

# **UNIVERSITA` DEGLI STUDI DI PADOVA**

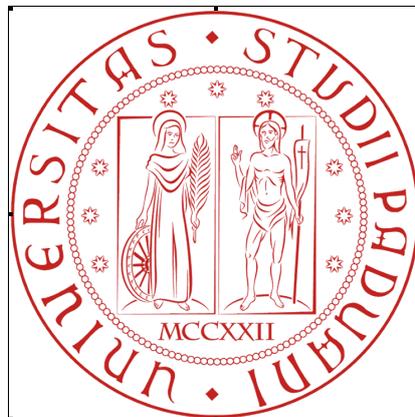
## **FACOLTA` DI INGAGNERIA**

**Titolo: Il confronto tra i rendimenti dalla fonte alla ruota per:**

- 1. auto con motore endotermico**
- 2. auto elettrica**
- 3. auto con idrogeno e fuel cell**

**Title: The comparison between the returns from the source to the wheel:**

- 1. cars with combustion engine**
- 2. electric cars**
- 3. cars with hydrogen and fuel cell**



**ANNO ACCADEMICO 2009/2010**

**Laureando Roberto Agnolin**

**Relatore Prof. Arturo Lorenzoni**

# Indice

<b>Sommario</b>	pagina 2
<b>La Macchina a combustione interna</b>	
Introduzione	pagina 3
Teoria della Macchina a combustione interna	pagina 3
Principio di funzionamento della macchina endotermica	pagina 7
Motore ad accensione comandata	pagina 12
Motore ad accensione spontanea	pagina 22
<b>La macchina elettrica</b>	
Rendimenti della produzione dell'energia elettrica	pagina 26
Rendimento della linea elettrica	pagina 28
Teoria del motore asincrono	pagina 29
<b>La macchina ad idrogeno</b>	
Produzione dell'idrogeno	pagina 40
Teoria della macchina ad idrogeno	pagina 42
Fuel cell	pagina 43
<b>Confronto dei vari rendimenti</b>	pagina 48
<b>Conclusioni</b>	pagina 51
<b>Bibliografia</b>	pagina 53
<b>Sitografia</b>	pagina 53

## **Sommario**

La tesi si propone di affrontare il calcolo dei rendimenti dalla fonte alla ruota di tre tipologie di autovetture: a combustione interna, elettriche, ad idrogeno. Si è potuto notare che le prime due tipologie possiedono una tecnologia affermata nel tempo invece la terza presenta ancora lacune da un punto di vista tecnologico. Il confronto ha evidenziato un rendimento più elevato della macchina elettrica rispetto alle altre due che per quanto riguarda la vettura ad idrogeno presenta un rendimento non ancora ben stabilito essendo essa stessa in via di sviluppo. La seconda possiede sì il rendimento minore rispetto le altre due ma d'altro canto è l'unica ha possedere una tecnologia affidabile e che possiede il mantenimento di alcuni standard come l'autonomia che è molto limitata per quanto riguarda l'auto elettrica e la mancanza di idrogeno per rifornire le vetture. Si deve inoltre tener conto che l'auto con motore endotermico è la tipologia che possiede l'impatto ambientale più gravoso. Per questo motivo si stanno cercando altri motori per la trazione dell'autovetture.

# **La macchina a combustione interna**

## **Introduzione**

Prima di analizzare il motore endotermico di un'autovettura si deve tener conto dei vari rendimenti sono necessari per ottenere il carburante. A questo proposito si deve far riferimento non tanto al rendimento medio di un pozzo petrolifero oppure al rendimento con cui la flora è cresciuta prima di trasformarsi in petrolio; ma si devono considerare i rendimenti dei vari processi chimici che il greggio subisce per diventare carburante adatto per essere adatto alla combustione nel motore endotermico di un'autovettura. Oltre ai rendimenti dei vari processi chimici delle raffinerie si devono considerare le perdite che si sostengono durante la distribuzione sia della materia prima sia del prodotto pronto per l'uso. Si può considerare il rendimento della distribuzione del carburante pari al 75% e quello di una raffineria possa aggirarsi attorno al 75% anche se in un prossimo futuro si pesa possa arrivare al 80% e poi al 90%.

Non essendoci altre perdite di energia prima di arrivare al serbatoio dell'autovettura endotermica si può passare alla sua analisi per capirne il rendimento e dove si trovino le maggiori perdite e se in un futuro queste possano essere ridotte in qualche modo.

## **Il motore a combustione interna**

### **ORIGINI**

Il motore a combustione interna (MCI) rappresenta la più diffusa macchina termica mai realizzata dall'uomo: il suo impiego trova infinite applicazioni sotto forma di motori estremamente differenti in termini di potenza, dimensioni, modalità di funzionamento, soluzioni costruttive e settori di applicazione, spaziando dai grandi motori marini ai micromotori per modellismo. La ragione di una tale capacità di soddisfare le più disparate richieste di potenza deve essere ricercata nella facilità di regolazione e di adattamento che questa macchina possiede. Infatti il MCI si è adattato velocemente ai bisogni civili e industriali dell'uomo, consentendo la

Rendimento dalla fonte alla ruota

realizzazione dell'automobile, della motocicletta, del volo e della produzione di energia laddove era impossibile con altri mezzi. Ha, dunque, accorciato le distanze rendendo possibile viaggiare a velocità sempre maggiori e ha migliorato le comunicazioni, gli scambi culturali e il trasporto delle merci, senza dimenticare lo sviluppo delle corse automobilistiche che rappresentano uno dei migliori esempi di integrazione tra macchina ed essere umano, nell'infinita ricerca dell'uomo di superarsi e di superare i limiti naturali.

Un MCI è una macchina motrice alternativa endotermica, cioè converte il calore generato internamente dalla reazione di ossidazione di un combustibile in un moto alternativo dei pistoni e, quindi, in lavoro meccanico che, escludendo le perdite per la movimentazione degli organi ausiliari e i rendimenti meccanici lungo l'intera linea di trasmissione del moto, si rende utile all'avanzamento del veicolo. L'origine del MCI risale alla metà del XIX secolo ma i primi tentativi di ottenere lavoro meccanico, dall'esplosione di polvere pirica, risalgono alla fine del 1600 con Jean de Hautefuille e Christian Huygens. Dati gli scarsi risultati è solo agli inizi del 1800 che si registra una forte ripresa di esperimenti e di studi che portano studiosi come Lebon d'Humbersin a operare con gas illuminante, Nicolas Léonard Sadi Carnot a pubblicare nel 1824 *Riflessioni sul potere del calore di indurre movimento* e negli anni seguenti Samuel Brown, Wellman Wright e William Barnet a realizzare in Inghilterra alcuni motori a gas.

## **MOTORE BARSANTI MATTEUCCI**

La paternità dell'invenzione va attribuita, nel 1853, agli italiani Eugenio Barsanti e Felice Matteucci: documenti e brevetti presenti in diversi Paesi europei non dovrebbero lasciare ombra di dubbio. Tuttavia, in alcune enciclopedie straniere e in taluni testi scolastici, l'invenzione del motore non viene attribuita ai due italiani.

Oggi veniamo a conoscenza quasi istantaneamente di ciò che avviene in



**Fig. 1** Motore del 1858 di Barsanti e Matteucci a stantuffi contrapposti

ogni angolo del nostro pianeta; un tempo era probabile che persone diverse in luoghi diversi, e non necessariamente lontani tra di loro, potessero lavorare a esperimenti simili, partendo da una conoscenza di base comune, senza essere a conoscenza l'uno del lavoro dell'altro.

Il primo motore funzionante con una certa regolarità fu proprio quello di Barsanti e Matteucci, di cui furono depositati i disegni e una precisa descrizione all'Accademia dei Gergofili, nel 1853, e al quale fanno riferimento diversi brevetti in Inghilterra, Francia, Belgio e Italia.

Il motore di Barsanti e Matteucci è costituito da un cilindro verticale ed è di tipo gravio-atmosferico, con funzionamento ad azione differita. Una miscela di aria e idrogeno, introdotta nel cilindro tramite alcune valvole a cassetto, viene accesa Fig. 1 Motore del 1858 di Barsanti e Matteucci a stantuffi contrapposti da una scintilla prodotta da un apparato elettromagnetico di Ruhmkorff, e la sua combustione provoca l'improvviso innalzamento dello stantuffo. In questa fase, detta di espansione, non si produce lavoro utile, cioè lo stantuffo è libero di muoversi lungo la sua corsa ascendente e si impegna con l'albero motore solo nella fase discendente, essendo il suo moto collegato tramite cremagliera e ruota matta. Quando lo stantuffo si trova nella sua massima quota il prodotto della combustione condensa rapidamente provocando una forte depressione nel cilindro; lo stantuffo, quindi, viene richiamato rapidamente verso il basso, sia dalla differenza di pressione tra l'interno e l'esterno del cilindro, sia dal suo peso. Successivamente la carica viene rinnovata o per mezzo di valvole o, in alcuni motori, tramite uno stantuffo ausiliario. Con questo processo l'energia della combustione viene immagazzinata in energia potenziale che, solo in un secondo momento, viene trasformata in energia meccanica. Barsanti e Matteucci si resero conto che era possibile ottenere il maggiore lavoro, a parità di carica utilizzata. Nelle più riuscite realizzazioni, il motore Barsanti e Matteucci raggiunse potenze eccezionali per l'epoca nell'ordine degli 8 CV con rendimento complessivo del 14%, cinque volte superiore rispetto ai migliori impianti a vapore del tempo.

