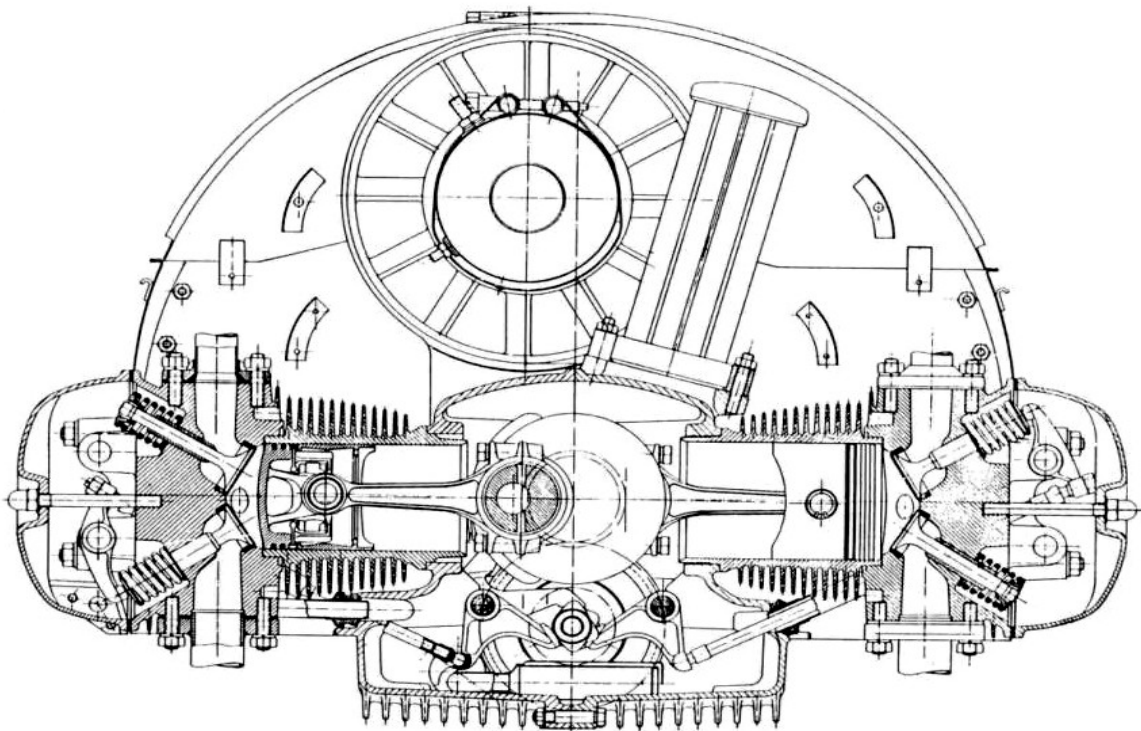


*Corso di Tecnologia
per la
Scuola Secondaria di I grado
Prof. Pierangelo Monni*

Motori a combustione interna



Indice

Introduzione.....	3
L'energia e le sue trasformazioni.....	3
Motore quattro tempi a benzina.....	6
Motore due tempi a benzina.....	8
Differenze tra motore 2 tempi e 4 tempi.....	9
Motore quattro tempi Diesel.....	10
Sistemi di alimentazione dei motori a combustione interna.....	12
Sistemi ausiliari del motore a combustione interna.....	15
Sistemi di sovralimentazione del motore a combustione interna.....	15

Elenco versioni:

8.0 - Aggiunto il paragrafo a pag. 12 e seguenti sui sistemi di alimentazione dei motori a combustione interna; modificato lo schema della macchina termica a pag. 5.

Per aggiornare la versione 7 alla 8 stampare le pagg. 1-2, 5-6, 11-12-13-14 della versione 8.

8.1 - Aggiunto schema energia a pag. 3 .

9.0 - Aggiunta introduzione storica al motore Diesel; spostato i Sistemi di alimentazione prima dei Sistemi ausiliari

Introduzione

Tutti noi incontriamo spesso nella vita di tutti i giorni i **motori a combustione interna**: sono quelli che azionano le automobili, le motociclette, i camion, ma anche i tagliaerba, i decespugliatori, le motoseghe, le barche e tante altre macchine.

Scopo del motore: fornire **energia meccanica** per muovere qualcosa.

Nel motore l'**energia chimica** (contenuta nella **benzina**) viene trasformata in →
→ **energia termica (=calore)** che (in parte) viene trasformata in →
→ **energia meccanica (=lavoro meccanico)**.

L'energia e le sue trasformazioni

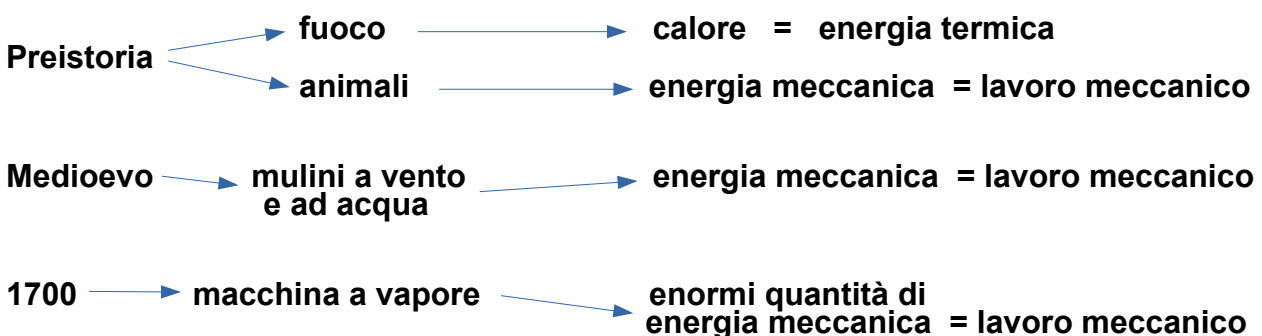
L'**energia** può assumere tante forme diverse, molte di queste forme le incontriamo nella vita quotidiana. Se per esempio ci mettiamo al sole, avvertiamo caldo. Questo perché la **luce** è una forma di energia, e quando arriva sulla nostra pelle si trasforma in **calore**, che è a sua volta un'altra forma di energia (energia termica).

