Fig. 10.12 - Elettrodotti per il trasporto dell'elettricità. Le linee di trasmissione ad altissima e alta tensione in kV (kilovolt) – 380 kV, 220kV e 132 kV – sono linee aeree, con due o più conduttori mantenuti a una certa distanza da tralicci metallici e sospesi a questi ultimi mediante isolatori. L'elettricità ad alta tensione viene trasportata da una o più terne di conduttori fino alle cabine primarie di trasformazione, poste in prossimità dei centri urbani, nei quali il livello della tensione viene abbassato tra i 5 e i 20 kV (media tensione). L'elettrodotto va posto a una determinata distanza dall'abitato per evitare il campo elettromagnetico generato dal passaggio della corrente elettrica.

Un esempio analogo è quello delle turbine idrauliche; in questo caso è possibile fare il percorso inverso $E \Rightarrow M \Rightarrow S$ facendo uso delle macchine reversibili che possono utilizzare l'energia elettrica (E) per pompare (M) l'acqua che viene immagazzinata in un bacino (S) durante la notte in modo da far fronte ai picchi di richiesta di energia elettrica durante il giorno. Le pile a secco di una radio trasformano l'energia chimica immagazzinata (S) in energia elettrica (E), ma non sono ricaricabili e quindi, una volta scariche, devono essere gettate via. Al contrario gli accumulatori, come le batterie delle automobili, sono invece ricaricabili, sono cioè capaci di convertire l'energia chimica in energia elettrica ($S \Rightarrow E$) e viceversa ($E \Rightarrow S$).

I sistemi che operano in modo ciclico (un ciclo va pensato come una serie di operazioni che vengono ripetute periodicamente in modo regolare) nel convertire l'energia termica in energia meccanica si chiamano motori termici (*heat engines*). Diversamente dalla conversione diretta, il motore termico per poter trasformare l'energia termica (T) in lavoro meccanico (M) deve effettuare un ciclo (*conversione ciclica*), sottraendo cioè calore da una sorgente ad alta temperatura e cedendo calore a una sorgente a bassa temperatura. Esempi di sistemi, che operano secondo un ciclo, sono gli impianti di generazione del vapore per la produzione di elettricità e il comune frigorifero domestico. Nel ciclo combinato della *Figura 10.13*, costituito dall'accoppiamento in cascata di un ciclo a gas e di un ciclo a vapore, il calore di scarto del primo diventa il calore disponibile per il secondo: le trasformazioni sono $S \Rightarrow T \Rightarrow M \Rightarrow E$ sia nella parte gas sia nella parte vapore con la sola differenza che l'energia immagazzinata (S) è, nel caso del gas, quella del combustibile che viene iniettato nel combustore, mentre, nel caso del vapore, è l'energia ancora presente nei gas di scarico della turbina.

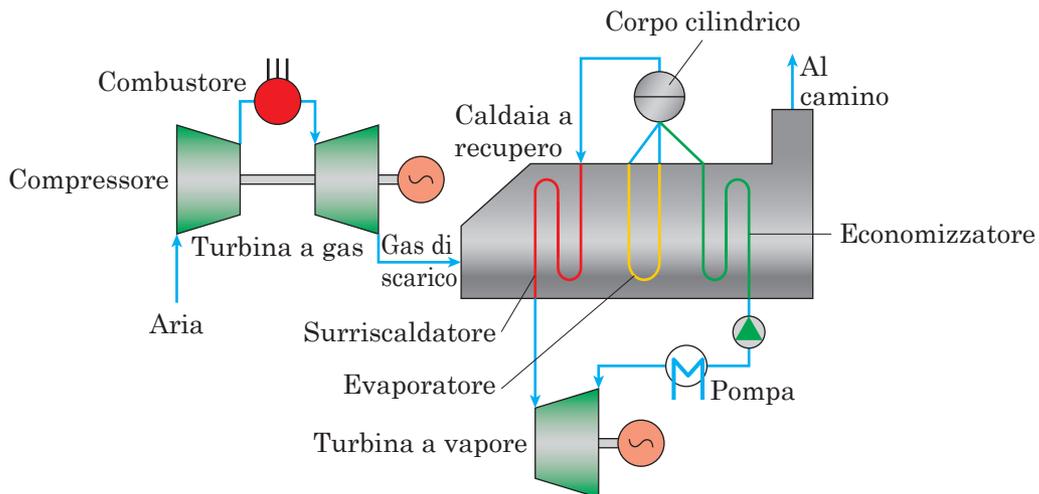


Fig. 10.13 - Schema impiantistico di un ciclo combinato gas-vapore nella sua forma più semplice (ENI – *Enciclopedia degli idrocarburi*, Edizioni Treccani). Nella sezione con turbina a gas, prima si comprime l'aria, poi avviene la combustione dell'aria con il combustibile iniettato, quindi i gas ad alta temperatura vengono fatti espandere nella turbina generando elettricità e poi scaricati nel corpo grigio a destra per fornire energia al ciclo a vapore. Nella sezione vapore, l'acqua viene mandata dalla pompa nella caldaia a recupero dove subisce un primo riscaldamento entrando nell'economizzatore (questo si trova nella zona a temperatura più bassa perché opposta all'ingresso dei gas di scarico dalla turbina a gas); quindi passa nel corpo cilindrico, dove sono presenti acqua nella parte inferiore e vapore nella parte superiore; poi con successivi passaggi nei gas sempre più caldi (linea gialla) aumenta la parte vapore; da ultimo il vapore, che ha aumentato la propria energia (linea rossa) passando nella parte prossima all'ingresso dei gas scaricati dalla turbina a gas, viene fatto espandere nella turbina a vapore generando elettricità.

