

Motori endotermici alternativi

Molto diffusi nell'autotrazione, i motori endotermici alternativi o motori a combustione interna (c.i.) sono impiegati anche nella propulsione navale, nei gruppi elettrogeni e in altri impianti fissi. Coprono un vastissimo campo di potenze, da pochi kW a centinaia di MW.

Classificazione e struttura

I termini **endotermico** e **alternativo** indicano che la trasformazione di energia termica in energia meccanica avviene con una combustione all'interno dei cilindri, entro cui i pistoni scorrono con moto alternato.

Si possono classificare i motori a c.i. sulla base di:

| | |
|---|---|
| MODALITÀ DI ACCENSIONE | Motori ad accensione comandata (a scoppio) |
| | <ul style="list-style-type: none"> • hanno come riferimento ideale il ciclo Otto • la combustione è innescata da una scintilla |
| | Motori ad accensione spontanea (Diesel) |
| | <ul style="list-style-type: none"> • hanno come riferimento ideale il ciclo Diesel • la combustione si innesca spontaneamente a seguito della temperatura raggiunta in compressione |
| CORSE DEL PISTONE PER COMPIERE IL CICLO OPERATIVO | Motore a due tempi |
| | Motore a quattro tempi |
| MODALITÀ DI ALIMENTAZIONE | Motore a carburazione |
| | <ul style="list-style-type: none"> • aria e combustibile miscelati nel carburatore prima dell'invio nei cilindri |
| | Motore a iniezione |
| | <ul style="list-style-type: none"> • combustibile nebulizzato ad alta pressione nei cilindri o nel condotto di alimentazione |

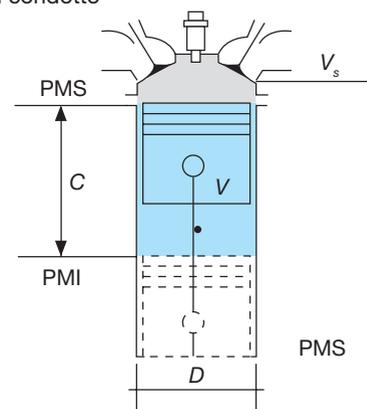
I **punti morti**, superiore PMS e inferiore PMI, sono le posizioni estreme occupate dal pistone; la distanza è la **corsa** del pistone.

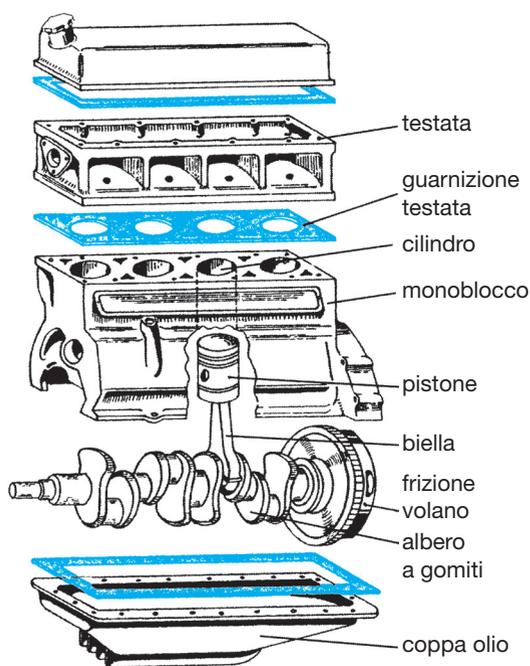
Alesaggio è il diametro D dell'accoppiamento cilindro-stantuffo.

Il **volume della camera di combustione** V_s è quello residuo per i gas quando il pistone è al PMS; durante la corsa il volume aumenta di una quantità V , definita **cilindrata**:

$$V = \pi \frac{D^2}{4} \cdot C$$

Per l'intero motore, se ha z cilindri, la cilindrata totale è: $V_{tot} = z \cdot V$.





Due parametri caratteristici del motore sono:

- il rapporto geometrico corsa/diametro C/D
- il rapporto di compressione $r = \frac{V + V_s}{V_s}$

che assume valori $8 \div 11$ nei motori ad accensione comandata e $16 \div 20$ nei motori ad accensione spontanea.

Influenza il rendimento del ciclo e, in particolare, è decisivo nel ciclo Otto (vedi Capitolo 10).

Il **monoblocco** è il blocco in ghisa all'interno del quale sono ricavati i cilindri. Il *basamento* fa da supporto all'albero motore con i *cuscinetti di banco*; a esso è collegata la *coppa* contenente l'olio lubrificante.

