

Macchine Termiche Motrici

Il ciclo di Carnot (costituito da due adiabatiche e due isoterme) non e' mai stato realizzato a causa delle difficoltà tecniche che si frappongono alla sua realizzazione. Altri due cicli termici realizzati praticamente , ovvero il ciclo di Stirling (due adiabatiche e due isocore con recupero del calore) e quello di Ericcson (due adiabatiche e due isocore con recupero del calore) possono essere considerati cicli semplici in quanto scambiano calore con due sole sorgenti termiche ma hanno trovato scarsissima applicazione pratica. La difficoltà di realizzare cicli semplici e' strettamente connessa a quella di realizzare trasformazioni isoterme. Al contrario e' possibile costruire macchine in cui avvengono trasformazioni che con ottima approssimazione (a meno delle inevitabili perdite termiche e per attrito) possono essere considerate isobare, o adiabatiche, o isovolumiche. I cicli termici delle macchine reali sono dunque basati su tali tipi di trasformazioni come risulta dalla tabella 1. I fluidi adottati sono quelli largamente disponibili e di basso costo, ovvero l'aria e l'acqua: nessuna alternativa valida è stata a tutt'oggi trovata, sebbene in alcuni cicli a gas si adottano l'elio o l'anidride carbonica.

Ciclo	Descrizione	Fluido	Combustione	Principali Applicazioni
Rankine/Hirn	due adiabatiche e due isobare	acqua/ vapore	esterna	Propulsione navale. Centrali termoelettriche.
Joule/Brayton	due adiabatiche e due isobare	aria elio o CO ₂	interna esterna	Propulsione aeronautica Centrali termoelettriche
Combinato	ciclo Brayton e ciclo Rankine (riscaldato dai gas di scarico del Brayton) in cascata	aria e vapore	interna	Centrali termoelettriche.
Otto	due adiabatiche e due isovolumiche	aria	interna	Motori alternativi per autotrazione. Generatori elettrici di bassa potenza.
Diesel	due adiabatiche, una isobara e una isovolumica	aria	interna	Motori alternativi per autotrazione. Propulsione navale.

Tabella 1.

1. Ciclo Rankine/Hirn

Il ciclo Rankine/hirn detto anche solo ciclo rankine e' quello caratteristico delle macchine a vapore utilizzato per la produzione di energia elettrica in impianti fissi che raggiungono la potenza di 1200 W ed oltre

2. Ciclo Rankine a vapore saturo

L'impianto è costituito da quattro organi, schematizzabili individualmente come sistemi aperti a regime, che nel loro complesso costituiscono un sistema chiuso.

3. Ciclo Rankine a vapore surriscaldato

Un ciclo a vapore surriscaldato lavora tra le pressioni e temperatura di ammissione in turbina di 100 bar e 500 ° C e la pressione al condensatore di 0.04 bar. La portata di vapore vale $G = 30 \text{ kg/s}$.

4. Effetto delle irreversibilità' nel ciclo Rankine

Ogni componente del ciclo Rankine presenta un certo grado di irreversibilità, che riduce le prestazioni del ciclo rispetto al caso ideale. Le irreversibilità nella pompa hanno un effetto trascurabile, per il basso valore della potenza richiesta. Parimenti, le cadute di pressione nel condensatore hanno un effetto trascurabile.

5. Miglioramento delle prestazioni del ciclo Rankine

Ogni miglioramento del rendimento di primo principio comporta, , un abbassamento della T_{mF} od un innalzamento della T_{mC} .

6. Il ciclo Rankine con risurriscaldamento

Dopo una prima espansione in turbina, fino alla pressione intermedia, il vapore viene riportato in caldaia, dove viene nuovamente surriscaldato fino alla massima temperatura del ciclo in un apposito fascio tubiero, detto appunto *risurriscaldatore*, e nuovamente inviato agli stadi a media e bassa pressione della turbina.