Nel corso della sua storia, l'uomo ha imparato a **provocare** e governare alcune alcune **trasformazioni di energia**, allo scopo di servirsene per ricavarne dei **vantaggi**. Per esempio, quando ha imparato a fare il **fuoco**, ha imparato a liberare l'**energia chimica** immagazzinata nei legami chimici che legano tra loro gli atomi del combustibile. Nel processo di combustione tali legami chimici si spezzano, l'energia che contengono viene liberata convertendosi in **luce** (energia luminosa) e **calore** (energia termica).

Noi andremo ora a considerare delle **trasformazioni di energia** che producono una forma di energia particolarmente pregiata in quanto molto utile per l'uomo, cioè quelle trasformazioni che forniscono **energia meccanica** (= energia legata al **movimento**).

Per molti secoli l'uomo ha avuto a disposizione solo l'**energia meccanica** prodotta dai **muscoli** suoi o degli animali. Le prime macchine capaci di trasformare varie forme di energia in **energia meccanica** utilizzabile sono stati i **mulini a vento** e ad **acqua**; l'energia fornita era però in **quantità molto limitata**.

Il vero cambiamento si ebbe nel 1700, con l'invenzione della **macchina a vapore**: questa, a partire dall'**energia chimica** contenuta nel **carbone**, forniva per la prima volta nella storia **enormi quantità di energia meccanica**. Questa invenzione cambiò il corso della storia, determinando la nascita dell'**industria**, e innescando una serie di profondi cambiamenti economici, sociali, urbanistici, ambientali: era la prima **rivoluzione industriale**.



Trasformazione del calore (=energia termica) in energia meccanica

Nella macchina a vapore, per esempio, l'**energia chimica** viene trasformata prima tramite la combustione in **energia termica**, questa viene poi convertita in **energia meccanica**. Ma come è possibile **ottenere energia meccanica dal calore**?

Spesso nel nostro studio delle varie macchine che producono **energia meccanica** (motori di automobile, moto, navi, aerei, impianti di centrali elettriche) troveremo che la **trasformazione dell'energia termica in energia meccanica** avviene per mezzo di un **gas** (o di un **vapore**) che si **espande** (= aumenta di volume).

Per capire meglio questo concetto, che ritroveremo poi subito nella struttura del motore a combustione interna, consideriamo un **gas** in un **contenitore rigido e chiuso**. Se al contenitore viene somministrato del **calore**, la **pressione** del gas all'interno aumenta; non abbiamo però ancora nessuna manifestazione di energia meccanica.

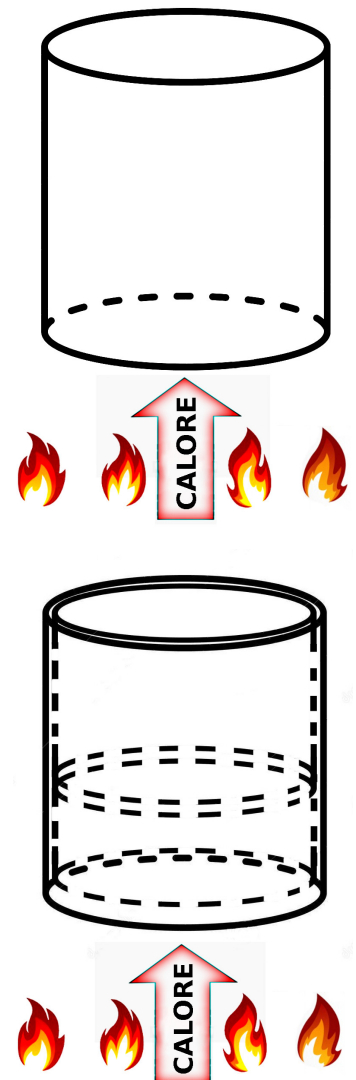
Se però il contenitore, anziché essere completamente rigido, ha una delle pareti, per esempio il tappo superiore, **libera di scorrere**, all'aumentare della pressione la **forza** esercitata dal gas sul tappo lo **sposta** in alto, vincendone il peso. **Il gas si espande**, cioè **aumenta di volume**; espandendosi il **gas compie un lavoro meccanico** ; infatti da Scienze sappiamo che

lavoro meccanico = forza x spostamento.