La chiusura superiore è costituita dalla **testata**, che contiene le sedi per le valvole, la candela o gli organi per l'iniezione.

Pistoni, bielle, albero a gomiti costituiscono il manovellismo per la trasformazione del moto da traslatorio a rotatorio (capitolo 1 del Volume 3).

Due tempi/quattro tempi – carburazione/iniezione

Il motore **a quattro tempi** realizza l'intero ciclo con due giri dell'albero e quattro corse dei pistoni; due corse sono impegnate per rinnovare la carica entro i cilindri, una in aspirazione e l'altra in scarico. Il ricambio avviene attraverso le *valvole*, la cui apertura è comandata dall'albero della distribuzione (*albero a camme*).

Per garantire un completo svuotamento dei cilindri, il tempo di apertura della valvola di scarico è maggiore di quello di una corsa, con anticipo dell'apertura e ritardo della chiusura. Anticipi e ritardi sono espressi in angoli di manovella, visibili nel *diagramma polare della distribuzione*.

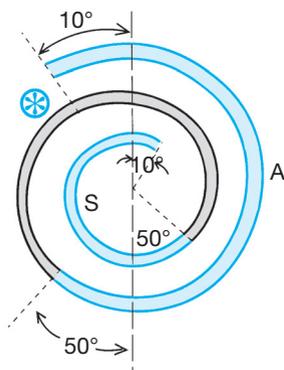
Subisce un anticipo anche l'accensione (asterisco nel diagramma), regolato in modo che si verifichi la massima pressione quando il pistone ha appena iniziato la corsa di espansione.

È possibile realizzare il funzionamento **a due tempi**, evitando le corse di aspirazione e scarico e realizzando il ricambio del fluido attraverso le *luci*, aperture laterali nelle pareti laterali dei cilindri vicino al PMI.

Le luci sono aperte e chiuse automaticamente dal pistone stesso durante la sua corsa.

La soluzione a due tempi è adottata soprattutto nei motori Diesel di grande cilindrata e potenza, che funzionano a basso regime di rotazione; nei motori ad accensione comandata tale soluzione è limitata a piccole cilindrate (motocicli, piccole imbarcazioni).

Nei **motori a carburazione** la miscela aria-benzina viene formata fuori dai cilindri sfruttando la tendenza della benzina a formare vapori in presenza di una depressione. Una pompa di alimentazione manda la benzina



al carburatore che ha la funzione di effettuare il dosaggio della miscela. La valvola a farfalla, comandata dall'acceleratore, regola la quantità di aria da mandare al motore e automaticamente viene regolata la quantità di carburante per garantire il *dosaggio stechiometrico* di circa 15 grammi di aria per ogni grammo di benzina.

Una *miscela ricca* (o *grassa*) ha un dosaggio di benzina che supera quello teorico; l'opposto per una *miscela povera* (o *magra*).

Nei **motori a iniezione** odierni una *centralina elettronica* controlla automaticamente l'alimentazione in base alle rilevazioni effettuate da sensori su diversi parametri di funzionamento.

Si distinguono:

- *iniezione diretta*, in cui l'iniettore immette il carburante direttamente nella camera di combustione;
- *iniezione indiretta*, in cui la miscelazione avviene nel condotto di aspirazione;
- *single point*, con un unico iniettore che alimenta tutti i cilindri;
- *multi point*, con uno o più iniettori per ogni cilindro;
- *UniJet*, con iniezione a getto unico, che non garantisce una miscelazione ottimale;
- *MultiJet*, con una fiamma pilota in accensione, uno o più getti principali e una post-combustione.

Nei motori ad accensione spontanea è ormai generalizzato il **sistema common rail** costituito da:

- due pompe di alimentazione in serie, una a bassa e una ad alta pressione;
- un condotto comune di accumulo (*flauto*) del combustibile ad alta pressione (3-13 MPa);
- iniettori a comando elettronico.