Così la temperatura dei gas scaricati nell'atmosfera non è più quella dell'uscita dalla turbina a gas (500 °C ÷ 600 °C), bensì quella all'uscita della caldaia a recupero (non più di 100 °C ÷ 130 °C) del ciclo a vapore con un sensibile miglioramento del rendimento complessivo del processo.

I rendimenti degli impianti a gas e a vapore, presi ciascuno per proprio conto, sono piuttosto bassi: possono andare dal 34 al 40%; il rendimento dell'impianto combinato gas - vapore è decisamente più alto (57% ÷ 58%). Anche nel caso migliore, una notevole frazione dell'energia termica fornita (più del 40%) non viene convertita in lavoro. A questo punto nasce la domanda: perché non è possibile convertire una maggiore quantità dell'energia termica in lavoro?

10.12 Exergia

Abbiamo appena visto che il primo principio della termodinamica stabilisce l'equivalenza tra le diverse forme di energia, affermando che l'energia, durante una trasformazione, non può essere distrutta, ma può solo cambiare da una forma a un'altra. Il secondo principio della termodinamica invece fissa dei limiti entro i quali una forma di energia può essere trasformata in un'altra; le irreversibilità, insite nelle trasformazioni reali, sono infatti l'origine di quella degradazione dell'energia che riduce il lavoro meccanico estraibile dalla trasformazione ideale.

Exergia è quella frazione di energia, appartenente a una certa forma, che può essere trasformata completamente in ogni altra forma. Il termine *exergia*, suggerito da Zoran Rant nel 1956, è tratto dal greco e significa "dal lavoro" (*ex ergon*). La terminologia inglese è equivalente all'italiana: *exergy* per *exergia* e *anergy* per *anergia*.

Anergia è invece la frazione non più trasformabile. Così la somma di *exergia* e *anergia* dà l'energia disponibile da una data trasformazione (primo principio) e, se il processo è reversibile, l'*exergia* rimane costante (secondo principio).

Il rapporto tra *exergia* ed energia può essere considerato una misura della qualità dell'energia: forme di energia, come l'energia elettrica che, al limite, possono essere recuperate al 100% come lavoro, vanno considerate *exergia* pura, mentre altre forme, come l'energia termica, non possono essere convertite completamente in lavoro e hanno perciò un contenuto di *exergia* inferiore al contenuto di energia.

Si consideri, come esempio, una sorgente di calore ad alta temperatura (*High temperature*) $T_H = 2000$ K, che scambia energia sotto forma di calore ($q_H = 1000$ kJ/kg) con un motore termico, il quale a sua volta cede calore a una sorgente a bassa temperatura (*Low temperature*) $T_L = 300$ K (Figura 10.14). Nell'Unità 30 sui cicli termodinamici verrà ricavata l'espressione del rendimento massimo teorico (è quello del ciclo di Carnot) in funzione della temperatura ($\eta_{\max} = 1 - T_L/T_H$), rendimento corrispondente alla massima frazione di calore che un motore può convertire in lavoro; ricordando che (10-1) il rendimento è il rapporto tra lavoro ottenuto e calore entrante ($\eta_{\max} = w_{\max}/q_H$), si può esprimere il lavoro massimo w_{\max} come prodotto del rendimento per il calore ($w_{\max} = \eta_{\max} \cdot q_H$).

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{300 \text{ K}}{2000 \text{ K}} = 0,85 \qquad w_{\max} = \eta_{\max} q_H = 0,85 \times 1000 \text{ kJ/kg} = 850 \text{ kJ/kg}$$

Si consideri poi una sorgente alla temperatura $T_H = 750$ K, che scambia sempre la quantità di calore $q_H = 1000$ kJ/kg con un motore che cede, a sua volta, calore alla temperatura T_L ancora uguale a 300 K:

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{300 \text{ K}}{750 \text{ K}} = 0,60$$

$$w_{\max} = 0,60 \times 1000 \text{ kJ/kg} = 600 \text{ kJ/kg}$$

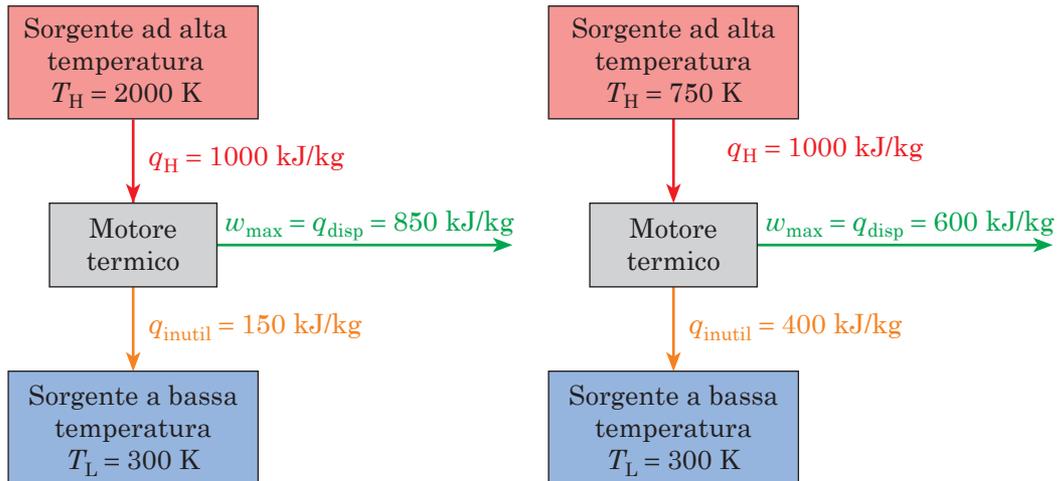


Fig. 10.14 - L'energia disponibile è in ambedue i casi $q_H = 1000$ kJ/kg, ma nel primo caso ($T_H = 2000$ K) l'exergia vale 850 kJ/kg e l'anergia è pari a 150 kJ/kg, mentre nel secondo caso ($T_H = 750$ K) exergia e anergia valgono rispettivamente 600 kJ/kg e 400 kJ/kg.