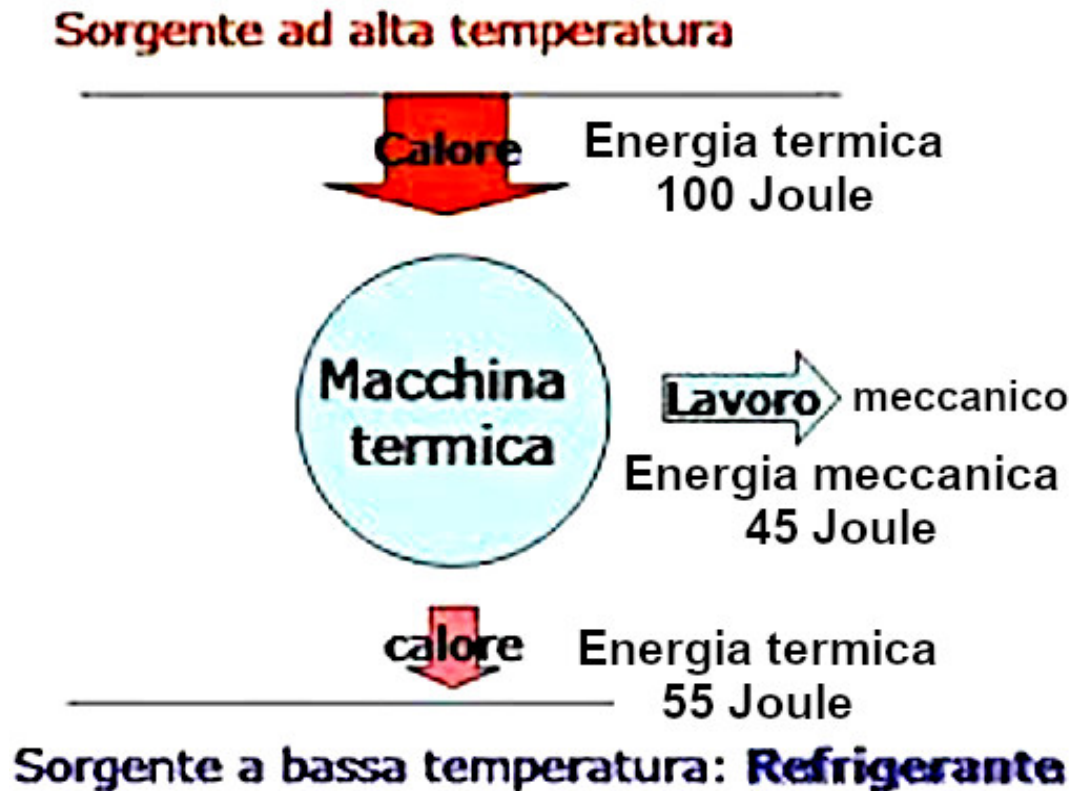
Inoltre sappiamo che **lavoro meccanico = energia meccanica**; una parte del calore che abbiamo somministrato al contenitore cilindrico si è trasformata quindi in energia meccanica.

Questo semplice dispositivo allora rappresenta un esempio di **macchina termica** che **produce energia meccanica**, proprio come fa il motore a combustione interna, del quale andremo a esaminare la struttura.

Nel motore a combustione interna il calore è fornito dalla combustione della **benzina**, il gas che lavora è costituito dai **fumi** (molto caldi) **della combustione**, detti anche **gas combusti**.



Abbiamo visto che il **motore** è una **macchina termica**, questa si può rappresentare evidenziando il **calore** ed il **lavoro meccanico** in **entrata** ed in **uscita**:



Flussi di energia in una Macchina Termica

Sorgente di calore ad alta temperatura: gas caldi prodotti dalla combustione della benzina (o del gasolio) (gas combustibili).

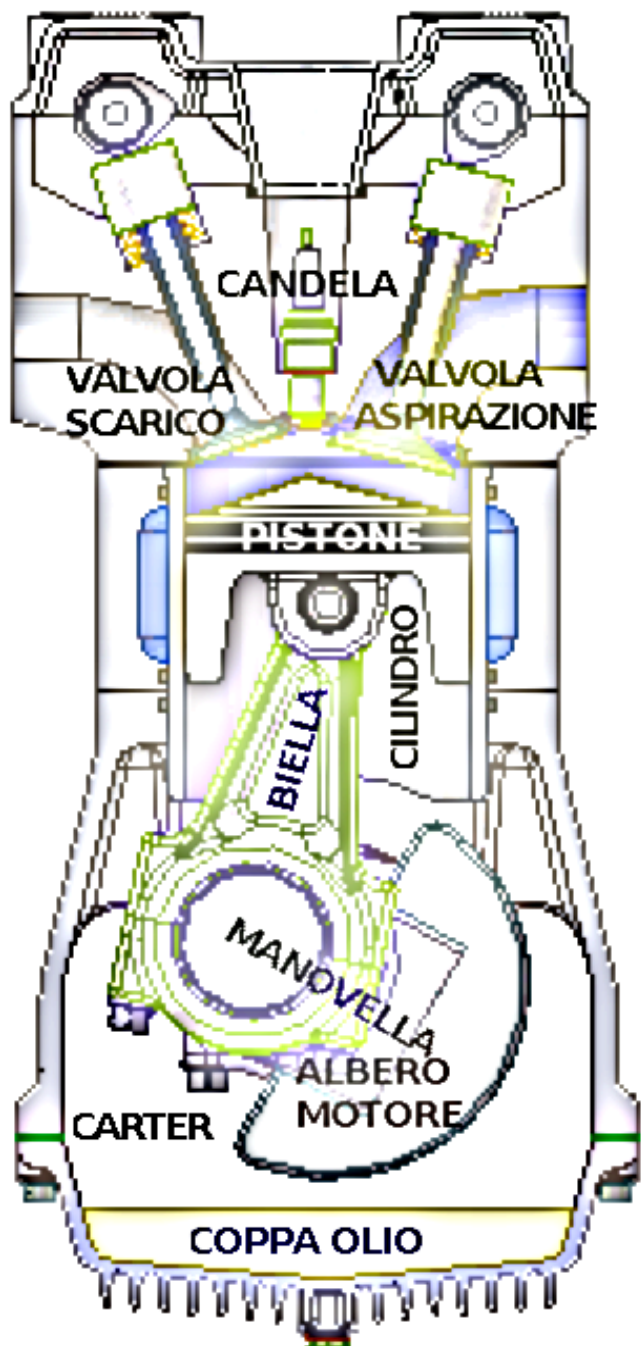
Nota: non è possibile trasformare **tutto** il **calore** (energia termica) disponibile nella sorgente ad alta temperatura (gas combustibili) in **lavoro meccanico** (energia meccanica), ma **solo una parte** (circa il 45%); la parte restante (circa 55%) rimane **calore** e viene trasmesso all'ambiente tramite l'**impianto di raffreddamento** (refrigerante, sorgente di calore a bassa temperatura); questa parte è **calore non convertibile** in energia meccanica.

Tipi di motori a combustione interna che studieremo:

- motore a **4 tempi** ad **accensione comandata** (carburante **benzina**);
- motore a **2 tempi** ad **accensione comandata** (carburante **benzina**);
- motore a **4 tempi** ad **accensione spontanea**
(motore **Diesel**, carburante **gasolio**).