7. Il ciclo Rankine con spillamento

Il vapore spillato dalla turbina viene inviato ad uno scambiatore (detto preriscaldatore) dove esso condensando cede calore all'acqua di alimento. Il condensato viene quindi reimesso nella linea di alimentazione, previa laminazione

8. Il ciclo Joule/Brayton

Gli impianti motori con turbina a gas sono caratterizzati da un basso rapporto peso/potenza e costo/potenza e dalla relativa facilità con cui possono far fronte a variazioni di carico. Per questo motivo essi sono largamente adottati nella propulsione aeronautica, ma anche in impianti fissi per la produzione di energia elettrica e per l'azionamento di macchine operatrici, (es. centrali di pompaggio). I valori attuali del rendimento di primo principio sono però inferiori a quelli del ciclo Rankine. il fluido di lavoro (aria), dopo la compressione, entra nella camera di combustione, dove viene immesso il combustibile e avviene, a pressione approssimativamente costante, la reazione chimica di combustione: i gas prodotti di reazione, ad elevata temperatura e pressione, si espandono nella turbina e vengono scaricati nell'atmosfera. In questa configurazione, l'impianto è *a circuito aperto e combustione interna*.

9. Effetto delle irreversibilità' nel ciclo Brayton

Le irreversibilità che influenzano le prestazioni del ciclo Brayton sono quelle dovute alla non idealità delle espansioni nella turbina e nel compressore. A differenza del ciclo Rankine, anche queste ultime sono importanti, dato che il compressore assorbe un'aliquota non trascurabile della potenza erogata dalla turbina. Le perdite di carico negli scambiatori hanno invece un impatto minore sulle prestazioni.

10. Cenni all'utilizzazione del ciclo Brayton nei motori aeronautici

turbomotori aeronautici moderni si dividono in due categorie:

1. motori *turboelica*, in cui la turbina, oltre ad azionare il compressore, mette in movimento l'elica;
2. motori *turbogetto*, in cui la turbina eroga potenza unicamente per azionare il compressore (questa parte di motore è detta generatore di gas); i gas in uscita dalla turbina, ancora ad elevato contenuto entalpico, vengono accelerati in un *ugello* fino ad una velocità superiore a quella di volo: la corrispondente variazione di quantità di moto fornisce la spinta propulsiva all'aereo.

11. Il ciclo Brayton con rigenerazione

Negli impianti a combustione interna e ciclo aperto, ovviamente lo scambiatore di bassa temperatura non è presente. In questo impianto si utilizzano i gas caldi in uscita dalla turbina, a temperatura ancora elevata, per preriscaldare tramite uno scambiatore di calore a superficie, detto *rigeneratore* il gas all'uscita del compressore prima dell'introduzione nella camera di combustione. Si risparmia quindi combustibile, aumentando il rendimento, a spese dell'introduzione di un nuovo componente, generalmente costoso ed ingombrante. La rigenerazione si adotta talvolta in impianti di potenza inferiore a 10 MW

12. Cenni ad ulteriori possibili miglioramenti del ciclo Brayton

1. Compressione multistadio interrefrigerata: abbiamo visto che con tale tecnica si può ridurre il lavoro di compressione. Combinata alla rigenerazione, essa produce un sensibile aumento di rendimento a spese di una notevole complicazione dell'impianto. Recentemente, gli studi sulla compressione interrefrigerata hanno subito un nuovo impulso dettato dalla necessità di elevare il rapporto di compressione ed oltre; è stato proposto anche di effettuare la interrefrigerazione iniettando acqua nel fluido di lavoro invece di utilizzare uno scambiatore di calore.

2. Espansione multistadio con risurriscaldamento: detta anche *post-combustione*, è un processo analogo al risurriscaldamento del ciclo Rankine. In questo caso si sfrutta il fatto che i gas combusti hanno ancora un residuo tenore di ossigeno, dato che la combustione avviene in *eccesso di aria* per limitare le temperature di ingresso in turbina. I gas vengono pertanto spillati dalla turbina ad una pressione intermedia, vi si effettua una seconda combustione incrementandone la temperatura e successivamente essi vengono rinviati alla turbina di bassa pressione. Nei motori aeronautici a reazione, la postcombustione si effettua a valle della turbina e prima dell'ugello: è diffusa specialmente negli aviogetti militari.