## EVOLUZIONE DEL MCI

Due anni dopo Jean Etienne Lenoir realizza un motore simile con funzionamento ad azione diretta e un rendimento del 4%. Sostenuto fortemente dal governo francese fu lanciato come novità assoluta ed ebbe fama e riconoscimenti in tutta Fig. 2 Motore Lenoir del 1860 l'Europa, ignorando l'esperienza dei due inventori italiani. E' sempre nel 1860 che Alphonse Beau de Rochas studia e definisce teoricamente il ciclo a quattro tempi così come lo



Fig. 2 Motore Lenoir del 1860

intendiamo ancora oggi. Nel 1867 Nikolaus August Otto e Eugen Langen presentano all'Esposizione Internazionale di Parigi un motore, con un rendimento del 12%, sostanzialmente uguale a quello di Barsanti e Matteucci che ebbe una grande diffusione. Solo nel 1876 gli stessi inventori realizzano un motore a quattro tempi basato sul ciclo di Beau de Rochas. Tale motore ebbe un tale successo, ne furono prodotti circa 50.000 esemplari, che ancora oggi chiamiamo ciclo Otto quello ideato da Beau de Rochas. Nel corso della storia molti progressi sono stati compiuti per migliorare l'efficienza termodinamica, basti pensare ai grandi motori diesel navali dei nostri giorni che realizzano rendimenti dell'ordine del 54%, ma nessuno dei successi, di volta in volta Fig. 3 Motore Otto e Langen del 1867 torio dell' albero motore, che è l'organo da cui viene prelevato il lavoro prodotto. Se tale reazione di ossidazione viene innescata dallo scoccare di una scintilla (comandata da un opportuno sistema di accensione fasato con l'albero motore) allora si parlerà di motori ad accensione comandata SI



Fig. 3 Motore Otto e Langen del 1867

Spark Ignition; si parla di motori ad accensione spontanea CI Compression Ignition nel caso in cui il motore preveda una camera di combustione ove si raggiungano condizioni di temperatura e pressione tali da innescare l'autoaccensione della miscela aria/carburante. realizzati, portò a un aumento di rendimento dell'ordine di quello ottenuto dai due geniali inventori italiani.

## **FUNZIONAMENTO**

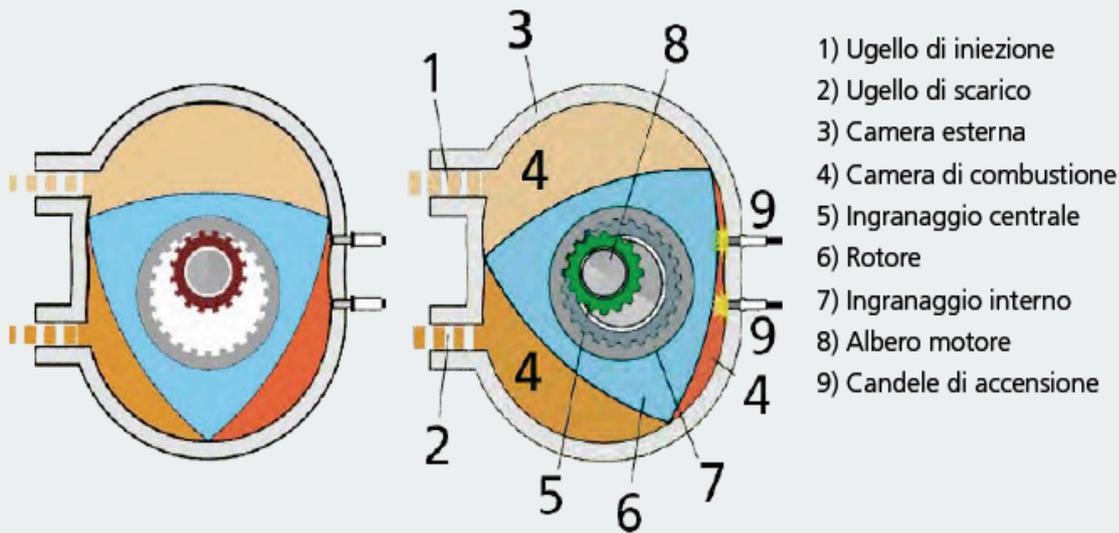
I motori alternativi a combustione interna, ossia quelli che sono comunemente montati sulla maggioranza dei veicoli terrestri, sono macchine motrici termiche che forniscono lavoro all'albero attraverso la combustione discontinua del combustibile in una o più camere di lavoro il cui volume viene fatto variare per mezzo del moto di stantuffi che scorrono all'interno di cilindri chiusi superiormente da una testata. L'energia liberata dalla combustione del fluido motore, consistente in aria a cui viene aggiunto del combustibile, viene ceduta allo stantuffo il cui moto alterno viene poi convertito, attraverso un meccanismo biella-manovella, nel moto rotatorio dell'albero motore, che è l'organo da cui viene prelevato il lavoro prodotto. Se tale reazione di ossidazione viene innescata dallo scoccare di una scintilla (comandata da un opportuno sistema di accensione fasato con l'albero motore) allora si parlerà di motori ad accensione comandata SI Spark Ignition; si parla di motori ad accensione spontanea CI Compression Ignition nel caso in cui il motore preveda una camera di combustione ove si raggiungano condizioni di temperatura e pressione tali da innescare l'autoaccensione della miscela aria/carburante.

## Il motore Wankel

Il motore Wankel, è così chiamato dal nome del suo inventore, Felix Wankel, che lo ideò nel 1950.

È un motore a combustione interna di tipo rotativo in quanto il pistone a tre lobi ruota eccentricamente intorno all'albero motore, generando con il suo movimento le fasi di:

1. Aspirazione
2. Compressione
3. Scoppio
4. Scarico.



**Fig. 4** Il motore Wankel

**Fig. 5** Funzionamento del motore Wankel

I principali vantaggi di questo tipo di motori risiedono nell'assenza di masse in moto alterno (sui motori alternativi sono bielle, pistoni e spinotti) e, quindi, nell'assenza di forze di inerzia del secondo ordine che possono essere bilanciate da opportune masse poste in rotazione a una velocità doppia rispetto a quella dell'albero motore.

L'assenza di queste forze di inerzia nonché di una massa volante (sostituita dal rotore stesso) consente a questo tipo di motore di avere forti accelerazioni e valori di potenza specifica più elevati rispetto ai motori alternativi grazie alla possibilità di raggiungere regimi di rotazione maggiori. Inoltre il motore Wankel è costruttivamente molto più leggero e compatto dei normali propulsori a pistoni alternati.

Nonostante i notevoli progressi tecnologici nel campo delle leghe metalliche i problemi del Wankel sono soprattutto di carattere costruttivo e riguardano in particolare il rotore che è sottoposto a brusche escursioni termiche di circa 900°C.

Inoltre, data la sua conformazione spigolosa, subisce violenti strisciamenti contro la parete dello statore, che riducono la tenuta idraulica delle guarnizioni limitando il rendimento e generando una combustione errata con conseguenti emissioni nocive. Le normative europee e internazionali sempre più stringenti rendono difficoltosa la sopravvivenza stessa di tale tipo di motore.

## Grandezze fisiche e termodinamiche

Indicando con  $a$  la lunghezza in metri  $m$  della manovella, la distanza tra il PMS Punto Morto Superiore e il PMI Punto Morto Inferiore è la corsa  $c$  del pistone, ed è valida pertanto la relazione:

$$c = 2a \text{ [m]}$$

Il volume minimo della camera si chiama spazio morto; la differenza tra il volume massimo e il volume minimo (pari al volume spazzato dal pistone in una corsa) è la cilindrata  $V_c$ :

$$V_c = (\pi D^2 c) / 4 \text{ [m}^3\text{]}$$

dove  $D$  indica il diametro (alesaggio) del cilindro. Il rapporto tra il volume massimo ( $V_1$ ) della camera e il volume minimo ( $V_2$ ) è detto rapporto volumetrico di compressione  $\rho$ :

$$\rho = V_1 / V_2 = 1 + V_c / V_2$$

Un ulteriore parametro, nello studio del funzionamento dei motori alternativi a combustione interna, è la velocità media del pistone  $u$ :

$$u = 2cn \text{ [m/s]}$$

dove  $n$  [giri/s] è il numero di giri dell'albero motore nell'unità di tempo.

Il parametro  $u$  ha un ruolo importante perché influenza i trafiletti del fluido nei processi di cambio di massa, le perdite meccaniche e gli scambi termici. I valori tipici della velocità media del pistone sono compresi tra 8 e 15 m/s. I motori automobilistici veloci sono al limite superiore mentre i grandi motori marini, lenti, si collocano al limite inferiore. Conoscendo l'andamento della pressione, all'interno del cilindro, durante un ciclo di funzionamento del motore è possibile determinare il lavoro scambiato tra il fluido e il pistone. La pressione interna al cilindro è, di solito, misurata utilizzando trasduttori piezoelettrici, cioè particolari dispositivi in cui un minuscolo cristallo di quarzo converte un segnale di pressione in una carica elettrica proporzionale alla pressione stessa, opportunamente trasformata in un segnale di tensione. In questo modo si possono ottenere accurate descrizioni dell'andamento della pressione in funzione dell'angolo di manovella o del volume interno.

Il ciclo così rilevato è detto ciclo di lavoro e l'area da esso racchiusa rappresenta il lavoro indicato  $L_i$ , ovvero il lavoro netto scambiato tra il pistone e il fluido in ciascun ciclo. Il lavoro indicato è legato alla potenza indicata  $P_i$  dalla seguente relazione:

$$P_i = (L_i \cdot n) / m \text{ [Watt]}$$

dove  $m$  rappresenta il numero di giri dell'albero necessari per compiere un ciclo; quindi  $m = 2$  per un motore 4T (quattro tempi) e  $m = 1$  per un motore 2T (due tempi). La potenza indicata differisce dalla potenza utile  $P_u$ , misurata all'albero motore e fornita all'utilizzatore, per la presenza sia di una quota di energia dissipata per attriti meccanici, sia per una quota di energia necessaria ad azionare gli organi ausiliari.

Indicando con  $P_w$  la somma di questi due termini, si ha:

$$P_u = P_i - P_w = 2\pi C \cdot n \text{ [Watt]}$$

essendo  $C$  la coppia erogata dal motore.

Si definisce, inoltre, il lavoro utile al ciclo,  $L_u$ , come:

$$L_u = L_i - L_w \text{ [N}\cdot\text{m]} = \text{[J]}$$

dove  $L_w$  rappresenta la somma del lavoro dissipato per attriti meccanico e del lavoro assorbito dagli organi ausiliari in ciascun ciclo, quindi:

$$P_u = (L_u \cdot n) / m \text{ [Watt]}$$

Un ulteriore parametro utile nell'analisi del funzionamento del motore si ottiene dividendo il lavoro al ciclo per la cilindrata. Tale parametro ha le dimensioni di una forza per unità di superficie ed è chiamato pressione media. In particolare si definisce pressione media indicata ( $p_{mi}$ ) il lavoro indicato al ciclo per unità di cilindrata:

$$p_{mi} = L_i / V_c \text{ [N/m}^2\text{]}$$

Si definisce anche pressione media effettiva ( $p_{me}$ ) il lavoro utile al ciclo per unità di cilindrata:

$$p_{me} = L_u / V_c \text{ [N/m}^2\text{]}$$

$$p_{me} = p_{mi} - p_v \text{ [N/m}^2\text{]}$$

dove  $p_v = L_w / V_c$  è detta pressione a vuoto.