Motore quattro tempi a benzina

Motore a combustione interna a quattro tempi ad accensione comandata
(carburante benzina)



In questa immagine vediamo una sezione del motore, come se fosse tagliato per vederne l'interno.

CILINDRO: è la cavità nella quale si espande il gas (fumo);

PISTONE: è il fondo mobile del cilindro, il gas espandendosi lo spinge in basso;

BIELLA e MANOVELLA: sono due aste attraverso le quali il pistone spinge l'albero motore, mettendolo in rotazione;

ALBERO MOTORE: è una barra di sezione circolare che, girando, rende disponibile all'esterno del motore l'energia meccanica prodotta;

VALVOLA DI ASPIRAZIONE: è un meccanismo che apre e chiude negli istanti opportuni il condotto attraverso il quale la miscela di aria e benzina entra nel cilindro;

VALVOLA DI SCARICO: è un meccanismo che apre e chiude negli istanti opportuni il condotto attraverso il quale il gas combusto (fumo) viene espulso dal cilindro;

CANDELA: è un dispositivo che, al momento opportuno, genera una scintilla elettrica che incendia la miscela aria-benzina;

CARTER: è la parte bassa del motore;

COPPA OLIO è la parte bassa del cartere, nella quale si raccoglie l'olio lubrificante.

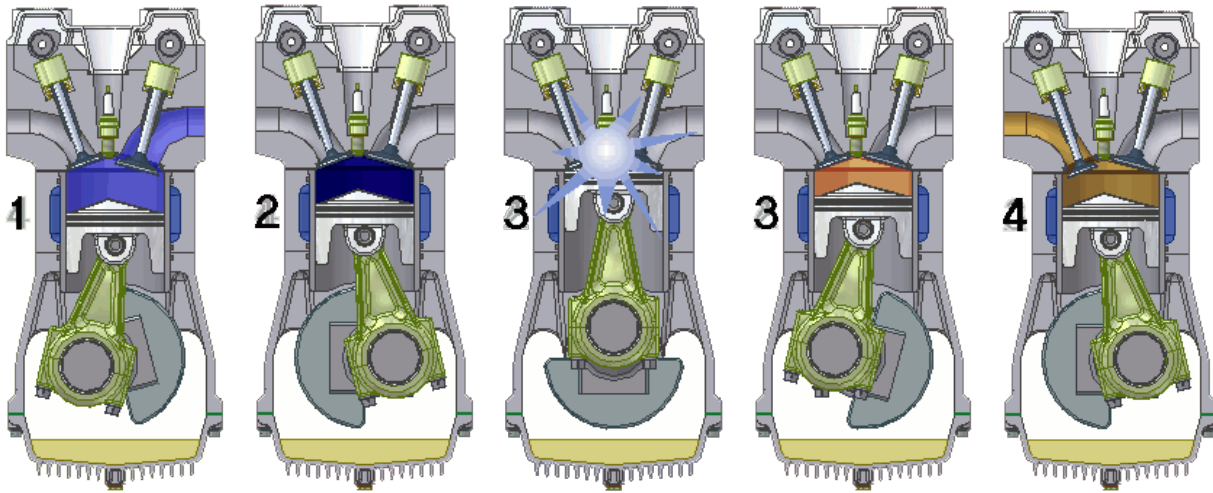
Per capire come si muovono i meccanismi del motore scaricare da Siribillo-Tecnologia <http://www.ppppiero.it/blog/tecnologia/> :

- il programma [GIF Viewer_portable.exe](#) (per PC Windows);

- l'animazione [Motore 4 tempi](#) (file *MOTORE_4TEMPI_benzina_animazione_01.gif*);

aprire *GIF Viewer* facendoci click sopra e poi su "Run", dalla finestra "Open" cercare e aprire l'animazione *MOTORE_4TEMPI_benzina_animazione_01.gif*: il programma permette di avviarla e fermarla a piacere, e di regolare la velocità (aumentando il numero (ms) nel campo in basso a destra la velocità di riproduzione diminuisce).

(Nota: se non avete un PC Windows ma un PC Linux, Mac o un dispositivo Android o iOS cercate un visualizzatore di immagini di tipo .gif che abbia funzioni simili a quelle di GIF Viewer



Fasi di funzionamento del motore 4 tempi:

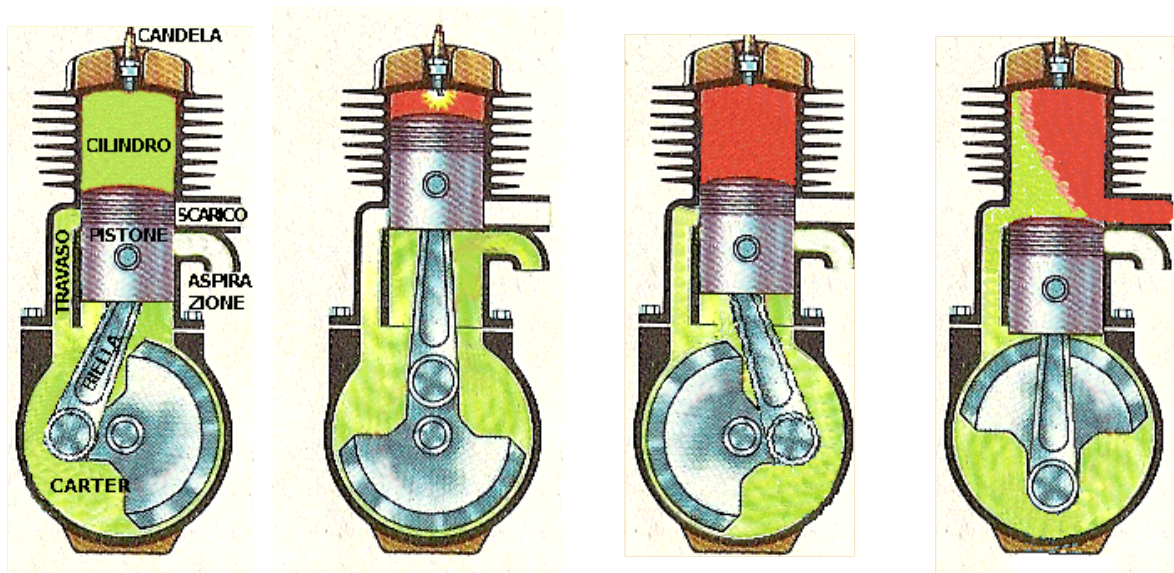
- **Fase 1: aspirazione:** il pistone scende dal p.m.s. (punto morto superiore), la valvola di aspirazione si apre, la miscela aria-benzina (preparata dal carburatore) viene aspirata all'interno del cilindro; la valvola di aspirazione si chiude; il pistone arriva al p.m.i. (punto morto inferiore);
- **Fase 2: compressione:** le valvole sono entrambe chiuse, il pistone sale dal p.m.i. (punto morto inferiore), e salendo comprime la miscela aria-benzina, il pistone arriva al p.m.s. (punto morto superiore);
- **Fase 3: scoppio, espansione:** la candela produce una scintilla che incendia la miscela, grazie al calore prodotto dalla combustione (energia chimica → energia termica) la temperatura e pressione dei gas combusti si alzano notevolmente; i gas caldi e in pressione spingono in basso il pistone espandendosi (il volume che occupano aumenta); il pistone arriva al p.m.i..
Questa fase è detta "fase utile"; è la più importante perché è la sola durante la quale viene prodotto il lavoro meccanico (= energia meccanica = forza x spostamento = = forza esercitata dai gas sul cielo del pistone x spostamento del pistone dal p.m.s. al p.m.i.); una parte di questa energia meccanica non viene fornita dal motore all'esterno ma viene immagazinata nel volano ed utilizzata per azionare le altre tre fasi di funzionamento.
- **Fase 4: scarico** il pistone sale dal p.m.i. (punto morto inferiore), la valvola di scarico si apre lasciando uscire i gas combusti che vengono spinti fuori dal cilindro verso l'impianto di scarico (marmitta); il pistone arriva al p.m.s. (punto morto superiore), la valvola di scarico si chiude; il cilindro è pronto per iniziare un nuovo ciclo, ricominciando dalla fase di aspirazione.

Nel motore a 4 tempi si ha **una** fase di **espansione** ogni **due giri** dell'albero motore

Motore due tempi a benzina

Motore a combustione interna a due tempi ad accensione comandata.

Struttura del motore: non ha le valvole, che sono sostituite dalle **luci** di aspirazione, scarico e travaso.



Per studiare questo motore scaricare da Siribillo-Tecnologia <http://www.ppppiero.it/blog/tecnologia/> l'animazione **Motore 2 tempi** (file *motore_2T_animazione.gif*) e aprirla sempre attraverso il programma di visualizzazione **GIF Viewer portable.exe** (per PC Windows); partire dal frame 4.

Funzionamento del motore 2T:

- **aspirazione**: il pistone sale dal p.m.i. (punto morto inferiore), la camera del carter va in depressione, si apre la **luce di aspirazione** (frame 4 e 1 della gif), il carter aspira dal collettore di aspirazione la miscela **aria-benzina-olio** preparata dal carburatore; il pistone arriva al p.m.s. (punto morto superiore);
- **travaso**: il pistone scende, la luce di travaso si apre, la miscela nel carter viene spinta attraverso il condotto e la luce di travaso nella parte superiore (cilindro);
- **compressione**: il pistone sale verso il p.m.s., le luci si chiudono e la miscela aria-benzina-olio viene compressa;
- **scoppio ed espansione**: la candela produce una scintilla che incendia la miscela, la temperatura e pressione dei gas combusti si alzano notevolmente; i gas caldi e in pressione spingono in basso il pistone espandendosi: questa è la **fase utile**, nella quale viene prodotto il lavoro meccanico, per questo l'espansione è la fase più importante;
- **scarico**: verso la fine della corsa discendente si apre la luce di scarico e i gas combusti escono dal cilindro, convogliati verso la marmitta;

Nel motore a 2 tempi si ha **una fase di espansione** ogni **giro** dell'albero motore

Alcune di queste fasi, che abbiamo descritto in sequenza, avvengono contemporaneamente, divise tra parte inferiore (carter) e parte superiore (cilindro), in modo che ci sia **una fase utile (espansione) ogni giro**.

Fasi di funzionamento del motore 2T:

- **Fase 1 (il pistone sale): compressione, aspirazione;** il pistone sale dal p.m.i. (punto morto inferiore), la camera del carter va in depressione, si apre la luce di aspirazione (frame 4 e 1), il carter aspira dal collettore di aspirazione la miscela aria-benzina-olio, il pistone arriva al p.m.s. (punto morto superiore); contemporaneamente nel cilindro, le luci sono chiuse e la miscela travasata al ciclo precedente viene compressa dal pistone che sale;
- **Fase 2 (il pistone scende): scoppio, espansione, scarico, travaso** (frame 1, 2 e 3), la candela produce una scintilla che incendia la miscela, la temperatura e pressione dei gas combusti si alzano notevolmente; i gas caldi e in pressione spingono in basso il pistone espandendosi, la luce di scarico si apre lasciando uscire i gas combusti, si apre anche la luce di travaso, la miscela contenuta nel carter viene spinta attraverso il condotto di travaso nel cilindro.