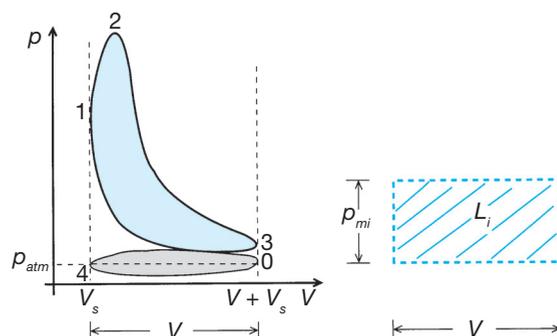
Potenza, rendimenti, consumo specifico

La pressione presente all'interno dei cilindri nelle fasi del ciclo può essere rilevata e registrata con opportuni indicatori; si ottiene sul diagramma V, p il **ciclo indicato** e si ricavano:

lavoro indicato L_i , il lavoro netto trasferito dal fluido al pistone così come risulta dal ciclo;

pressione media indicata $p_{mi} = \frac{L_i}{V}$

potenza indicata o interna $N_i = p_{mi} \cdot z \cdot V \cdot \frac{n}{30 \cdot \tau}$



$$\frac{n}{30 \cdot \tau} = \text{cicli/s in base al numero di tempi } \tau$$

$$z \cdot V = \text{cilindrata totale per motore con } z \text{ cilindri}$$

potenza meccanica effettiva $N_{eff} = p_{me} \cdot z \cdot V \cdot \frac{n}{30 \cdot \tau}$

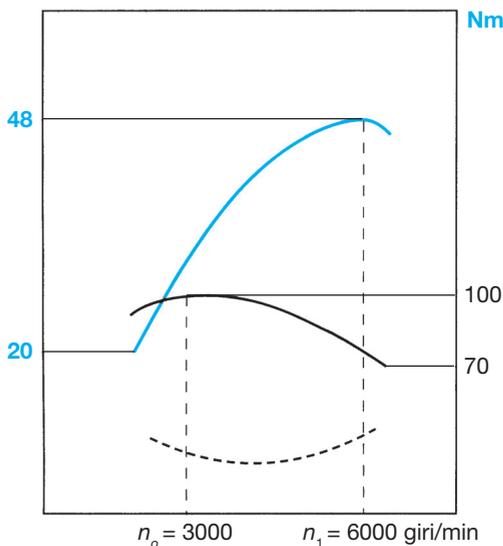
La **potenza termica resa disponibile dal combustibile** è calcolata in base al consumo Q_m (kg/s) e al potere calorifico del combustibile H_i (J/kg):

$$N_d = Q_m \cdot H_i$$

Il rendimento globale del motore è:

$$\eta_g = \frac{N_{eff}}{N_d} = \eta_c \cdot \eta_i \cdot \eta_m$$

η_c = rendimento del ciclo
 η_i = rendimento interno (combustione incompleta e imperfetta, fenomeni dissipativi nei cilindri)
 η_m = rendimento meccanico



Nm Un parametro per valutare l'efficienza del motore è il **consumo specifico**, dato dal rapporto tra il consumo di combustibile e la potenza effettiva prodotta e misurato usualmente in g/kWh:

$$c_s = \frac{Q_m}{N_{eff}}$$

Esso è legato al rendimento globale da una relazione contenente il potere calorifico del combustibile:

$$\eta_g = \frac{1}{c_s \cdot H_i}$$

Curve caratteristiche: rilevate sperimentalmente forniscono l'andamento della potenza, della coppia motrice e del consumo specifico al variare del regime del motore.

Combustibili e controllo delle emissioni

I carburanti più utilizzati sono miscele di *idrocarburi* derivanti dalla distillazione del petrolio: benzina, gasolio, GPL, metano. Con l'aumento del prezzo del petrolio e la necessità di diversificare le fonti è cresciuto l'interesse per i cosiddetti *biocarburanti*, liquidi o gassosi, ottenuti da processi di trasformazione chimica o biologica di biomasse.

*Il motore ad AC comunemente impiega come combustibile la **benzina**, la cui elevata volatilità è adatta alla carburazione con l'aria. Il **numero di ottano** (N.O.) è la percentuale in volume nella benzina dell'idrocarburo isoottano che darebbe lo stesso potere antidetonante della benzina esaminata.*

Esso misura il potere della benzina di evitare la *detonazione*, onde di pressione provocate dall'autoaccensione della miscela prima dell'arrivo del

fronte di fiamma, causa di forti sollecitazioni termo-meccaniche sui materiali.

Il dosaggio è normalmente sui 15 kg di aria per 1 kg di benzina, poco al di sopra del valore stechiometrico.

*Il motore ad AS impiega come combustibile il **gasolio**, che presenta un basso ritardo all'accensione. L'accendibilità è misurata dal **numero di cetano**, dato dalla percentuale dell'idrocarburo così denominato in una miscela equivalente, dal punto di vista del ritardo all'accensione, a quella del combustibile considerato.*

Per garantire una piena combustione, il rapporto di miscela (kg di aria per ogni kg di combustibile) è mantenuto elevato (19-20), nettamente al di sopra del valore stechiometrico chimicamente necessario. Elevato, fin oltre 20, è anche il rapporto di compressione necessario per ottenere al termine della compressione la temperatura necessaria all'avvio della combustione.