Risulta così che la stessa quantità di calore $q_H = 1000$ kJ/kg, fornita da una sorgente a 2000 K, è più utile nella produzione di lavoro meccanico ed è quindi di qualità più elevata della sorgente a temperatura più bassa (750 K); nel primo caso si ottiene infatti un lavoro massimo $w_{\max} = 850$ kJ/kg, mentre nel secondo caso il lavoro vale 600 kJ/kg. Si può perciò dire che l'exergia vale nel primo caso 850 kJ/kg e nel secondo caso 600 kJ/kg. Si può anche dire che l'anergia (la frazione di energia non più utilizzabile, differenza tra energia entrante $q_H = 1000$ kJ/kg ed exergia) è nel primo caso (1000 kJ/kg $-$ 850 kJ/kg = 150 kJ/kg) più bassa di quella del secondo caso (1000 kJ/kg $-$ 600 kJ/kg = 400 kJ/kg). Poiché l'exergia della quantità di calore q_H disponibile alla temperatura T_H è definita come il lavoro massimo che si può ottenere in una macchina che realizza un ciclo reversibile diretto come il ciclo di Carnot (o il lavoro minimo che si può spendere in un ciclo inverso) e che scambia calore q_H a temperatura T_H e scambia inoltre calore con l'ambiente esterno di riferimento a temperatura T_L .

L'exergia di un sistema è così il massimo lavoro meccanico w_{\max} estraibile da una trasformazione che porta il sistema in equilibrio con la sorgente alla temperatura ambiente T_L . Ricordando le equazioni utilizzate sopra per ricavare η_{\max} e w_{\max} , l'exergia e [kJ/kg] di una quantità di calore q_H si esprime con:

$$e = q_H \left(1 - \frac{T_L}{T_H} \right) \quad 10-4$$

dove T_H è la temperatura del sistema, mentre T_L è la temperatura finale del sistema quando è in equilibrio con l'ambiente. Una volta raggiunto l'equilibrio ($T_L = T_H$), l'exergia si annulla. Il termine tra parentesi $1 - T_L/T_H$ si chiama *fattore di Carnot*, mentre il prodotto $q_H (T_L/T_H)$ rappresenta l'*anergia* a [kJ/kg], essendo il risultato della differenza tra calore introdotto ed exergia:

$$a = q_H - e = q_H - q_H \left(1 - \frac{T_L}{T_H}\right) = q_H - q_H + q_H \left(\frac{T_L}{T_H}\right) = q_H \left(\frac{T_L}{T_H}\right) \Rightarrow a = q_H - e = q_H \left(\frac{T_L}{T_H}\right) \quad \mathbf{10-5}$$

In conclusione, l'utilità di una data quantità di energia termica nel produrre lavoro meccanico dipende non solo dalla quantità di energia a disposizione, ma anche dalla temperatura della sorgente dalla quale essa viene fornita. Si riconosce così che l'energia non ha tutta la stessa qualità o grado e che la degradazione dell'energia termica avviene naturalmente nel momento in cui l'energia termica viene trasferita a regioni a più bassa temperatura. Bisognerebbe allora evitare di consumare il combustibile fossile che produce alte temperature (oltre 2000 °C) e quindi energia di alto grado per produrre poi energie utilizzate a basse temperature e quindi di basso grado. Significativo è l'esempio dell'impianto termoelettrico in cui l'energia inutilizzata è, nel migliore dei casi, pari al lavoro prodotto (50%) e oltretutto viene dispersa come calore nell'acqua e nell'aria di raffreddamento dell'impianto con gravi danni all'ambiente. Questa enorme quantità di energia termica va recuperata sia per motivi di risparmio energetico sia per motivi di salvaguardia ecologica: è il tema che verrà affrontato nel *Paragrafo 10.14*.

10.13 Rendimenti degli impianti termici

I motori alternativi a combustione interna, e in particolare i motori ad accensione per compressione che seguono il ciclo Diesel (*Figura 10.15*), presentano i rendimenti più alti in assoluto tra tutte le macchine termiche; ciò è tanto più rilevante se si pensa che motori di potenza relativamente modesta (da 0,3 a 0,5 MW) impiegati sui veicoli pesanti stradali, che devono poter funzionare in condizioni variabili di carico e velocità di rotazione e allo stesso tempo devono soddisfare limiti molto severi di emissioni, vengono confrontati con impianti motori a vapore di potenza estremamente elevata (200 MW) sui quali, proprio per le dimensioni, sono consentiti risparmi notevoli per l'accentramento degli ausiliari e dei sistemi di abbattimento degli inquinanti.