Poichè durante la fine della corsa discendente le luci di scarico e travaso per un certo periodo sono aperte contemporaneamente, parte della miscela fresca entrante nel cilindro dal travaso finisce direttamente nello scarico senza venire bruciata; questo fatto è la causa di alcuni degli **svantaggi del motore 2T**:

- **benzina incombusta nello scarico** (→ inquinamento e maggior consumo: questa è comunque benzina consumata ma che non fornisce lavoro meccanico: la sua energia chimica viene sprecata)

Differenze tra motore 2 tempi e 4 tempi

- il motore a **due tempi**:

- **non ha le valvole**, perciò è più **semplice ed economico** da costruire e mantenere;

- è **più leggero** (a parità di potenza, oppure è **più potente**, a parità di peso: ha una fase utile **ogni giro**);

- ha la lubrificazione non separata, perciò **brucia olio** (→ **inquina di più**);

- a parità di potenza **consuma di più** (scarica **benzina incombusta**);

- a parità di potenza **inquina di più** (scarica benzina incombusta e brucia olio);

- è preferito per le **motociclette leggere** e piccole macchine portatili:
(motoseghe, decespugliatori);

- il motore a **quattro tempi**:

- **ha le valvole**, perciò è più **complesso e costoso** da costruire e mantenere;

- è **più pesante** (a parità di potenza, oppure è meno potente, a parità di peso: ha una fase utile **ogni due giri**);

- ha la **lubrificazione separata**, perciò **non brucia olio** ma solo benzina;

- a parità di potenza **consuma di meno**;

- a parità di potenza **inquina di meno** (non scarica benzina incombusta);

- è preferito per le **automobili**.

Motore quattro tempi Diesel

Motore a combustione interna a quattro tempi ad accensione spontanea
(Diesel → carburante **gasolio**)

Perchè è stato inventato il motore Diesel?

Per capirlo facciamo un salto indietro. La **macchina a vapore**, inventata nel '700, rendendo disponibili enormi quantità di energia meccanica aveva sconvolto la storia facendo nascere l'**industria**, le **navi** e i **treni** a vapore. A causa però del basso rapporto potenza/peso, gli esperimenti per ottenere sia un'**automobile** a vapore (carro a vapore di Cugnot) che un **aereo** a vapore (Éole di Clément Ader) erano falliti. A metà dell'800 gli italiani **Barsanti** e **Matteucci** inventarono il **motore a combustione interna**: Alimentato a benzina, essendo leggero e potente rese possibili l'automobile (Benz 1886) e l'aereo (Wilbur e Orville Wright, 1903). Allora che bisogno c'era di inventare un altro motore a combustione interna?

La ragione sta nel modo in cui viene prodotta la benzina. Infatti questa, come vedremo meglio più avanti, viene ottenuta nella **raffineria separando** le componenti più leggere del **petrolio**. Quindi durante la raffinazione della benzina dalle componenti più pesanti del petrolio vengono **inevitabilmente** prodotti anche **altri combustibili**, più densi, tra i quali il **cherosene**, il **gasolio**, l'**olio combustibile** pesante.

Questi altri combustibili, però, messi nel motore a combustione interna di Barsanti e Matteucci non funzionavano. Il gasolio, quando all'inizio della fase 3 (scoppio-espansione) scoccava la scintilla della candela, non si accendeva.

Questa la ragione che spinse l'ingegnere tedesco Rudolf **Diesel** a **modificare il motore a combustione interna per renderlo in grado di funzionare anche a gasolio**, e utilizzare finalmente anche questo combustibile.

Per studiare il motore **Diesel** possiamo utilizzare sempre l'animazione *MOTORE_4TEMPI_benzina_animazione_01.gif*.

Struttura del motore: non ha la candela, ma un **iniettore**: è una valvolina a molla alla quale arriva un tubicino che porta il gasolio dalla pompa di iniezione: quando la pompa spinge il gasolio l'iniettore si apre iniettando il gasolio polverizzato in tante goccioline all'interno del cilindro.

Fasi di funzionamento del motore Diesel: sono come quelle del benzina, ma:

- nella **fase 1 (aspirazione)** nel cilindro entra solo aria (non miscela aria-benzina);
- nella **fase 2 (compressione)** l'aria viene compressa con un rapporto molto maggiore: il volume dell'aria viene ridotto di 20 volte, mentre nel benzina viene ridotto di circa 10 volte: perciò il motore deve essere più robusto e pesante, e vibra di più;
- nella **fase 3 (scoppio ed espansione)** il gasolio viene **inieettato** nel cilindro polverizzato in piccole goccioline e, a contatto con l'aria che durante la compressione è diventata molto calda (circa 800°C), prende fuoco spontaneamente (non c'è scintilla né candela); segue l'**espansione** uguale a quella del motore a benzina;
- **fase 4 (scarico)**: identica a quella del motore a benzina.

Differenza tra accensione spontanea (Diesel, gasolio) e accensione comandata (benzina)

Il motore **Diesel**:

- brucia **gasolio**, che è un combustibile **meno pregiato** e perciò **meno costoso**;
 - **consuma di meno**;
 - **non ha la candela**: non aspira una miscela aria benzina ma solo aria; il gasolio viene iniettato nebulizzato nel cilindro dopo la fase di compressione e si incendia spontaneamente;
 - è **più pesante** a parità di potenza, è meno potente a parità di peso;
 - è **più rumoroso** e produce più **vibrazioni** (causa alto r.c., esplosione violenta);
 - **inquina di più** (emette particolato PM10, ha necessità del filtro anti particolato FAP);
 - è utilizzato per le auto (con alti chilometraggi) ma soprattutto su **veicoli pesanti**: **autobus, camion**, macchine per movimento terra, **navi**.

Il motore a **benzina**:

- brucia **benzina**, che è un combustibile più **pregiato** e quindi più **costoso** del gasolio;
- **consuma di più**;
- ha la **candela**: questa produce una scintilla che avvia la combustione della miscela aria-benzina;
- è **più leggero** (a parità di potenza, oppure è **più potente**, a parità di peso);
- è **più silenzioso** e produce **meno vibrazioni**;
- **inquina di meno** (particolato);
- è utilizzato per le **auto** ma non è usato su veicoli pesanti.

Sistemi di alimentazione dei motori a combustione interna

L'impianto di **alimentazione** porta il **carburante** (BENZINA o GASOLIO) al motore. È composto da **serbatoio + pompa del carburante + carburatore** oppure **iniettori**.

IMPORTANZA DEL SISTEMA DI ALIMENTAZIONE

L'impianto di alimentazione ha il compito importantissimo di **dosare le giuste quantità di aria e combustibile**.