13. Impianti a ciclo combinato

Abbiamo accennato come una delle principali cause di irreversibilità del ciclo Rankine consista nella elevata differenza di temperatura tra il vapore ed i prodotti della combustione in caldaia, e come al contrario il rendimento del ciclo Brayton sia penalizzato dallo scarico dalla turbina di gas ad elevata temperatura rispetto all'ambiente. Da queste considerazioni nasce l'idea di *accoppiare i due cicli*, utilizzando i gas di scarico della turbina del ciclo Brayton per riscaldare (totalmente od in parte) il vapore del ciclo Rankine.

14. Cenni al repowering degli impianti convenzionali

Si definisce *repowering* l'operazione di ripotenziamento di una centrale termoelettrica a

ciclo Rankine con l'aggiunta di una o più turbine a gas. L'operazione di repowering, con limitati costi di investimento, aumenta la potenza e il rendimento delle centrali esistenti, ma trova ostacolo nei costi di fermo impianto e nei vincoli sugli ingombri, intrinseci nella modifica di un progetto già esistente.

15. I cicli dei motori alternativi a combustione interna : otto , diesel , sabathe'

1. Otto

Analizziamo cosa accade nel cilindro di un motore alternativo a benzina a quattro tempi. Per

far questo, possiamo costruire sul piano $p-V$ un diagramma detto *diagramma indicato* (introdotta da J. Watt alla fine del '700) in quanto può essere ricavato sperimentalmente in laboratorio disponendo di due sensori (indicatori) di pressione e di angolo di manovella: da quest'ultimo mediante semplici calcoli si può risalire al volume istantaneo del fluido contenuto tra cilindro e pistone, ovvero di quello che consideriamo il nostro sistema. In una prima fase di *aspirazione* il pistone si muove dal punto morto superiore al punto morto inferiore aspirando la miscela aria-benzina attraverso la valvola di aspirazione: il volume aumenta e la pressione si mantiene approssimativamente costante ad un valore lievemente inferiore a quella esterna a causa delle perdite nei condotti di aspirazione. Al termine di tale fase inizia quella di *compressione*: le due valvole sono chiuse e nella sua corsa dal PMI al PMS il pistone comprime il fluido. Quando il pistone ha raggiunto il PMS la scintilla scoccata nella candela (per tale motivo, tali motori si dicono anche ad *accensione comandata*) provoca la *combustione* della miscela aria-benzina: essendo rapidissima, si può ipotizzare che essa avvenga a volume costante (2-3): la pressione e la temperatura del fluido aumentano notevolmente ed inizia la fase di *espansione*, durante la quale il pistone ritorna al PMI (punto P). Al termine di tale fase, la valvola di scarico si apre ed il fluido viene scaricato all'esterno mentre il pistone ritorna al PMS: il volume diminuisce nuovamente e la pressione (sempre a causa delle perdite di carico) si mantiene grossomodo costante ad un valore superiore a quella atmosferica. L'intero ciclo del motore a quattro tempi si compie pertanto in quattro fasi, ognuna delle quali avviene in una corsa del pistone dal PMI al PMS o viceversa: *aspirazione*, *compressione*, *combustione/espansione* (detta più comunemente *scoppio*) e *scarico*.

2.DIESEL

Le principali differenze tra il ciclo Otto e quello Diesel sono le seguenti:

durante la fase di compressione viene compressa solamente aria;

il combustibile (gasolio) viene iniettato nel cilindro alla fine della compressione e la combustione inizia spontaneamente a causa dell'alta temperatura dell'aria; inoltre, la combustione del gasolio è più graduale di quella della benzina e si può ipotizzare che avvenga a *pressione costante*.