A seguito di una combustione idealmente perfetta di un combustibile fossile puro si ottengono vapore acqueo (H_2O) e anidride carbonica (CO_2); quest'ultima, prodotta in natura dai vegetali nelle ore notturne, non è per nulla tossica, ma l'aumento della sua concentrazione nell'atmosfera è responsabile dell'effetto serra e delle modificazioni climatiche.

In realtà i combustibili contengono impurità (per esempio, lo zolfo) e additivi; di conseguenza vengono emessi in atmosfera inquinanti, classificabili in quattro categorie:

- il monossido di carbonio (CO), da una combustione incompleta per carenza di ossigeno;
- gli ossidi di azoto (NO_x), a causa delle alte temperature raggiunte nel cilindro;
- gli idrocarburi incombusti (HC) e il particolato, frutto di una mancata combustione.

Il **particolato**, residuo della imperfetta combustione del gasolio, è un insieme di particelle solide con un nucleo centrale di carbone su cui sono depositati idrocarburi, metalli, acqua e composti dello zolfo. Sono classificate in base alle dimensioni; con PM_{10} sono indicate le polveri sottili con diametro inferiore a $10\ \mu m$, che per le loro dimensioni ridotte sono inalabili, cioè in grado di raggiungere i polmoni.

Con **Euro 5** si indica l'ultima formulazione degli **Standard europei sulle emissioni inquinanti**, finalizzati a ridurre la presenza nell'aria di inquinanti di fonte veicolare.

Il contenimento delle emissioni nei motori è il frutto di una serie di modifiche complessive, ma in particolare di tre interventi specifici:

- **riduzione selettiva catalitica SCR** (*Selective Catalyst Reduction*), processo chimico per l'abbattimento degli NO_x nei gas di scarico. Il catalizzatore svolge correttamente la sua funzione solo se il rapporto aria/benzina si mantiene molto prossimo al valore stechiometrico; nei sistemi a iniezione elettronica la **sonda lambda** è un sensore posto prima del catalizzatore per verificare che il motore stia funzionando con una

corretta miscela stechiometrica e informare la centralina elettronica per le eventuali correzioni;

- **ricircolo dei gas esausti EGR** (*Exhaust Gas Recirculation*), che prevede la reimmissione nel cilindro, assieme alla carica fresca, di una piccola quantità di gas combusti per abbassare la temperatura massima raggiunta in fase di combustione, causa principale della formazione degli NO_x;
- **filtro attivo antiparticolato FAP**, dispositivo per abbattere le emissioni inquinanti da polveri sottili dei motori ad AS.

*Da tempo si sta sperimentando la **propulsione elettrica**, capace di ridurre in modo drastico le emissioni inquinanti; si utilizza l'energia chimica immagazzinata in batterie ricaricabili per produrre una coppia motrice, che garantisce elevata efficienza energetica e un inquinamento praticamente nullo.*

I motori elettrici possono produrre una coppia elevata e in fase di accelerazione hanno prestazioni superiori a quelle dei veicoli convenzionali; presentano inoltre il vantaggio della silenziosità.

Lo svantaggio, che finora ha impedito un'ampia diffusione, sta nel fatto che le batterie delle vetture elettriche devono essere ricaricate periodicamente, con le conseguenze negative di limitata autonomia e costi aggiuntivi.

La soluzione per ora più diffusa e praticabile nell'autotrazione è quella dei **veicoli ibridi**, dotati sia di motore elettrico sia di motore a c.i.; la macchina elettrica può lavorare sia in trazione (funzionamento da motore), sia in generazione (funzionamento da alternatore). Quando il veicolo è in fase di frenatura, il funzionamento da alternatore della macchina elettrica permette la ricarica delle batterie (**freno rigenerativo**).

Una versione sperimentale è costituita dall'**autoveicolo a trazione elettrica con produzione interna di energia**, per cui non è necessario l'allacciamento alla rete elettrica per ottenere energia perché quest'ultima viene prodotta internamente tramite **celle a combustibile**, che trasformano l'energia chimica di un combustibile (tipicamente idrogeno) in energia elettrica senza combustione e con altissimi rendimenti.

Tali veicoli durante il movimento risultano del tutto silenziosi e l'unica emissione prodotta è vapore acqueo.

Lo stoccaggio dell'idrogeno è però problematico perché, pur avendo un elevatissimo potere calorifico, ha una bassa densità.