I sistemi di alimentazione più moderni permettono un **dosaggio più preciso** del combustibile, che consente di avere **minor consumo e minor inquinamento**.

Tipi di impianti di alimentazione:

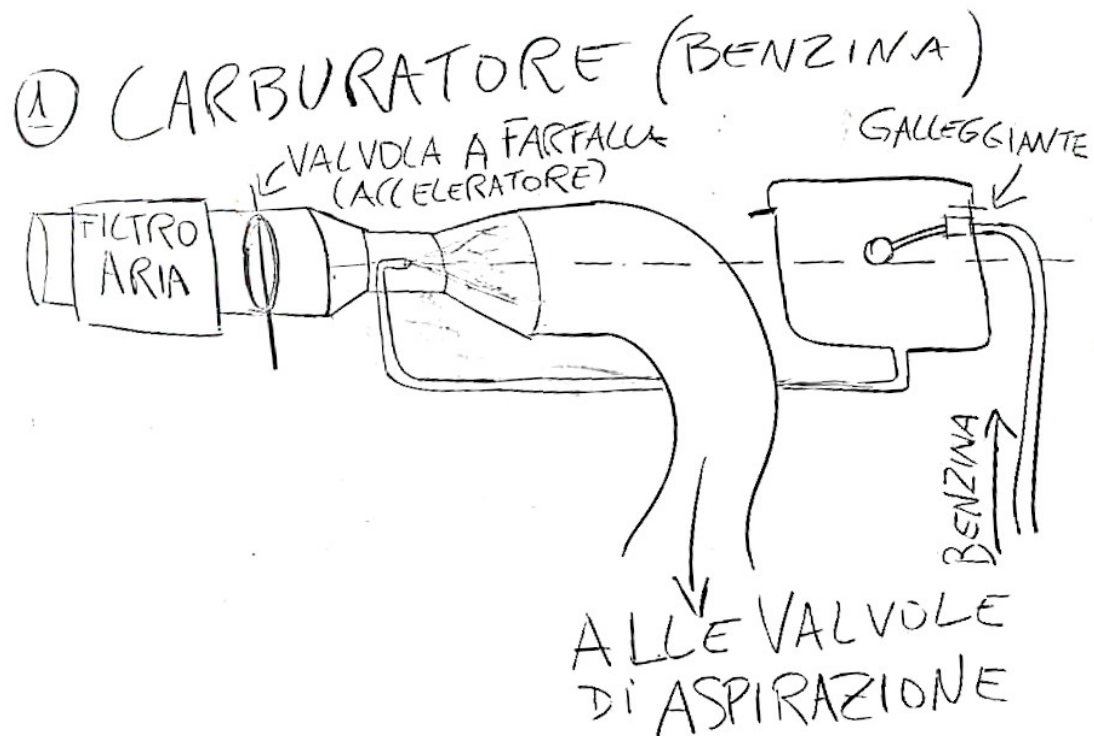
Motori a BENZINA: 1. CARBURATORE (motori vecchi)

2. INIEZIONE ELETTRONICA (motori nuovi)

Motori DIESEL: 3. INIEZIONE MECCANICA (motori vecchi)

4. INIEZIONE COMMON RAIL (motori nuovi - chiamato dalla Fiat "multijet")

1. **CARBURATORE** (motori a benzina vecchi):



2. INIEZIONE ELETTRONICA (motori a benzina nuovi)



La **centralina elettronica** riceve i segnali dai **sensori** che misurano la quantità dell'aria, la posizione del pedale dell'acceleratore, la velocità di rotazione del motore e che controllano i fumi di scarico (sonda lambda) per capire quanta benzina viene bruciata correttamente oppure rimane incombusta. Sulla base di queste misure la centralina decide istante per istante la **quantità di benzina** da mandare al motore tramite l'**iniettore**.

La **marmitta catalitica** modifica i gas di scarico e li fa diventare meno inquinanti, ma per funzionare ha bisogno che il **combustibile** sia **dosato con precisione**; perciò non si applica ai motori con carburatore ma solo a quelli con iniezione.

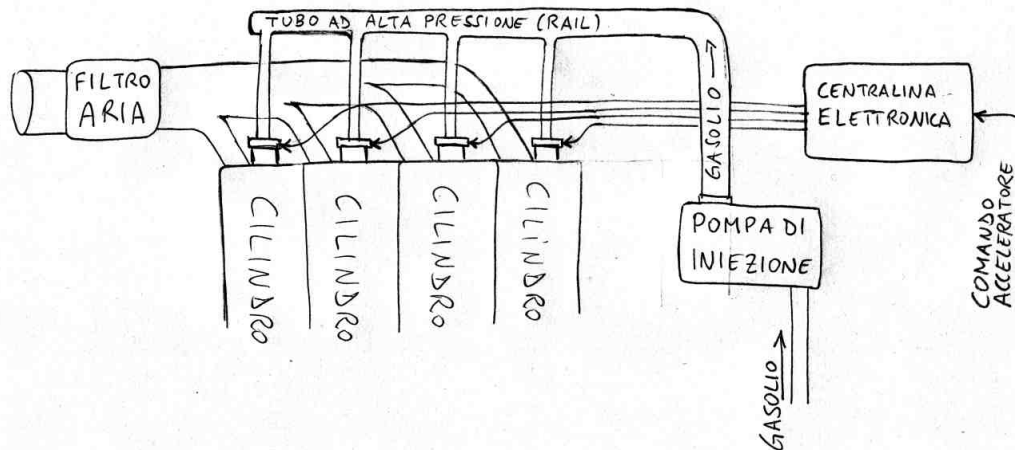
3. INIEZIONE MECCANICA (motori Diesel vecchi)



Ogni cilindro ha suo **iniettore**; al momento giusto (fine della fase di compressione), la **pompa di iniezione** spinge nell'iniettore la quantità giusta di **gasolio** (a seconda della posizione dell'acceleratore). Il gasolio nei tubicini ha una **pressione** di circa **200 bar**.