Nello studio del funzionamento dei motori a combustione interna esistono diversi livelli di approssimazione del ciclo dipendenti dal livello di completezza con il quale sono inclusi, nel modello, i fenomeni fisici reali (per esempio le proprietà fisico-chimiche dei fluidi reali, lo scambio termico, le perdite fluidodinamiche, gli attriti meccanici, inquinanti, eccetera) oltre alla complessità e accuratezza con la quale i fenomeni considerati vengono modellizzati. Il modello termodinamico più semplice è quello ideale: i gas sono considerati, termicamente e caloricamente, perfetti; non sono inclusi i fenomeni dissipativi meccanici e fluidodinamici, tanto meno le reazioni

chimiche e le variazioni delle proprietà chimico-fisiche dei gas. Inoltre, non vengono considerate le perdite di energia per scambio termico considerando, perciò, isentropiche le fasi di compressione e di espansione. Il rendimento del ciclo ideale è detto rendimento ideale ed è definito come il rapporto fra il lavoro ottenuto  $L_{id}$  e il calore fornito  $Q_i$  al fluido nel ciclo:

$$\eta_{id} = L_{id}/Q_i$$

Un modello più vicino alla realtà è costituito dal cosiddetto ciclo limite.

Rispetto al ciclo ideale, cade l'ipotesi che il gas sia caloricamente perfetto mentre si continuano a trascurare i fenomeni dissipativi, sia meccanici sia fluidodinamici, e le perdite per scambio termico. Nel ciclo limite viene considerato il processo di combustione completo (si suppone, cioè, che tutte le molecole di combustibile si ossidino) e in equilibrio chimico locale (cioè le reazioni sono così veloci da raggiungere istantaneamente lo stato di equilibrio corrispondente allo stato termodinamico locale).

L'energia disponibile nella combustione di una massa  $m_b$  di una sostanza avente potere calorifico inferiore  $H_i$  [J/kg] è pari a:

$$Q_i = m_b \cdot H_i \text{ [J]}$$

Il rendimento di tale ciclo è detto rendimento limite ed è dato da:

$$\eta_l = L_l/Q_i$$

dove si indica con  $L_l$  il lavoro ottenuto nel ciclo limite.

Si definisce rendimento indicato il rapporto tra il lavoro indicato  $L_i$  e il lavoro limite  $L_l$ :

$$\eta_{\theta i} = L_i/L_l$$

Tale rendimento, per definizione, contempla vari effetti negativi come: perdite fluidodinamiche (per esempio legate ai trafiletti nelle valvole), perdite dovute allo scambio termico attraverso la superficie e il sistema di raffreddamento del motore e perdite per combustione incompleta, intempestiva o anomala. Si definisce il rendimento organico come il rapporto:

$$\eta_o = L_u/L_i = 1 - p_v/p_{mi} = 1 - p_v/(p_{me} + p_v)$$

Da qui scaturisce il rendimento utile definito come:

$$\eta_u = L_u/(m_b \cdot H_i) = L_i/(m_b \cdot H_i) \cdot (L_l/L_i) \cdot (L_u/L_l) = \eta_l \eta_{\theta i} \eta_o$$

I valori ottimali per il rendimento utile sono intorno a 0,3 per i motori automobilistici AC accensione comandata e 0,43 per quelli AS accensione spontanea. Per descrivere le prestazioni dei motori, spesso, vengono utilizzati, oltre ai rendimenti, il consumo specifico di combustibile  $q_b$  oppure il consumo specifico di calore  $q_c$ .

Il primo è definito come la quantità di combustibile spesa per produrre l'unità di lavoro utile:

$$q_b = m_b/L_u \text{ [g/kW h] o [g/CV h]}$$

Il secondo è definito come la quantità di calore necessaria per produrre l'unità di lavoro utile (ovvero il reciproco di  $\eta_u$ ):

$$q_c = m_b \cdot H_i / L_u \text{ [J/kW h] o [J/CV h]}$$

Da qui vale la seguente relazione:

$$q_b = 1/(\eta_u \cdot H_i) = q_c/H_i$$

Infine si definisce il ciclo convenzionale, che costituisce un modello più accurato rispetto al ciclo limite in quanto vengono considerati, sia pur in maniera semplificata, anche gli effetti di scambio termico durante le fasi di compressione e di espansione, quelli di trafilamento del fluido, durante le fasi di cambio di massa, e gli effetti di combustione imperfetta. Le trasformazioni di compressione e di espansione della miscela aria-combustibile sono considerate, con opportuni esponenti, politropiche in modo da rappresentare la quantità di calore mediamente scambiata in ciascuna fase.

## **MOTORE A QUATTRO TEMPI AD ACCENSIONE COMANDATA**

I motori alternativi a quattro tempi ad accensione comandata equipaggiano buona parte degli autoveicoli: il ciclo compiuto dal fluido operante all'interno del cilindro richiede quattro corse dello stantuffo, corrispondenti ciascuna a una fase del ciclo.

Le quattro fasi sono le seguenti:

- Fase di aspirazione: in questa prima fase lo stantuffo, spostandosi dall'alto verso il basso, richiama il fluido fresco nel cilindro. L'ingresso del fluido è reso

possibile dall'apertura della valvola di aspirazione che avviene poco prima che inizi la corsa discendente dello stantuffo.

- Fase di compressione: terminata la fase di aspirazione lo stantuffo inizia la sua corsa ascendente, contemporaneamente la valvola di aspirazione si chiude e la carica fresca aspirata viene compressa nella camera di combustione.
- Fase di combustione ed espansione: verso la fine della fase di compressione, con un certo angolo di manovella di anticipo rispetto al PMS punto morto superiore, inizia la combustione innescata mediante una scintilla elettrica. La combustione provoca il repentino aumento di pressione e temperatura del fluido contenuto nel cilindro che, in tal modo, compie lavoro utile durante la nuova corsa discendente dello stantuffo (fase di espansione).
- Fase di scarico: poco prima che termini la corsa di espansione si apre la valvola di scarico. I gas combusti cominciano a uscire dal cilindro e vengono scaricati durante la successiva corsa ascendente dello stantuffo.

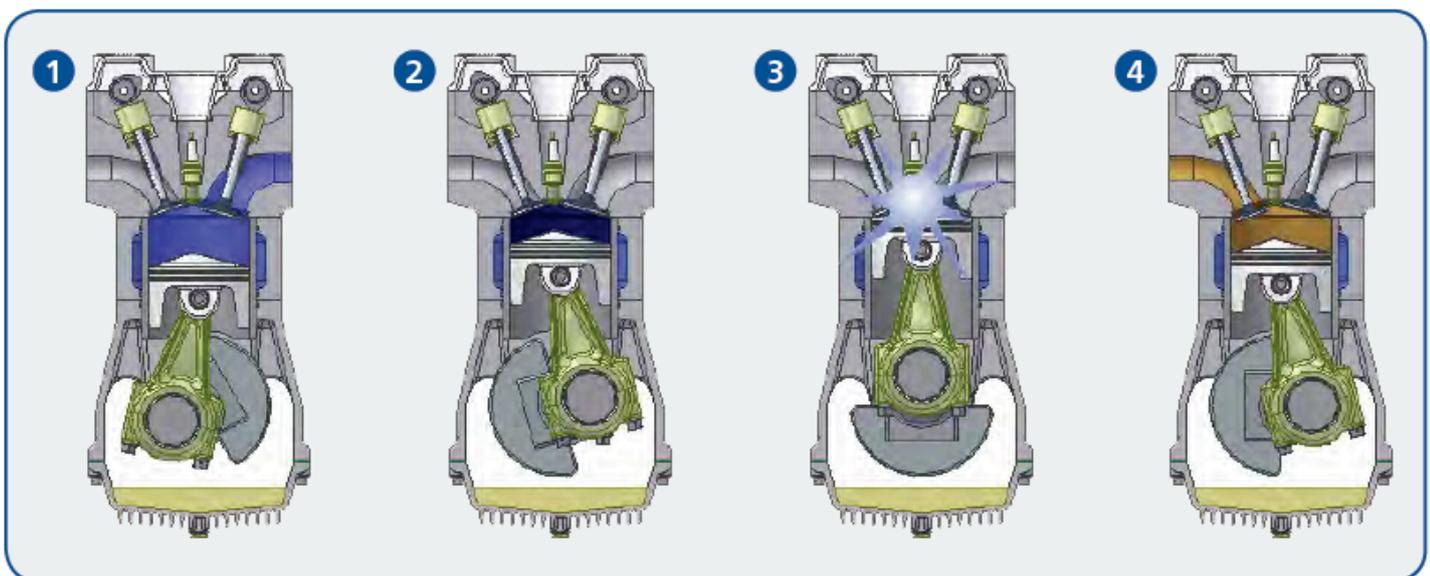
Terminata questa fase la valvola di scarico si chiude, nel frattempo si riapre quella di aspirazione e inizia così un nuovo ciclo.

Fase 1 - Aspirazione

Fase 2 - Compressione

Fase 3 - Combustione - Espansione

Fase 4 - Scarico



**Fig. 6** Funzionamento del motore ad accensione comandata

Nel funzionamento reale del motore, sia ad accensione comandata sia ad accensione spontanea, le fasi di aspirazione

e di scarico avvengono con un certo incrocio delle valvole per permettere sia una refrigerazione parziale della testa dei pistoni sia una migliore evacuazione dei gas combusti attraverso l'ingresso di aria fresca, quando le valvole di scarico sono ancora aperte. Nei moderni motori a fasatura variabile VVT Variable Valve Timing e VVA Variable Valve Actuation questo incrocio, presente almeno sull'aspirazione, viene fatto variare in maniera opportuna col numero di giri dell'albero motore per poter immettere gas esausti in aspirazione, creando vari gradi di EGR Exhaust Gas Recirculation al fine di minimizzare le perdite per lavoro di pompaggio e ottimizzare, in questo modo, i consumi specifici.