Per renderci conto dei motivi che portano a rendimenti così diversi, confrontiamo l'impianto *motore a turbina a gas* con l'impianto *motore a vapore*. Il vantaggio fondamentale dell'impianto a vapore è rappresentato dal fatto che il fluido di lavoro si trova inizialmente in fase liquida e solo successivamente passa allo stato di vapore. Il lavoro richiesto per comprimere il liquido è molto piccolo rispetto al lavoro prodotto dall'espansione del vapore. Possono perciò essere tollerati rendimenti anche modesti nel processo di compressione del liquido fatto dalla pompa e nel processo di espansione del vapore che avviene in turbina. Al contrario, quando si vuole impiegare un fluido di lavoro che rimane in fase gassosa lungo tutto il ciclo, il processo di compressione del gas richiede una parte notevole del lavoro di espansione prodotto dalla turbina. Il basso rapporto tra lavoro di compressione del liquido e lavoro ottenuto in turbina è stato il motivo determinante nell'affermazione iniziale dell'impianto a vapore, come unica tecnologia in grado di produrre potenze elevate.

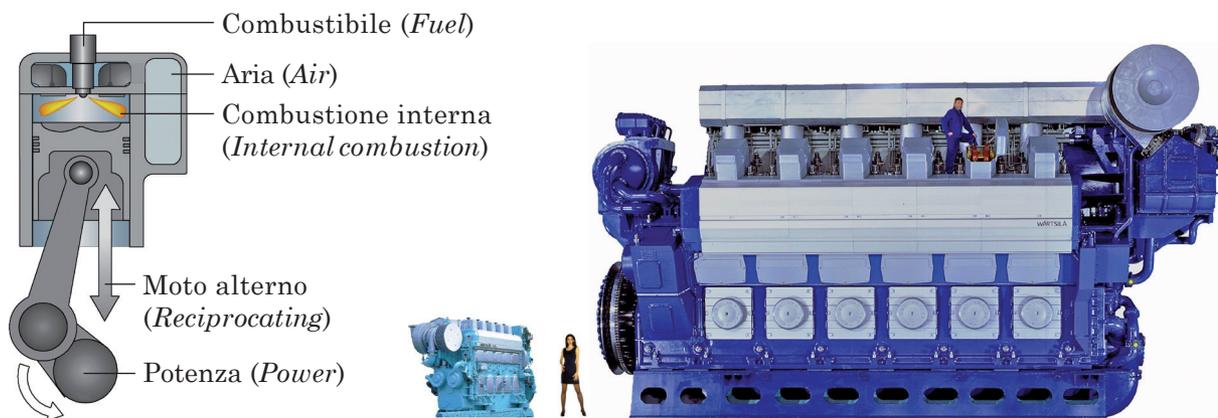


Fig. 10.15 - Schema di un motore ad accensione per compressione (ciclo Diesel) e motori Wärtsilä 5L20 (5 cilindri in linea) da 1 MW e 12V64 (12 cilindri a V) da 24 MW.

Confrontiamo adesso l'impianto *motore a turbina a gas* con il *motore alternativo a combustione interna*. In quest'ultimo sistema l'intervallo di temperatura, entro cui avviene il ciclo, è così ampio che il gas a bassa temperatura da comprimere è molto più denso del gas ad alta temperatura che viene fatto espandere e quindi il rapporto tra lavoro richiesto dalla compressione e lavoro prodotto dall'espansione è ancora basso. Inoltre nei motori alternativi a combustione interna è possibile raggiungere temperature estremamente elevate (fino a 2700 K), proprio perché il moto alternativo fa sì che le parti del motore affacciate alla camera di combustione vengano esposte a temperature tanto alte per tempi brevissimi; la struttura poi del motore alternativo è tale da intervenire con un raffreddamento efficace anche nelle parti più esposte. Al contrario, nella turbina a gas occorre limitare in modo drastico le temperature di ingresso in turbina in funzione delle caratteristiche di resistenza del materiale che costituisce la palettatura della turbina; esistono inoltre delle difficoltà di refrigerazione delle parti più esposte proprio a causa del moto rotante del sistema. Queste temperature massime, che nelle turbine a gas normali vengono solitamente limitate a $1300 \div 1350$ K mentre nelle turbine per impieghi militari, con sistemi di raffreddamento estremamente efficienti, possono arrivare fino a $1500 \div 1600$ K, sono ottenute lavorando con eccessi di aria elevati, cioè con una quantità di aria che, essendo maggiore di quanto richiesto dalla combustione completa (stechiometrica), è in grado di diluire i prodotti di combustione abbassandone la temperatura. In conseguenza delle più basse temperature massime, il sistema turbina a gas opera su un fluido che si trova a una massa volumica, durante la compressione, non molto diversa da quella che ha durante l'espansione. Ciò, a differenza del motore alternativo, porta a un valore elevato del rapporto tra il lavoro del compressore e quello della turbina e quindi solo con elevati rendimenti interni del compressore e della turbina è possibile ottenere un lavoro risultante sufficiente a garantire un rendimento globale ancora accettabile dell'impianto motore con turbina a gas.

A causa di problemi di fluidodinamica, è più difficile progettare un compressore efficiente che una turbina efficiente; fino al 1940 non si disponeva infatti di turbocompressori con rendimenti interni sufficientemente elevati da far sì che il lavoro risultante di tutto l'impianto (lavoro della turbina meno quello del compressore e degli ausiliari) fosse maggiore di zero. Da allora molti passi sono stati fatti nella tecnologia dei turbocompressori e

attualmente, per alcuni impieghi, gli impianti con turbina a gas sono competitivi con gli impianti a vapore e i motori alternativi a combustione interna.