4. INIEZIONE COMMON RAIL (motori Diesel nuovi):

④ INIEZIONE COMMON RAIL (GASOLIO) (INVENZIONE FIAT)



Inventato dalla Fiat, poi ceduto a Bosch. A differenza di quello precedente, questo sistema lavora con pressione del gasolio a **2000 bar**, facendo **goccioline di gasolio** molto **più piccole**; inoltre produce più iniezioni, cioè micro getti, in ogni fase di combustione. E' quindi in grado di controllare meglio l'esplosione e la combustione (-> **minor consumo e minor inquinamento**).

RAIL = collettore, cioè tubo con tante uscite. Gli iniettori hanno valvole piezoelettriche comandate dalla **centralina elettronica** che decide quando aprirle (movimenti velocissimi = MULTIJET).

Sistemi ausiliari del motore a combustione interna

Oltre alla parte principale, che è quella del **blocco cilindri**, e al sistema di alimentazione, che abbiamo già esaminato, il motore per funzionare ha bisogno di altri importanti **sistemi ausiliari**:

- **1** impianto di **accensione**: fornisce corrente elettrica alle **candele**;
- **2** impianto di **raffreddamento**: estrae dal motore la parte di **calore non convertita in energia meccanica**. Può essere ad **acqua** (radiatore) o ad **aria**;
- **3** impianto di **lubrificazione**: pompa e circuito dell'**olio**;
- **4** impianto **elettrico**: (generatore, batteria, motorino di avviamento);
- **5** impianto di **trattamento gas di scarico**: serve per ridurre le emissioni inquinanti (marmitta catalitica, in più per i Diesel: FAP filtro anti particolato / DPF Diesel Particulate Filter).

Sistemi di sovralimentazione del motore a combustione interna

Permettono, a parità di cilindrata (e quindi di peso) di **aumentare la potenza** del motore.

-1) testata **plurivalvole**;

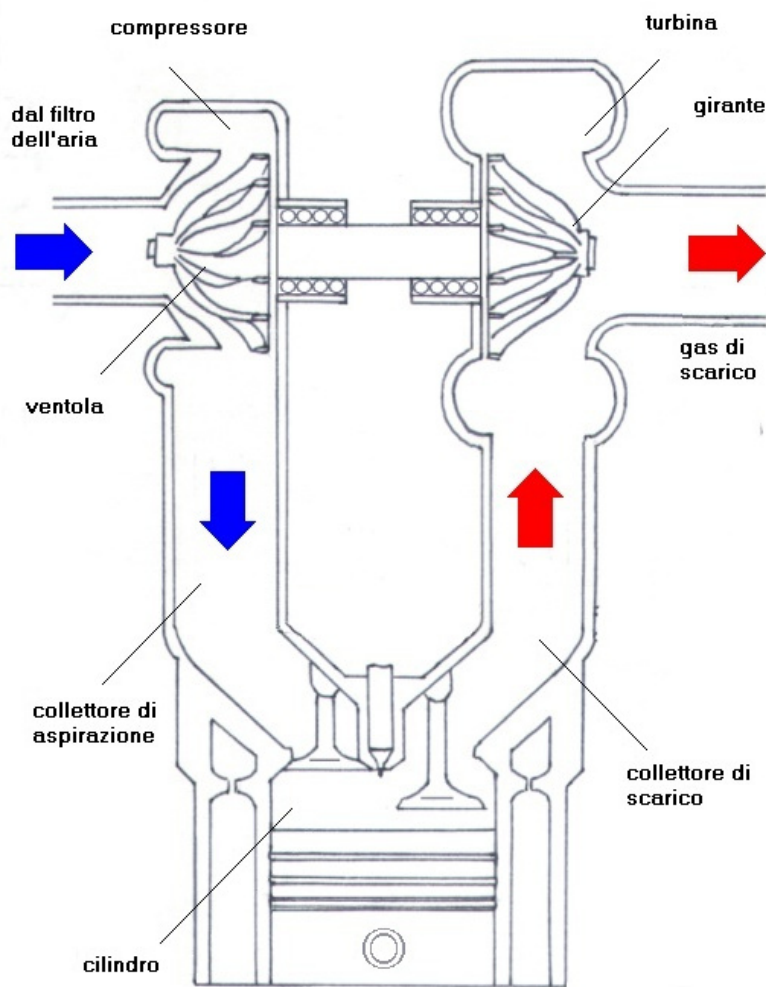
-2) **fasatura variabile delle valvole** (Honda V-TEC, Fiat Multiair);

-3) **turbocompressore**.

È un sistema di **sovralimentazione** che **aumenta la potenza** prodotta dal motore a combustione interna. Nato per applicazioni aeronautiche (compensa la diminuzione della pressione atmosferica con la quota), aumenta la potenza a parità di cilindrata (e perciò a parità di peso); perciò oggi molto usato sui **Diesel**, che senza turbo sono pesanti e poco potenti.

Svantaggio del turbocompressore: ritardo in accelerazione (turbo lag).

Il turbocompressore gira molto veloce (200'000 giri al minuto!) ed è sottoposto a elevate sollecitazioni termiche (temperature molto elevate nel collettore di scarico e nella turbina).



Il turbocompressore è costituito da un **compressore** e da una **turbina** calettati sullo stesso asse.

Il compressore **comprime** l'aria in ingresso al motore e la invia al condotto di aspirazione; in questo modo nel cilindro entrano **più aria** e **più combustibile**, quindi il motore funziona **come se avesse una cilindrata maggiore**.

I **gas combusti** che escono dal collettore di scarico passano nella **turbina** e spingendo le palette la fanno girare. La turbina estrae **energia** dai gas combusti e la converte in **energia meccanica**, che serve ad azionare il compressore.

Notare che nella **turbina** i gas combusti subiscono una **espansione**, producendo del **lavoro meccanico**, proprio come succedeva nella fase 3 (scoppio-espansione) del motore a combustione interna.