Questi motori sono detti pertanto ad *accensione spontanea* e non hanno bisogno né di candele né di circuito di accensione: per contro richiedono un sofisticato sistema di iniezione ad alta pressione. Il fatto che durante la compressione sia presente solo aria rende possibile realizzare rapporti di compressione volumetrici più elevati che nei motori a ciclo Otto

3. Sabathe'

Abbiamo visto che la fase di combustione nei motori alternativi non è, in ogni caso, né esattamente isobara né esattamente isovolumica. Il ciclo Sabathè rappresenta tale fase di combustione con un primo tratto isovolumico seguito da uno isobaro ed è pertanto più aderente alla realtà. Esso è rappresentato nei piani $p-v$ e $T-s$ rispettivamente in Fig.35 ed in Fig.36. Dato che i cicli Otto e Diesel non sono che casi particolari del ciclo Sabathè, ci

limiteremo a studiare le prestazioni di quest'ultimo. A questo scopo, nel seguito definiamo preventivamente alcune grandezze.

Il rapporto di adduzione del calore

16. Potenza erogata da un motore alternativo

La potenza erogata da un motore alternativo composto si può ottenere moltiplicando il lavoro utile per cilindro per il numero, z , di cilindri per il numero di cicli compiuti nell'unità di tempo. Quest'ultimo, per un motore a quattro tempi il cui albero compie n giri al secondo, è dato da $n/2$, dato che il ciclo si compie in due giri dell'albero.

17. Bilancio termico del motore ad accensione comandata

Conviene rivedere il bilancio energetico del motore alternativo da un punto di vista più empirico. La potenza termica ottenibile dalla completa combustione del carburante, W_{comb} , si suddivide in quattro aliquote principali $W_{comb} = W'_{m.u} + W_{t,raff} + W_{t,scar} + W_{perd}$

18. Curve caratteristiche dei motori a combustione interna

La potenza di un motore a c.i. varia al variare del regime di rotazione. Tuttavia, la potenza non è direttamente proporzionale al numero di giri, dato che al variare di questo varia anche la p_{me} . L'andamento della potenza e della coppia all'albero in funzione del numero di giri è riportato nelle cosiddette *curve caratteristiche*, illustrate qualitativamente

19. Cenno alla sovralimentazione

Nel caso di motore alternativo a 4 tempi, la portata G di fluido in ingresso è esprimibile come $G = n/2 \pi d v (1 + 1/a) v t$

20. Rendimento globale di un impianto motore . Consumo specifico di combustibile.

E' esprimibile nella forma $W'_{m,n} = N_{td} * W_{tc}$

21. Cenno alla cogenerazione ed alla multigenerazione

Abbiamo visto come la produzione di energia elettrica o meccanica da una fonte di calore (in genere, la combustione) abbia come effetto indesiderato e inevitabile che una parte del calore prodotto non può essere convertito in energia meccanica, ma viene restituito come "rifiuto" alla sorgente fredda. D'altra parte, in altre applicazioni (in genere per il riscaldamento di edifici) "sprechiamo" calore disponibile ad alta temperatura (sempre originato da una combustione) per utilizzarlo a temperatura molto più bassa. Viene quindi spontaneo domandarsi perché non si utilizzi per questi ultimi scopi il calore refluo, a bassa temperatura, proveniente dagli impianti di generazione di energia elettrica o meccanica. Ad esempio, si potrebbe costruire un impianto a ciclo Brayton che provveda a generare l'energia elettrica necessaria agli edifici della nostra facoltà ed utilizzi il calore ceduto alla sorgente fredda per il suo riscaldamento invernale, invece di scaricarlo semplicemente nell'ambiente. In questo modo l'energia chimica inizialmente disponibile nel combustibile verrebbe sfruttata quasi integralmente e nel modo ottimale. Questa procedura prende il nome di *cogenerazione*.