I **rendimenti globali** raggiungibili con i tre sistemi sono dell'ordine di:

- 0,38 per impianti con turbina a gas; tale rendimento potrà essere migliorato nella misura in cui venga aumentata la temperatura massima del ciclo, cioè quella del gas all'ingresso in turbina;
- 0,40 per grossi impianti termoelettrici; questo valore del rendimento non può essere ulteriormente migliorato in quanto è limitato dal fatto che il fluido (cioè il vapore) lavora a temperature massime del ciclo piuttosto basse (≈ 900 K) e quindi il rendimento, per il secondo principio della termodinamica, non può essere molto alto. A ogni modo un rendimento globale di 0,40 rappresenta un valore molto buono che viene ottenuto perché questa è stata la prima tecnologia a svilupparsi e perché si lavora su impianti molto grandi;
- 0,55 in grossi motori Diesel che funzionano a regime fisso; questo valore è giustificato dalle altissime temperature del ciclo che possono essere tollerate dai materiali in quanto vengono raggiunte solo per brevissimi istanti nel ciclo;
- 0,58 è il rendimento conseguibile qualora venga accoppiato in cascata, in un ciclo combinato, il ciclo della turbina a gas con il ciclo a vapore (uno schema semplificato è mostrato nella *Figura 10.13*): l'energia termica presente nei gas scarico della turbina viene utilizzata come fonte di calore per l'acqua che viene fatta evaporare ed effettua un ciclo a vapore;
- 0,61 nel caso di ciclo combinato realizzato accoppiando in cascata un ciclo Diesel del motore ad accensione per compressione e un ciclo a vapore (*Figura 10.16*).

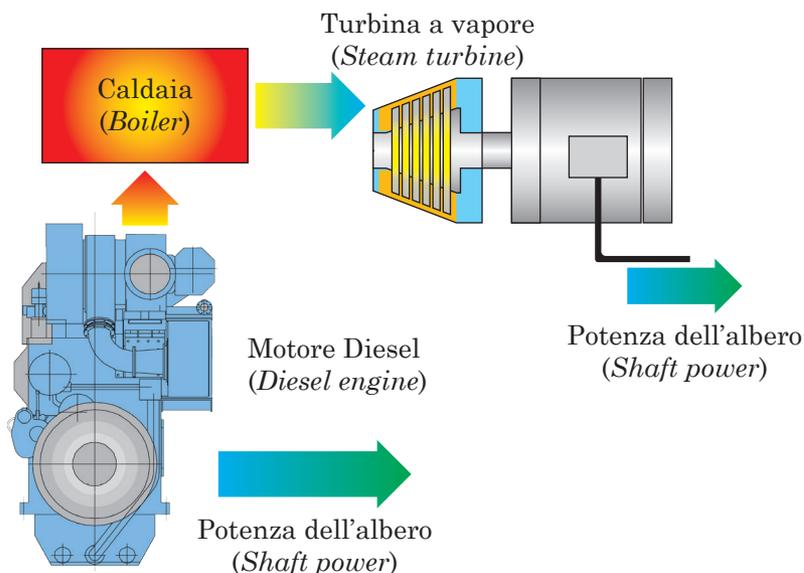


Fig. 10.16 - Impianto combinato cicli Diesel-vapore.

Se da una parte la turbina a gas presenta problemi di rendimento globale, dall'altra parte offre numerosi vantaggi non indifferenti nelle applicazioni. Innanzitutto si tratta di un impianto molto semplice. Rispetto all'impianto a vapore non abbiamo la caldaia in quanto vengono utilizzati direttamente i gas prodotti dalla combustione; il condensatore è pure soppresso perché i gas combusti vengono solitamente scaricati nell'atmosfera e sostituiti con aria fresca. Rispetto al motore alternativo, la turbina a gas è di costruzione più compatta e molto più leggera; ciò è reso possibile dalle parti in moto rotatorio e dalle minori pressioni massime di combustione. L'inquinamento inoltre, a causa del funzionamento con notevoli eccessi di aria (miscele molto povere) e con basse temperature massime di combustione, è tendenzialmente minore. Gli impianti con turbina a gas offrono il vantaggio di una messa in marcia sufficientemente rapida per raggiungere il massimo carico; un impianto motore a vapore richiede fino a 24 ore di tempo per raggiungere la massima potenza con partenza a freddo, in gran parte a causa del tempo richiesto per la regimazione termica della caldaia. Molti impianti impiegano sistemi a vapore per soddisfare le richieste medie dell'utenza e turbine a gas da 25 a 50 MW per soddisfare i valori di punta.

// 10.14 Recupero dell'energia termica

L'energia termica non utilizzata, che viene poi dispersa nell'ambiente da un impianto termico, può essere una frazione anche notevole dell'energia entrante; la temperatura dei gas di scarico di un motore ad accensione comandata per vettura può, ad esempio, arrivare a 850 °C, mentre quella del motore ad accensione per compressione, che ha un rendimento più elevato perché trasforma meglio l'energia termica in energia meccanica, arriva fino a 650 °C. La perdita dell'energia termica dei gas di scarico è allora piuttosto consistente, superiore al 30% dell'energia entrante (*Figura 10.10*). Diventa così importante il **recupero dell'energia** (*energy recovery*) negli impianti termici.