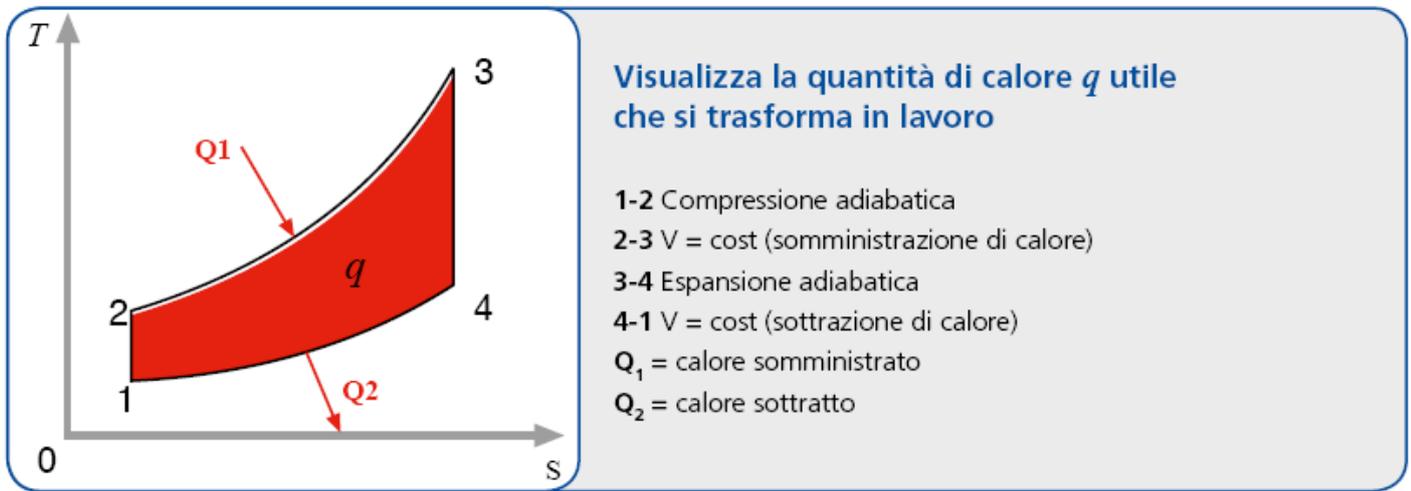


Fig.7 Ciclo Otto: diagramma T-S.

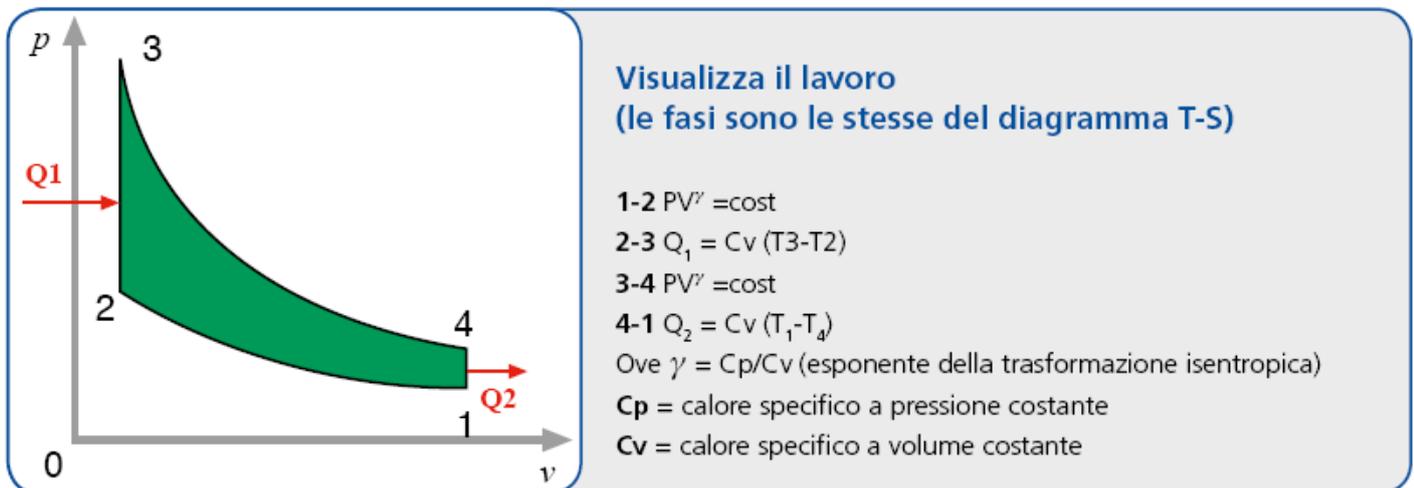
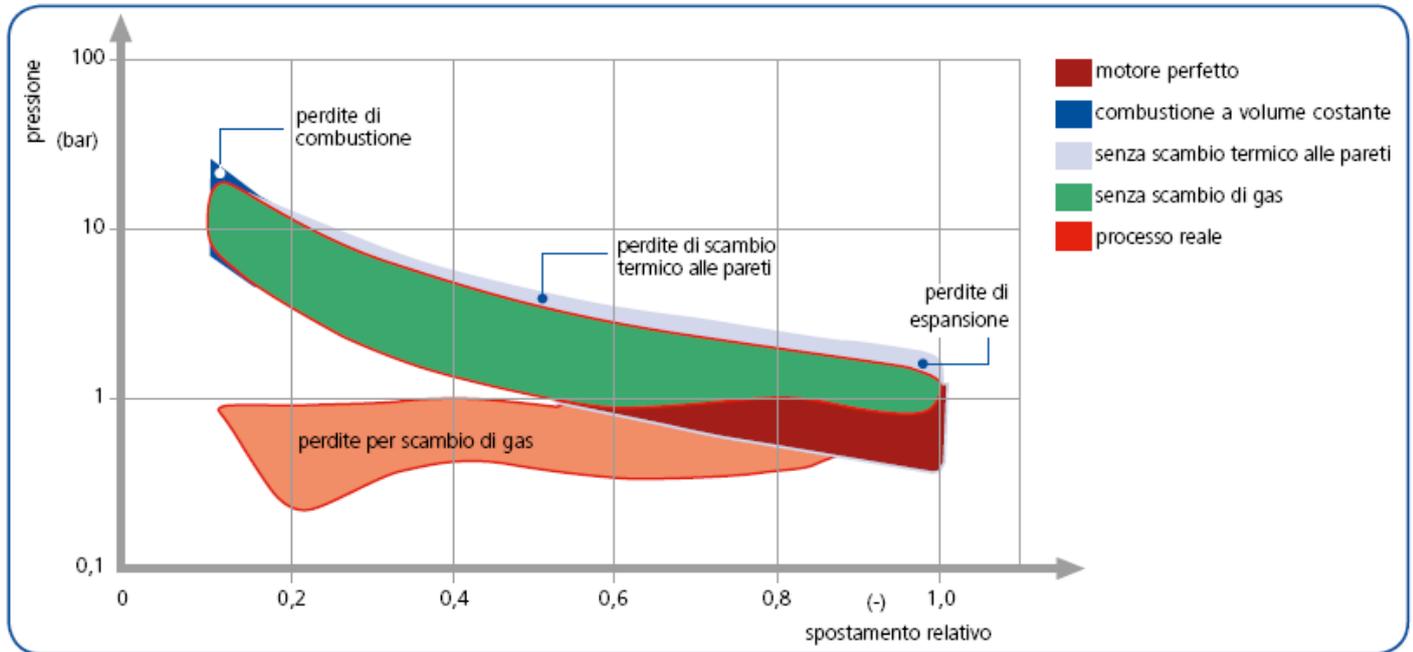


Fig.8 Ciclo Otto: diagramma P-V

Il ciclo Otto mostrato nei diagrammi di Figura 7 e Figura 8 è un ciclo, in realtà, ideale in cui le fasi di compressione e di espansione sono assunte isentropiche e il fluido operante è considerato caloricamente e termicamente perfetto, ossia un ciclo che non tiene conto delle perdite fluidodinamiche e di quelle per scambio termico con le pareti del cilindro.



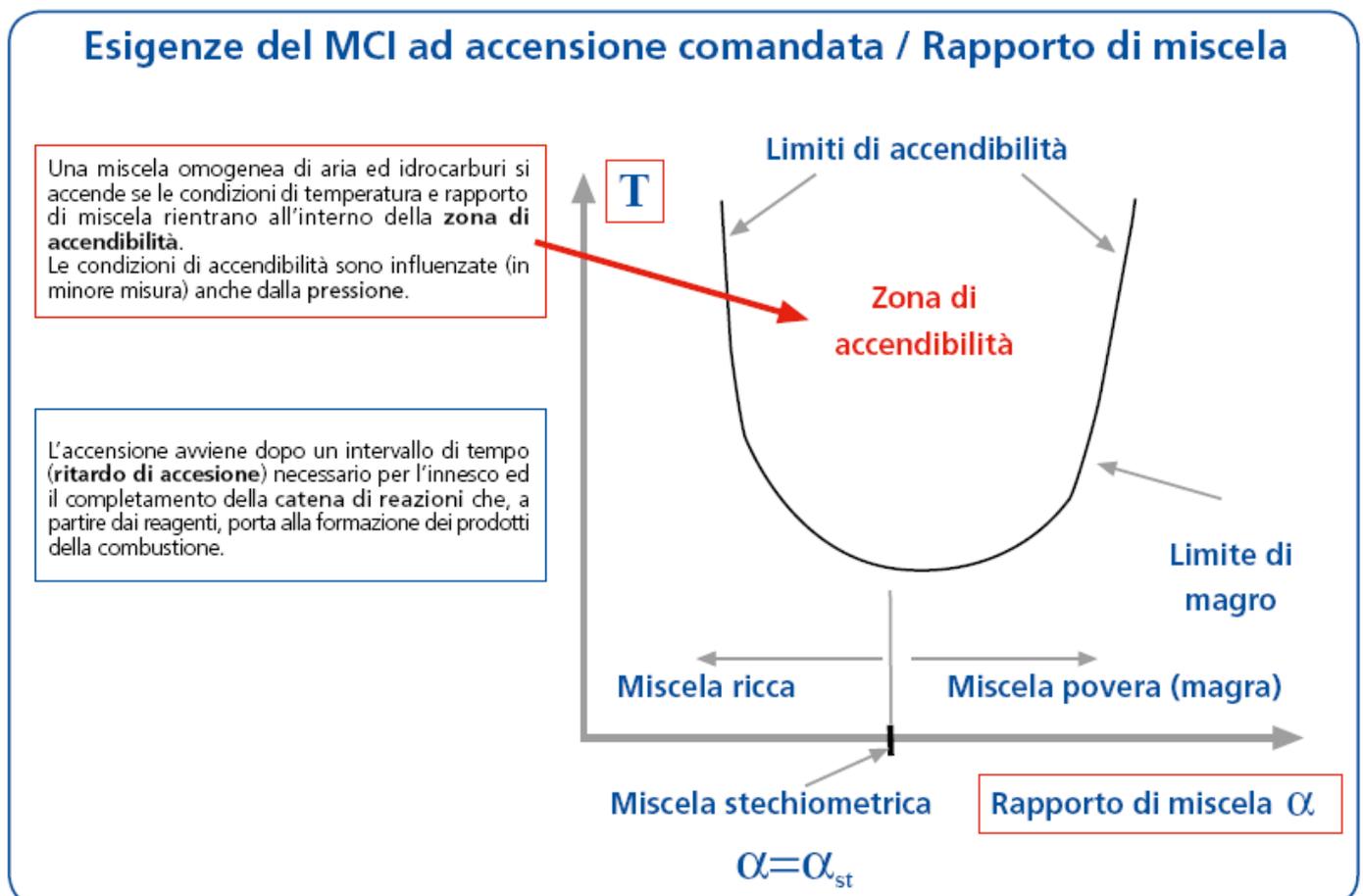
**Fig. 9** Ciclo indicato e perdite (motore ad accensione comandata)