La sovralimentazione dei motori alternativi a combustione interna con turbina a gas di scarico costituisce la forma base per il recupero dell'energia contenuta nei gas di scarico. Nei motori ad accensione per compressione, ma limitatamente alle versioni con potenze più elevate, si può impiegare un'ulteriore forma di recupero di parte dell'energia dei gas di scarico attraverso una seconda turbina detta di potenza, che riversa la sua potenza non sul compressore ma sull'albero motore (*turbocompound*). Una forma più completa di recupero dell'energia è quella di inviare l'acqua utilizzata per il raffreddamento del motore in una caldaia dove, sfruttando l'energia contenuta nei gas di scarico, viene generato vapore a bassa pressione. Nei grandi motori per applicazioni stazionarie oppure marine con basse velocità di rotazione ($n < 7$ giri/s) il beneficio derivante dall'aumento del rendimento può giustificare l'installazione di sistemi ancor più completi di recupero dell'energia che portano al ciclo combinato Diesel-vapore (*Figura 10.16*). Vengono, ad esempio, impiegati sistemi di interrefrigerazione dell'aria compressa mandata al motore in tre stadi aventi le seguenti funzioni:

- il primo stadio produce acqua calda pressurizzata per il riscaldamento degli impianti e delle linee di combustibile;
- il secondo stadio fornisce l'acqua di alimentazione alla caldaia che, utilizzando il calore dei gas di scarico, genera vapore a bassa pressione, fatto espandere poi in una turbina a vapore per produrre l'elettricità necessaria agli impianti di bordo;

– nel terzo stadio viene semplicemente fatta circolare acqua di mare in modo da raggiungere la temperatura voluta dell'aria che alimenta il motore.

Una forma di recupero dell'energia termica ancor più completa di quella che viene realizzata con i cicli combinati, siano essi basati sul ciclo turbina gas - vapore oppure sul ciclo Diesel-vapore, è quella di utilizzare l'energia termica di scarto negli impianti destinati alla sola produzione di elettricità. Si tratta infatti di calore ceduto all'ambiente circostante direttamente scaricando i prodotti della combustione nell'ambiente oppure indirettamente mediante raffreddamento affidato ad aria oppure ad acqua prelevata da falde oppure fiumi oppure laghi ecc. Con un sistema a energia totale, in grado cioè di sfruttare quasi completamente anche l'energia termica ceduta all'ambiente, si può realizzare un notevole risparmio di energia primaria: è la *cogenerazione*, produzione congiunta di energia termica e di energia elettrica (CHP, *combined heat and power*) al posto della produzione separata delle due energie termica ed elettrica. La cogenerazione viene anche chiamata sistema a energia totale (*total energy*).

Il processo di gran lunga più diffuso è il *topping cycle* (ciclo a monte dell'utilizzatore termico) che consiste in un ciclo che riceve energia da un combustibile o da una fonte energetica ad alta temperatura e ne converte una frazione prima in lavoro meccanico e poi in energia elettrica; parte dell'energia non trasformata in lavoro viene recuperata come energia termica a temperatura medio/bassa, mentre la parte che rimane viene ceduta all'ambiente. Molto meno diffuso è il *bottoming cycle* (ciclo a valle dell'utilizzatore termico) in cui un processo industriale, che necessita di calore ad alta temperatura (cementifici, vetrerie, ceramiche ecc.), mette a disposizione una frazione di calore a temperatura medio/alta con la quale si effettua un ciclo (a vapor d'acqua oppure a fluido organico) per generare energia elettrica ed eventualmente energia termica a più bassa temperatura.

La *Figura 10.17* mostra due diverse configurazioni di un sistema di cogenerazione industriale basato sul motore ad accensione per compressione orientate l'una a massimizzare la produzione di energia termica per il teleriscaldamento (*district heating*) e l'altra la produzione di energia elettrica.

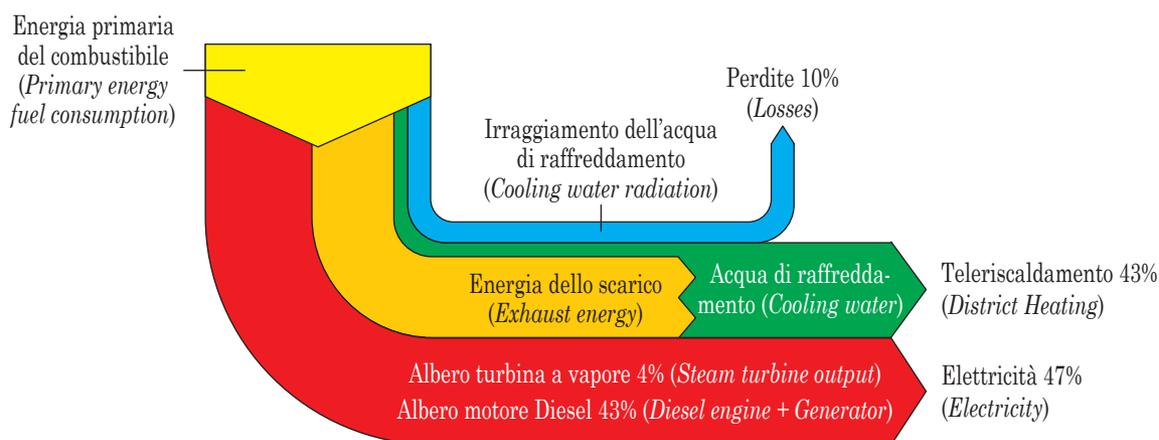


Fig. 10.17-a - Bilancio energetico di un sistema di cogenerazione, basato su un ciclo combinato Diesel-vapore, che massimizza il teleriscaldamento.

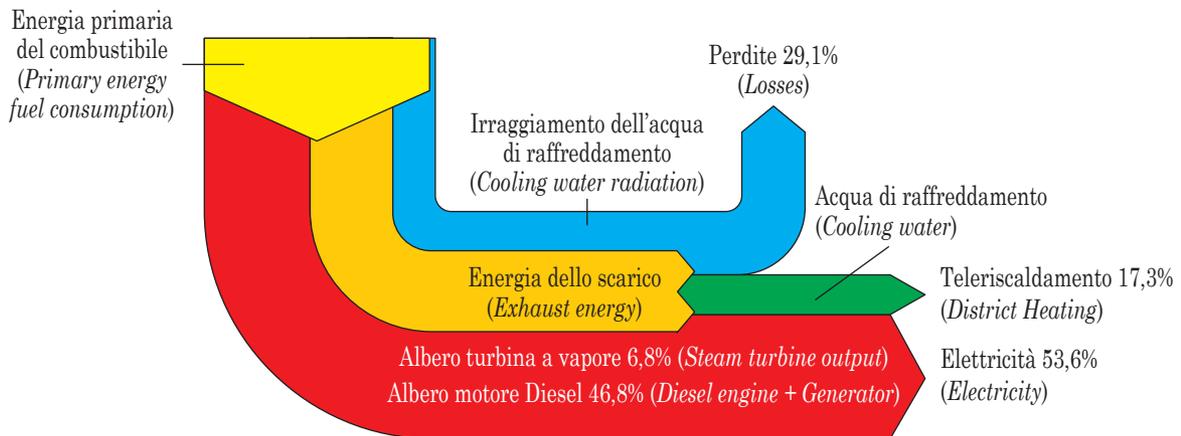


Fig. 10.17-b - Bilancio energetico di un sistema di cogenerazione, basato su un ciclo combinato Diesel-vapore, che massimizza la generazione di elettricità.

Un sistema di cogenerazione domestica, sempre basato sul motore a combustione interna, è illustrato nella *Figura 10.18*. Questo sistema, chiamato modulo a energia totale (*Total Energy Module*), produce energia elettrica generata all'albero del motore, mentre l'energia termica viene recuperata dai gas di scarico con uno scambiatore. L'insieme di più moduli, unitamente ad altre forme di risparmio energetico rese possibili dal sistema in cui sono inseriti i moduli, costituisce un aggregato che viene principalmente utilizzato per la produzione di energia elettrica e termica centralizzata. L'energia elettrica eccedente le richieste del sistema viene rimessa in rete.

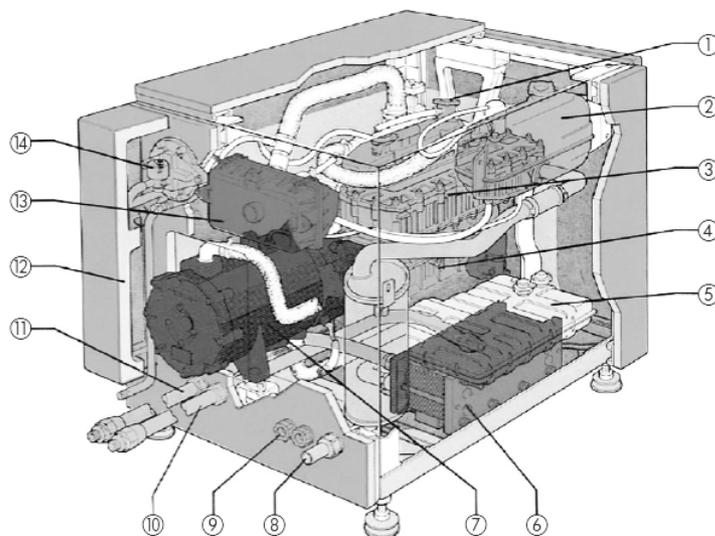


Fig. 10.18 - Sistema *Total Energy Module* (Fiat).

- | | |
|---------------------------|---|
| 1 Motore termico | 8 Gas di scarico |
| 2 Serbatoio dell'acqua | 9 Collegamento alla rete elettrica |
| 3 Scambiatore gas/acqua | 10 Uscita acqua calda |
| 4 Scambiatore olio/acqua | 11 Ingresso acqua fredda |
| 5 Contenitore dell'olio | 12 Isolamento termico e acustico |
| 6 Scambiatore acqua/acqua | 13 Ingresso aria |
| 7 Generatore elettrico | 14 Alimentazione del combustibile (in questo caso gas naturale) |

SINTESI

Per il primo principio della termodinamica, l'energia, anche se esiste in una molteplicità di forme e può *convertirsi* da una forma a un'altra sia pure in modo *incompleto* per la presenza di perdite, *si conserva*.

Le diverse forme di energia possono essere raccolte in quattro tipi di energia: immagazzinata, termica, meccanica ed elettrica. Esempi di energia immagazzinata sono le energie *chimica* dei combustibili, *nucleare*, *idrica*, *solare* e *geotermica*. L'energia *termica* è la forma di energia posseduta da qualsiasi corpo che abbia una temperatura T superiore allo zero assoluto. L'energia *meccanica* è la somma di *energia potenziale* ed *energia cinetica*. L'energia *elettrica* è la forma più diffusa di energia, avendo il rendimento più alto quando trasportata in grande quantità su lunghe distanze.