Il ciclo indicato, o di lavoro, è quello effettivamente svolto dal fluido in seno al motore. Con riferimento alla Figura 9, l'area evidenziata in verde rappresenta il lavoro effettivamente compiuto dai gas sul pistone, cioè quello corrispondente al ciclo positivo percorso in senso orario. L'area evidenziata in rosso rappresenta il lavoro, detto passivo o di pompaggio, compiuto dal pistone sui gas combusti per effettuare le fasi di scarico e successiva aspirazione, la cui entità cresce con l'aumentare del grado di parzializzazione del corpo farfallato. Ciò pone il motore ad accensione comandata in posizione sfavorevole rispetto al ciclo diesel che può, invece, vantare un rendimento termodinamico, quindi un lavoro utile, più elevato anche in virtù dell'assenza della valvola a farfalla. I due cicli termodinamici, ben diversi fra loro se trattati dal punto di vista puramente concettuale, sono molto simili nei cicli indicati e tale similitudine tenderà in futuro ad accentuarsi maggiormente sia per il progressivo diminuire del rapporto volumetrico di compressione dei motori CI Compression Ignition, sia per l'introduzione di nuovi processi di combustione degli SI Spark Ignition sempre più vicini ai motori diesel.

## Tecnologia attuale

Prima dell'avvento dell'elettronica sulla gestione del motore a combustione interna il carburatore costituiva l'elemento fondamentale nel sistema di alimentazione.

Il carburatore era preposto a creare il giusto rapporto di miscela ( $\varphi / \varphi_{st} = \varphi \approx 1 \Rightarrow$  miscela stechiometrica) dipendente, in questo caso, solo dalle sezioni di passaggio e dalle densità di aria e carburante; perciò assolutamente indipendente dal salto di pressione e dalle condizioni operative del motore. Nelle condizioni ideali di funzionamento il carburatore si adatta, quindi, alle esigenze del motore ad accensione comandata il quale richiede un rapporto di miscela in prima approssimazione costante e, comunque, contenuto nell'intervallo di accensione.



**Fig 10** Esigenze del MCI ad accensione comandata/Rapporto di miscela

Il carburatore, durante la sua evoluzione, è giunto a livelli di notevole complessità per poter tenere conto delle deviazioni dal funzionamento ideale e delle Rendimento dalla fonte alla ruota

diverse esigenze del motore nelle varie fasi di funzionamento (minimo, pieno carico, ripresa, rilascio, eccetera). L'evoluzione e la diffusione della microelettronica, insieme alle esigenze di una drastica riduzione delle emissioni inquinanti, sono stati i fattori decisivi che hanno decretato il passaggio a sistemi di controllo elettronico sempre più performanti e sofisticati.

In particolare, con l'inseverimento dei limiti di emissioni si è reso necessario il ricorso al catalizzatore trivalente TWC Three Way Catalyst, che consente contemporaneamente di ossidare CO monossido di carbonio e HC idrocarburi incombusti e ridurre gli NOx (miscela di NO e NO<sub>2</sub>, rispettivamente monossido e diossido di azoto). Oltre alla necessità di raggiungere un'adeguata temperatura di regime ( $\approx 650^{\circ}\text{C}$ ), il TWC ha la peculiarità di raggiungere la massima efficienza di conversione, sia per l'ossidazione sia per la riduzione, in un ristretto intervallo attorno alle condizioni stechiometriche.

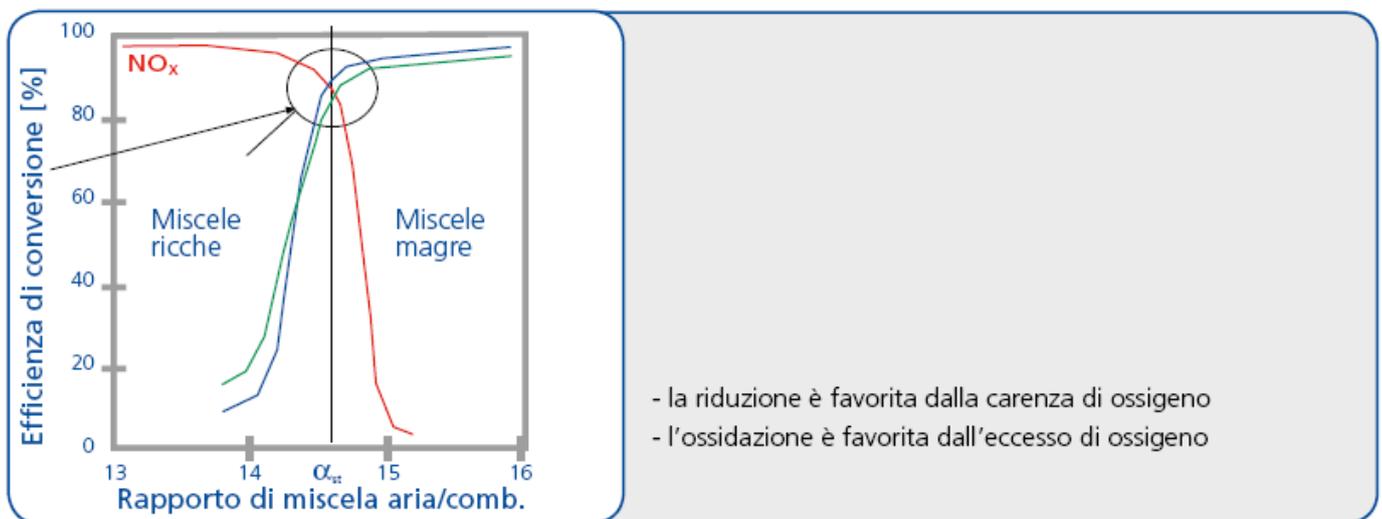


Fig. 11 Efficienza di conversione del catalizzatore trivalente

Questa caratteristica del catalizzatore trivalente ha, fin da subito, messo in evidenza i limiti del carburatore che non è

in grado di assicurare, con la dovuta precisione, le condizioni stechiometriche necessarie per una buona efficienza di

conversione. Si è reso necessario, perciò, adottare una regolazione elettronica dell'iniezione (con controllo in loop chiuso con sonda lambda, sensore di ossido di zirconio che rileva la presenza di ossigeno allo scarico in modo da mantenere una miscela aria/carburante stechiometrica all'aspirazione) e dell'accensione.

## **Motore Lean Burn**

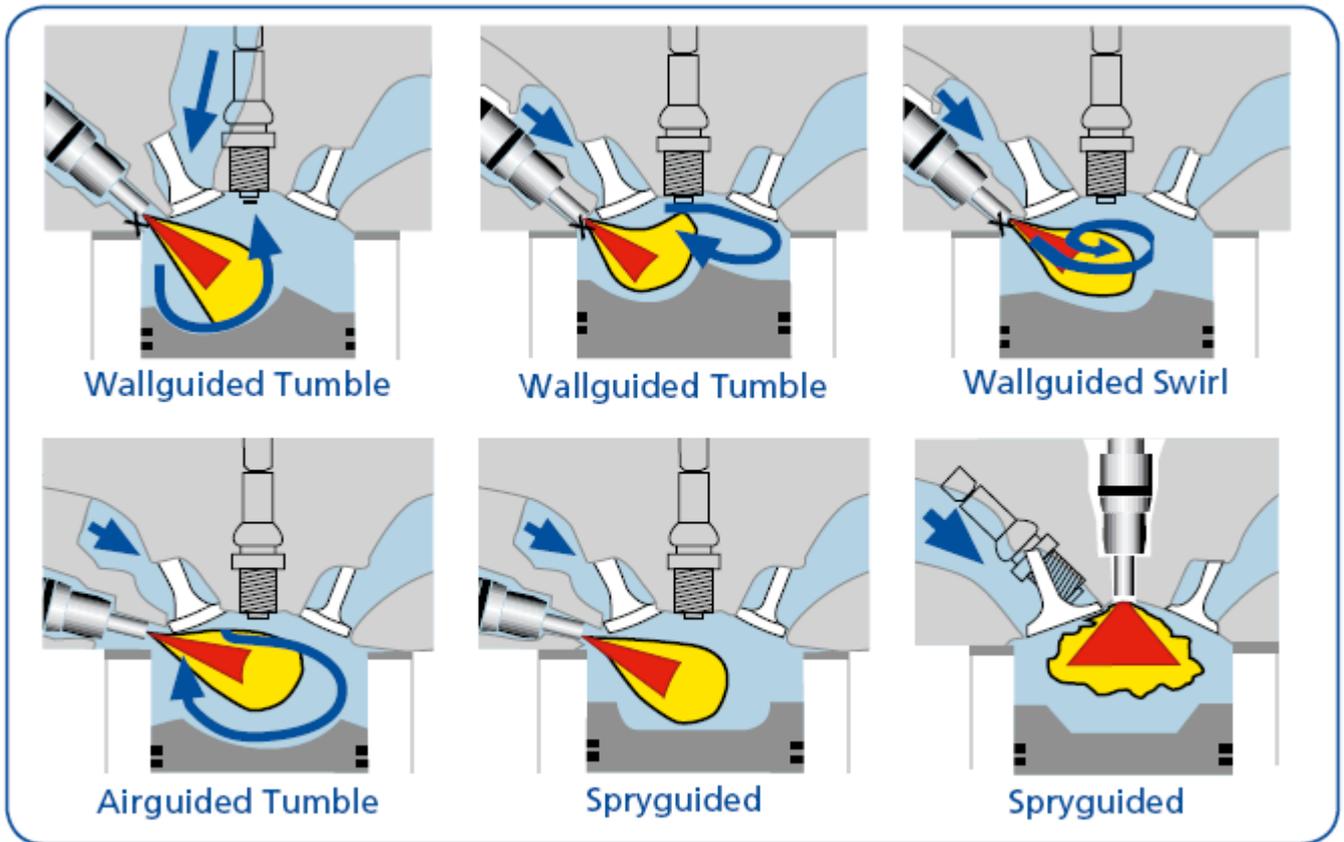
Un ulteriore passo in avanti, rispetto ai tradizionali motori stechiometrici, fu segnato dall'introduzione dei motori cosiddetti lean burn (combustione magra) o a carica stratificata ricorrendo a particolari geometrie dei condotti di aspirazione. L'intenzione dei progettisti giapponesi che lo idearono era di ridurre la dispersione uniforme della benzina nella camera di combustione, studiando soluzioni atte a tenere il più possibile ravvicinati i corpuscoli di combustibile, con l'obiettivo di realizzare, in prossimità della candela, proporzioni di aria e benzina vicine al rapporto stechiometrico: un po' come creare tante piccole "isole" di miscela a rapporto stechiometrico.