Il passaggio da una forma di energia a un'altra può avvenire per *conversione diretta* dell'energia con rendimenti piuttosto elevati oppure per *conversione ciclica* quando un sistema (il motore termico) deve effettuare un ciclo per convertire l'energia termica in energia meccanica. Esempi di sistemi, che operano secondo un ciclo, sono gli impianti di generazione del vapore per la produzione di elettricità e il comune frigorifero domestico.

I rendimenti degli impianti a gas e a vapore sono piuttosto bassi. Anche nei casi migliori, rimane sempre una quantità notevole (circa il 40%) di energia termica che non viene convertita in lavoro (secondo principio). Il *primo principio della termodinamica* stabilisce l'equivalenza tra le diverse forme di energia, affermando che l'energia, durante una trasformazione, non può essere distrutta, ma può solo cambiare da una forma a un'altra. Il *secondo principio della termodinamica* invece fissa dei limiti entro i quali una forma di energia può essere trasformata in un'altra; le irreversibilità, insite nelle trasformazioni reali, sono infatti l'origine di quella degradazione dell'energia che riduce il lavoro meccanico estraibile. L'energia non ha tutta la stessa qualità e l'energia termica va incontro a una naturale degradazione allorché una quantità di calore viene trasferita a una regione a temperatura più bassa. Di questo tiene conto l'exergia.

Exergia e è quella frazione di energia, appartenente a una certa forma, che può essere trasformata completamente in ogni altra forma. L'exergia è funzione della quantità di calore fornita dalla sorgente alla temperatura più elevata e ceduta alla sorgente alla temperatura più bassa.

$$e = q_H \left(1 - \frac{T_L}{T_H} \right) \quad 10-4$$

e = exergia [kJ/kg]

q_H = quantità di calore alla temperatura T_H [kJ/kg]

T_H = alta temperatura [K]

T_L = bassa temperatura [K]

Anergia a [kJ/kg] è la frazione di energia che non può più essere trasformata in un'altra forma di energia. L'anergia è funzione delle stesse grandezze da cui dipende l'exergia.

$$a = q_H - e = q_H \left(\frac{T_L}{T_H} \right)$$

a = anergia [kJ/kg]

q_H = quantità di calore alla temperatura T_H [kJ/kg]

e = exergia [kJ/kg]

T_H = alta temperatura [K]

T_L = bassa temperatura [K]

In assenza di qualsiasi sistema di recupero dell'energia allo scarico, la perdita maggiore nell'impianto termico è quella relativa all'energia termica contenuta nei gas di scarico, che può essere superiore al 30% dell'energia entrante. Per recuperare almeno in parte questa perdita si ricorre al *ciclo combinato* accoppiando in cascata il ciclo della turbina a gas con il ciclo a vapore: l'energia termica presente nei gas scarico della turbina viene utilizzata come fonte di calore per l'acqua che viene fatta evaporare ed effettua un ciclo a vapore. Il ciclo combinato può essere realizzato anche accoppiando in cascata il ciclo Diesel con il ciclo a vapore.

Una forma di recupero dell'energia termica, ancor più completa di quella che viene realizzata con i cicli combinati, è quella di utilizzare l'energia termica di scarto negli impianti destinati alla sola produzione di elettricità: è la *cogenerazione*, produzione congiunta di energia termica e di energia elettrica al posto della produzione separata delle due energie.

ESERCIZI

10.9 - Determinare exergia e ed anergia a in una macchina che scambia la quantità di calore $q_H = 2000$ kJ/kg ad alta temperatura $T_H = 2400$ K e scambia inoltre calore con l'ambiente esterno di riferimento a bassa temperatura $T_L = 300$ K.

$$e = 1750 \text{ kJ/kg}; \quad a = 250 \text{ kJ/kg}$$

10.10 - Determinare exergia e ed anergia a in una macchina che scambia la quantità di calore $q_H = 2000$ kJ/kg ad alta temperatura $T_H = 600$ K e scambia inoltre calore con l'ambiente esterno di riferimento a bassa temperatura $T_L = 300$ K.

$$e = 1000 \text{ kJ/kg}; \quad a = 1000 \text{ kJ/kg}$$

VERIFICA DELL'APPRENDIMENTO

11. Il primo principio della termodinamica, a proposito dell'energia, afferma che

.....
.....
.....

12. Citare cinque esempi di energia immagazzinata:

.....
.....
.....

13. Citare alcuni esempi di conversione diretta dell'energia:

.....

14. Citare un esempio di conversione mediante un ciclo nel passare da energia termica a energia meccanica:

.....

15. Il primo principio della termodinamica stabilisce l'equivalenza tra le diverse forme di energia, affermando che l'energia, durante una trasformazione, non può essere distrutta, ma può solo cambiare da una forma a un'altra. Il secondo principio della termodinamica invece

.....

16. L'energia termica non si degrada allorché una quantità di calore viene trasferita da una regione ad alta temperatura a una regione a bassa temperatura.

Vero Falso

17. L'exergia è quella frazione di energia, appartenente a una certa forma, che può essere trasformata completamente in ogni altra forma, mentre l'anergia è la frazione di energia che non può più essere trasformata in un'altra forma di energia.

Vero Falso

18. In un impianto termico, sprovvisto di sistemi di recupero di energia allo scarico, il livello della perdita di energia termica contenuta nei gas di scarico riferito all'energia entrante è pari a:

- a) 0,1%
- b) 1%
- c) 10%
- d) 30%
- e) >30%

19. Un ciclo combinato consiste

.....

.....

.....

.....

20. La cogenerazione consiste

.....

.....