Al di fuori di queste zone i vapori di benzina sono più rarefatti rispetto all'aria e la loro accensione può avvenire solo a seguito dell'avvio della combustione nelle varie isole stechiometriche presenti attorno alla candela. Da qui nasce la comune distinzione tra motori stratificati (con combustione stratificata) e motori stechiometrici (con combustione stechiometrica). Il rendimento dei motori lean burn è positivo solo se il motore viene impiegato alle basse e medie utilizzazioni; infatti, non appena l'acceleratore viene premuto oltre certi valori, le proporzioni della miscela aria/benzina devono necessariamente essere riportate a valori stechiometrici per garantire l'integrità del motore a causa delle pericolose temperature che, in presenza di miscela magra, si raggiungono nella camera di combustione. Si progettaron, pertanto, condotti di aspirazione in cui all'aria in ingresso al motore fosse impressa una turbolenza da ridurre la portata il che, appunto, si traduce in una perdita di prestazioni nel funzionamento del motore ai regimi alti e medio-alti. Il sistema di alimentazione tradizionale, cioè con l'iniettore disposto nel collettore di aspirazione, dei motori lean burn, favorisce fenomeni come la formazione di un film liquido di benzina di cui si deve tenere conto modificando il rapporto di miscela aria/benzina per non aumentare le emissioni inquinanti e consumi.

## **Motore GDI**

Proprio per risolvere questi ultimi problemi, si decise di ricorrere all'iniezione diretta sistema GDI Gasoline Direct Injection, spostando la "gettata" del combustibile

dal collettore di aspirazione alla camera di combustione: la soluzione tecnologicamente più avanzata attualmente in commercio.



**Fig. 12** Alcuni sistemi GDI per motori ad accensione comandata

I vantaggi derivanti dall'impiego dello schema di iniezione diretta sono notevoli: la benzina viene spruzzata direttamente nella camera di combustione e ciò raffredda l'aria più di quanto non avvenga nei propulsori tradizionali, in cui gli abbassamenti di temperatura interessano soprattutto i collettori di aspirazione. La carica entrante si raffredda aumentando la densità dell'aria che, a sua volta, incrementa il grado di riempimento del motore a tutto vantaggio delle prestazioni. L'iniezione diretta, inoltre, dà la possibilità di aumentare il rapporto di compressione del motore in quanto la ridotta temperatura della camera di combustione allontana il rischio di detonazione, il cosiddetto "battito in testa". Tutto ciò si traduce in un incremento della pressione media effettiva del motore pari a circa il 10%, con conseguente riduzione dei consumi del 4-5% che tendono a diventare più significativi se, all'iniezione diretta in camera, si unisce l'adozione della combustione magra lean burn menzionata in precedenza.

In definitiva, l'iniezione diretta è in grado di garantire maggiore potenza, minori consumi e una maggiore prontezza di risposta del motore. I motori iniezione diretta lean burn, tuttavia, devono ricorrere a speciali catalizzatori e a un ampio utilizzo dell'EGR External Gas Recirculation per controllare le emissioni di NO<sub>x</sub>, dal momento che i catalizzatori trivalenti, normalmente usati sulle vetture a benzina con motore convenzionale, funzionano in maniera efficiente solo con miscele strettamente stechiometriche.

Inoltre è necessario che il motore sia costruito con particolari accorgimenti (plurivalvole, condotti e forma dei pistoni speciali, gestione elettronica, eccetera) per non avere problemi di funzionamento a freddo, di erogazione irregolare della potenza, nonché fenomeni di detonazione.

## **Semistratificato**

La categoria dei semistratificati è costituita dai propulsori che si pongono a metà strada tra stratificati e stechiometrici: una delle massime espressioni di questa nuova filosofia motoristica è stata proposta dai tecnici dell'Alfa Romeo con i motori JTS Jet Thrust Stoichiometric.

Il motore Alfa Romeo 2.0 JTS funziona prevalentemente con carica omogenea (nel senso di "non stratificata") e miscele stechiometriche, ragione per cui si può ricorrere all'uso della semplice marmitta catalitica che, invece, non può essere usata in motori a combustione magra. Per abbattere gli ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>) sino ai bassissimi valori richiesti dalla normativa europea antinquinamento Euro 4 in vigore dal 2006 si è reso necessario ricorrere al ricircolo dei gas di scarico, ottenuto mediante un semplice ed economico sistema basato sul rientro (realizzando un incrocio della distribuzione di una certa entità) nella camera di combustione di una percentuale di gas combusti. Si è così attuata la cosiddetta IGR Internal Gas Recirculation, in cui il gas viene riciclato in aspirazione prelevandolo dal collettore di scarico; cosa ben diversa dalla più famosa e diffusa EGR External Gas Recirculation. Per eliminare gravi disturbi sulla regolarità del motore ai bassi regimi che ne conseguivano si è ricorsi alla tecnica della stratificazione, raccogliendo così le molecole di combustibile sparse nella camera e concentrandole nelle vicinanze della candela. Nel caso del 2.0 JTS, la stratificazione è stata ottenuta ritardando

l'iniezione del combustibile il quale viene spruzzato dentro una piccola conca che è ricavata sulla testa dello stantuffo e che ha la funzione di deviare la benzina verso la candela; stratificazione questa che avviene solo ai bassissimi regimi (cioè, solo al di sotto dei 1500 giri/minuto). Va sottolineato che il 2.0 JTS non utilizza dispendiosi quanto delicati sistemi di post-trattamento degli ossidi di azoto e che il ricircolo dei gas di scarico avviene a costo nullo poiché si realizza con un adeguato incrocio degli alberi a camme, ottenuto con lo stesso variatore di fase (lato aspirazione) già presente nel precedente motore 2.0 Twin Spark.

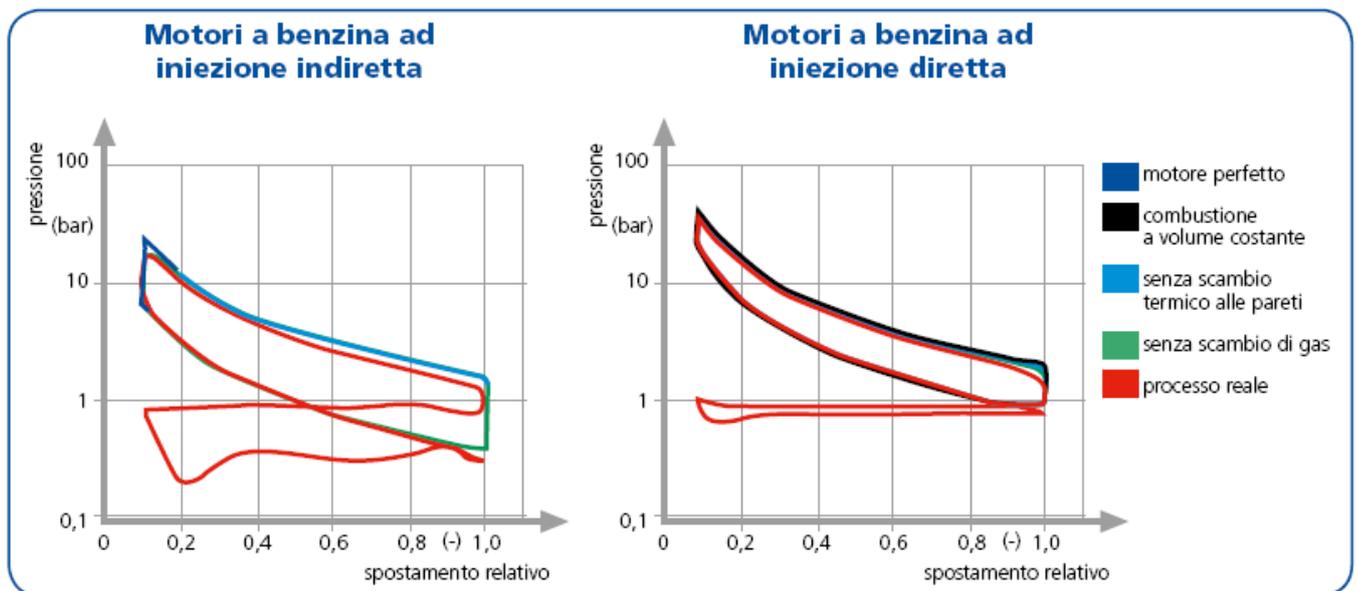


Fig. 13 Confronto tra cicli indicati PFI e GDI

Un'importante famiglia di motori GDI parzialmente lean burn è commercializzata da Mitsubishi, Toyota e Volkswagen. In questi motori l'abbattimento delle emissioni e in particolare degli NOx viene ottenuto mediante il ricorso a speciali sistemi di post-trattamento. Come già illustrato in precedenza, il controllo degli ossidi di azoto (NOx) è difficoltoso sia perché questi sono presenti in quantità superiori ai livelli fatti registrare da una combustione pressoché stechiometrica per le elevate temperature raggiunte nella camera di scoppio, sia perché i gas esausti contengono ossigeno libero che non consente la riduzione degli NOx tramite la contemporanea ossidazione degli idrocarburi incombusti. In uno dei primi modelli della Mitsubishi equipaggiati con motore GDI il catalizzatore trivalente era affiancato da uno speciale catalizzatore all'iridio che aveva il compito di abbattere le emissioni di NOx durante le fasi di funzionamento lean burn; quando il motore funzionava in condizioni stechiometriche (medi-alti regimi), l'abbattimento delle

emissioni inquinanti era invece affidato al catalizzatore a tre vie che poteva operare con alte efficienze di conversione. Tuttavia, nella maggioranza dei casi e nei modelli più recenti si ricorre all'impiego delle trappole per gli NOx NOx traps o NOx-Storage Systems. Queste trappole contengono ossidi di bario e potassio capaci di immagazzinare gli ossidi di azoto sottoforma di nitrati durante le fasi di funzionamento lean burn. Data la limitata capacità di queste trappole è necessaria una periodica rigenerazione che avviene mediante brevi escursioni nella regione di combustione ricca. In condizioni ricche gli ossidi di azoto vengono rilasciati dalla trappola e poi ridotti all'interno del catalizzatore a tre vie che è sempre presente in queste tipologie di motori.

## **MOTORE A QUATTRO TEMPI AD ACCENSIONE SPONTANEA**

Il quattro tempi ad accensione spontanea costituisce una tipologia di motori a combustione interna largamente diffusa: l'accensione della miscela aria/carburante (che in questo caso è solitamente gasolio) avviene per compressione e non viene provocata da una scintilla o altro agente esterno. In virtù dell'elevato rapporto volumetrico di compressione ( $\approx 18:1$ ) contro i circa  $10:1$  dei normali motori a benzina, l'aria, all'interno del cilindro, viene compressa a elevati valori con il conseguente innalzamento della sua temperatura tale da creare, in camera di combustione, le condizioni sufficienti a far accendere spontaneamente il carburante successivamente iniettato.

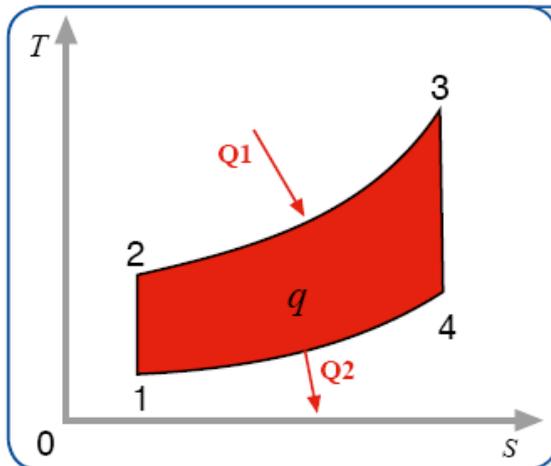
### Ciclo diesel

Per il motore ad accensione spontanea valgono le considerazioni fatte per il motore ad accensione comandata

relativamente al ciclo indicato, alle grandezze fisiche e termodinamiche, alla presenza eventuale di variatore di fase

e di un sistema EGR.

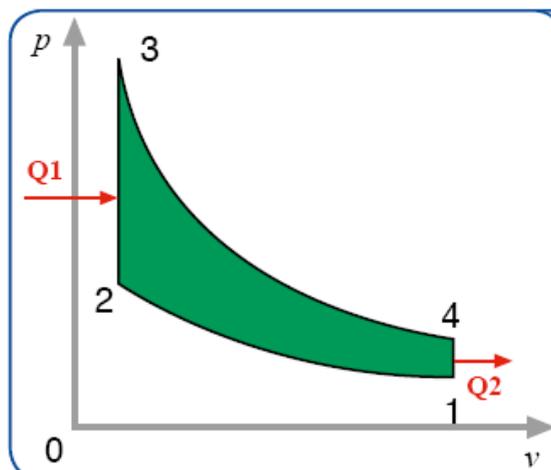
A differenza del motore Otto, la combustione avviene gradualmente, a pressione costante (isobara).



Visualizza la quantità di calore  $q$  utile che si trasforma in lavoro

- 1-2 Compressione adiabatica
- 2-3  $P = \text{cost}$  (somministrazione di calore)
- 3-4 Espansione adiabatica
- 4-1  $V = \text{cost}$  (sottrazione di calore)
- $Q_1$  = calore somministrato
- $Q_2$  = calore sottratto

Fig.14 Ciclo Diesel: diagramma T-S



Visualizza il lavoro (le fasi sono le stesse del diagramma T-S)

- 1-2  $PV^\gamma = \text{cost}$
- 2-3  $P = \text{cost}$
- 3-4  $PV^\gamma = \text{cost}$
- 4-1  $V = \text{cost}$
- Ove  $\gamma = C_p/C_v$  (esponente della trasformazione isentropica)
- $C_p$  = calore specifico a pressione costante
- $C_v$  = calore specifico a volume costante

Fig.15 Ciclo Diesel: diagramma P-V

I diesel sono caratterizzati da rendimenti notevolmente più elevati di quelli dei motori a ciclo Otto grazie alla possibilità di impiegare rapporti di compressione più alti, essendo esenti dal pericolo della detonazione che inevitabilmente si verifica nei motori ad accensione per scintilla. I motori ad accensione spontanea sono stati recentemente protagonisti di un notevole sviluppo tecnologico con un'ampia gamma di interventi che ne hanno migliorato il funzionamento sotto molti punti di vista. Questa spinta all'innovazione tecnologica del motore diesel deriva soprattutto dal progressivo inasprimento dei limiti delle emissioni inquinanti, introdotti a partire dalla fine degli anni '80. Nell'ultimo decennio abbiamo quindi assistito all'adozione generalizzata di condotti di alimentazione aria a chiocciola (per migliorare il grado di turbolenza in camera e, quindi, il rendimento volumetrico), della sovralimentazione con turbocompressore a gas di scarico a geometria variabile, dell'interrefrigerazione intercooling dell'aria di aspirazione, per arrivare ai sistemi di iniezione a elevatissima pressione come quella realizzata dall'iniettore pompa. Quest'ultimo non è altro che

un sistema modulare controllato elettronicamente in grado di raggiungere pressioni dell'ordine di 2.000 bar, montato direttamente sulla testa di ciascun cilindro e comandato da un'opportuna camma mentre elettrovalvole rapide permettono il controllo flessibile dell'iniezione e della quantità di combustibile iniettato.

## **Tecnologia attuale**

Ciò che ha segnato la svolta del motore diesel, restituendogli dignità dal punto di vista delle emissioni inquinanti e rendendolo più competitivo dei motori ad accensione comandata in termini di prestazioni e consumi, è stato soprattutto l'avvento dei sistemi di iniezione ad altissima pressione e il controllo elettronico dell'iniezione stessa.

## **Sistema Common Rail**

Un grande passo in avanti è stato rappresentato dall'introduzione del sistema Common Rail, ideato in Italia ed entrato in produzione per la prima volta nel 1997 equipaggiando le Alfa 156 1.9 con la sigla JTD. All'interno di questo innovativo sistema di iniezione la generazione della pressione di iniezione e l'iniezione sono disaccoppiate. La pressione di iniezione, generata nell'accumulatore ad alta pressione (rail e linee ad alta pressione che portano ai polverizzatori) da una pompa che opera sotto basse coppie, è indipendente dalla velocità di rotazione del motore; a monte del polverizzatore la pressione di iniezione è costante e pari o superiore a 1.600 bar. Sia l'inizio sia la durata dell'iniezione e, di conseguenza, la quantità iniettata possono essere variate in modo flessibile mediante l'elettroiniettore con servovalvola di controllo. Oltre alla scelta della pressione del sistema, è possibile modellare la legge di iniezione mediante il controllo del movimento della spina dell'iniettore; quando necessario, comandi ripetuti dell'elettrovalvola consentono di effettuare sia l'iniezione pilota sia iniezioni multiple (Common Rail di seconda generazione). Superati gli iniziali problemi dovuti alle difficoltà di controllo dell'alzata dello spillo iniettore e alle ristrettissime tolleranze di lavoro richieste, oggi un tale sistema di iniezione permette una migliore nebulizzazione del combustibile che può così venire intimamente miscelato con l'aria inviata nel cilindro, portando a sensibili

miglioramenti in termini di rendimento ed emissioni inquinanti, oltre a una drastica riduzione del rumore tipico del diesel dovuto al caratteristico ritardo all'accensione della miscela.

Ricapitolando i rendimenti dei motori a combustione interna sono del 30% per quelli ad accensione comandata e del 43% di quelli ad accensione spontanea.

## La macchina elettrica

Per sapere il rendimento di un'auto elettrica dalla fonte alla ruota bisogna prima di tutto partire da quelli delle centrali che sono distinti per modo di produzione del KWh. Oltre a questo si può dedurre facilmente che per trovare il rendimento medio di generazione bisogna tener conto del mix produttivo del singolo paese. Iniziamo a vedere i vari rendimenti delle varie centrali:

- \* La centrale nucleare ha un rendimento del 34% quando si parla di BWR (reattori a bassa pressione 70bar), del 33% se esaminiamo i PWR (reattori ad alta pressione 100bar) che compongono l'85% dei reattori in funzione nel mondo.
- \* Le centrali "eoliche" sfruttano l'energia della radiazione solare incidente e della radiazione termica emessa dalla superficie terrestre che comportano i moti convettivi. Quindi, gli aerogeneratori convertono l'energia del vento in energia elettrica. Questi possono ricavare al massimo il 60% della totale energia, secondo la teoria di Benz.
- \* L'energia ricavata da biomasse è da ritenersi rinnovabile e per quanto riguarda il rendimento è ridotto a causa del fatto che il rendimento di crescita dei vegetali è ridotto intrinsecamente e sebbene sia stato migliorato con l'utilizzo di piante modificate geneticamente in laboratori. Tanto per farsi un'idea l'ordine di grandezza del rendimento medio è intorno al 6 per mille.
- \* L'energia fotovoltaica sfrutta la radiazione solare attraverso dei pannelli fotovoltaici, costituiti da varie celle. Le quali sfruttano la giunzione pn, che ricavano una differenza di potenziale ai sui capi e attraverso una griglia e giunzioni vengono messe in serie per andare a produrre energia elettrica secondo una tensione convenzionale. Tale processo si svolge attraverso l'utilizzo di celle al silicio, con rendimento intrinseco del 30% ma ora si è arrivati soltanto al 16% per quanto riguarda quello in commercio.
- \* L'energia solare si può utilizzare per produrre elettricità. Questo processo si basa sulla conversione dell'energia del sole in un primo momento in energia termica e successivamente con un ciclo termodinamico va a tradursi in energia elettrica. Tale tipologia di produzione di energia elettrica è in grande sviluppo ed esistono ancora sistemi diversificati tra di loro. Un prototipo in esercizio è rappresentato dal sistema a torre, il quale possiede un rendimento del 12-

15%. In via del tutto sperimentale è in esame un altro progetto, "Progetto Archimede" per il quale si prevede un rendimento del 45%.

- \* Le centrali idroelettriche sfruttano l'energia potenziale dell'acqua del 80-90%. Esse convertono l'energia potenziale in un primo momento in energia cinetica e successivamente attraverso le turbine in energia elettrica.
- \* Le centrali geotermiche si dividono in impianti convenzionali ed impianti a ciclo binario. Esse possono avere una taglia tipica di 2,5-5 MWe (per impianto a compressione) o di 60-100 MWe (per impianto a compressione) o di 60-100 MWe (per impianti a compensazione). In entrambi i casi il rendimento può variare da un massimo di 17% ad un minimo di 10%.
- \* Gli impianti a carbone sfruttano l'energia chimica presente in esso e attraverso la combustione e un ciclo termodinamico vanno a produrre vapore il quale movimentata le turbine che traducono il movimento circolare in energia elettrica grazie al generatore posto sull'albero. Attualmente hanno un rendimento pari al 43% che si ritiene possa migliorare fino al 52%.
- \* Nelle centrali a ciclo combinato a gas che sfruttano sempre un ciclo termodinamico per produrre energia elettrica. Possiedono un rendimento del 55%.
- \* Nelle centrali ad olio si sfruttano i motori a combustione interna che hanno rendimenti di circa 43% in media.

Ora per ricavare il rendimento medio di generazione di un KWh si dovrà andare a vedere con che percentuale ogni tipologia di impianto ha prodotto energia elettrica. Dopo di che si farà un proporzione per trovare il rendimento medio con cui si è generato un KWh durante l'anno perso in esame. Si è preso come anno di riferimento l'anno 2007 dove si ha prodotto con le seguenti percentuali:

- 20,9% con gli impianti a ciclo combinato;
- 41,5% con gli impianti a carbone;
- 15,6 con le centrali idroelettriche;
- 14,38 con le centrali nucleari;
- 5,6 con le centrali ad olio combustibile;
- 2,6 con tutte le altre centrali (eolico, fotovoltaico, geotermico, biomasse...).

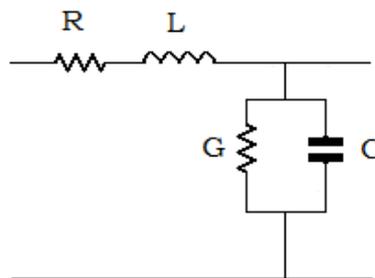
(dati del 2007 tratti dal sito <http://www.iea.org/>)

Dopo aver visto le quote di energia prodotte dalle varie centrali si può proseguire facendo una proporzione che tiene conto della quota e del rendimento dei vari processi produttivi e ne risulta che il rendimento di generazione è il seguente:

$$\eta = 52\%$$

Si è considerato rendimento unitario per le fonti rinnovabili perché esse sfruttano direttamente l'energia solare a differenza di tutte le altre forme di energia che sfruttano la composizione chimica. La quale è frutto della stessa energia solare. Ad esempio il petrolio si ritiene che si sia formato per decomposizione della flora, che è stata per milioni di anni sommersa dalla terra in assenza di ossigeno. Per quanto a nostra conoscenza la flora sfrutta l'energia solare per crescere, e di conseguenza si dovrebbe andare a considerare il rendimento che essa possiede e il rendimento della decomposizione. Di conseguenza il rendimento totale di questi processi è da considerarsi minore di uno e quindi il rendimento ricavato da una centrale che prevede la combustione di un carburante fossile si dovrebbe moltiplicare il rendimento di quest'ultima per quello che abbiamo appena calcolato.

Dopo aver analizzato le varie forme di generazione dell'energia elettrica considereremo le perdite che si hanno in una centrale elettrica. Come è facile intuire nelle linee elettriche si avrà una perdita a causa della resistenza del materiale con cui sono costituite, un'altra sarà data dall'induttanza della linea e da quella dei cavi vicini (nel caso di una trifase o di più linee vicine) e un'ultima perdita sarà rappresentata dalla capacità di esercizio che è costituita dal cavo carico e il terreno per definizione a potenziale nullo. Dopo questa breve premessa si può dire che le linee elettriche aeree si possono rappresentare con un polo bipolo di questo genere:



Il calcolo del rendimento di un sistema di distribuzione elettrico è molto complesso essendo molto esteso e molto ramificato, di conseguenza per il sistema italiano si può trovare il rendimento una linea elettrica aerea è di circa 94,53% (5,47% di perdite dato TERNA del 31/12/2009).

Ora ci resta da analizzare il rapporto di conversione delle batterie disponibili in commercio il quale si aggira intorno al 95%, ed infine a quello del motore elettrico.

Nel nostro caso si può studiare la conversione di energia elettrica in energia meccanica e si può scrivere relativamente ad un intervallo di tempo:

$$W_e = W_{em} + \Delta W_{ec} + W_{ep} + W_{fp}$$

Con

$W_e$  : energia elettrica fornita in ingresso al convertitore da una sorgente esterna.

$W_{em}$  : energia elettrica convertita in energia meccanica

$\Delta W_{ec}$  : variazione dell'energia  $W_{ec}$  immagazzinata nei campi magnetici

$W_{ep}$  : energia dissipata nei materiali magnetici

$W_{fp}$  : energia dissipata nei circuiti ohmici

Non tutta l'energia  $W_{em}$  convertita in meccanica è utilizzabile, in quanto una parte rimane immagazzinata nel sistema sotto forma di energia cinetica e una parte viene dissipata.

Si ha perciò:

$$W_{em} = W_m + \Delta W_{ms} + W_{mp}$$

Con:

$W_m$  : energia meccanica fornita in uscita dal convertitore a un utilizzatore esterno

$\Delta W_{ms}$  : variazione dell'energia  $W_{ms}$  immagazzinata sotto forma di energia cinetica

$W_{mp}$  : energia dissipata per attrito e ventilazione

Andando a sostituire quest'ultima espressione di  $W_{em}$  nella precedente andremo a ricavare il bilancio energetico complessivo per conversione di energia da elettrica in meccanica:

$$W_e = W_m + \Delta W_{ms} + W_{mp} + \Delta W_{ec} + W_{ep} + W_{fp} = \Delta W_{ec} + W_m + \Delta W_{ms} + W_p$$

Con  $W_p$  totale energia dissipata.

Dopo aver studiato il bilancio energetico complessivo si può affermare che il campo magnetico presente all'interno della macchina dipende sia da grandezze elettriche sia da grandezze meccaniche; ne consegue che l'energia  $W_{ec}$  immagazzinata nel campo può variare sia per effetto di una variazione delle correnti,

sia per effetto di una variazione della posizione angolare dovuta al movimento. L'energia  $W_{ec}$  gioca quindi un ruolo fondamentale nel processo di conversione elettromeccanica; essa è praticamente concentrata nella regione in aria che separa le due parti del convertitore (traferro) ed è per questo che il campo al traferro viene chiamato campo di accoppiamenti.

Le iterazioni tra il campo di accoppiamento ed i sistemi elettrico e meccanico esterni possono essere interpretate sostanzialmente attraverso un meccanismo di azione e reazione.

Con riferimento ad un motore elettrico, in un intervallo di tempo infinitesimo  $dt$  e trascurando la perdite  $W_{fp}$  si può scrivere:

$$dW_e = dW_{em} + dW_{ec} + dW_{ep}$$

ai morsetti elettrici vale la relazione:

$$v = Ri + e$$

Con:

$v$  : tensione esterna applicata ai morsetti

$i$ : corrente assorbita ai morsetti

$Ri$ : caduta di tensione dei circuiti elettrici

$e$ : forza elettromotrice indotta dalla variazione del campo magnetico

moltiplicando ambo i membri per  $idt$ , si ottiene in altra forma il bilancio energetico dato dalla:

$$eidt = Ri^2dt + eidt$$

quindi si ricava:

$$eidt = dW_{em} + dW_{ec}$$

Con riferimento alle grandezze meccaniche si può affermare:

$$C = b\Omega + Jd\Omega/dt + C_m$$

Con:

$C$  : coppia elettromagnetica prodotta dalla variazione del campo magnetico

$\Omega$  : velocità angolare dell'albero

$b\Omega$  : coppia d'attrito ( $b$ : coefficiente d'attrito)

$Jd\Omega/dt$  : coppia d'inerzia ( $J$ : momento d'inerzia)

Moltiplicando per  $\square dt$  ambo i membri l'equazione precedente e confrontando quanto ottenuto con il bilancio energetico da un punto di vista meccanico si ottiene:

$$C\Omega dt = dW_{em}$$

Dopo aver visto il bilancio energetico e le grandezze che entrano in gioco in un motore elettrico si può definire il funzionamento in regime permanente che si definisce così: è in condizioni di regime permanente quando è in condizioni di regime permanente sia elettrico (corrente periodica o permanente) che meccanico (grandezza caratteristica del moto costante). In regime permanente variano quindi periodicamente sia la configurazione geometrica (determinata dalla posizione relativa tra parte mobile e parte fissa) sia in generale quella elettrica (determinata dalla corrente). Di conseguenza varia periodicamente l'energia immagazzinata e la sua derivata rispetto al tempo ha ogni caso valore medio nullo in un periodo. Inoltre, essendo la velocità costante, è comunque nulla la variazione di energia cinetica. Si ha allora che in regime permanente i bilanci espressi dalle equazioni precedenti trovano corrispondenza, con riferimento alla potenza, rispettivamente nelle relazioni:

$$P_e = P_m + P_p$$

Con  $P_e$ ,  $P_m$  e  $P_p$  valori medi della potenza elettrica, di quella meccanica e della potenza perduta totale. In termini di bilancio delle coppie, è nulla la coppia d'inerzia  $C_m s$  e la formula che esprimeva  $C$  in funzione dei parametri meccanici in gioco esprimono l'equilibrio tra i valori medi della coppia estera, della coppia elettromagnetica e di quella d'attrito. Le considerazioni sulla potenza perduta di una macchina elettrica, sia essa funzionante come motore o come generatore, è importante perché determina il rendimento della macchina, definito dal rapporto:

$$\eta = \frac{\text{Potenza erogata}}{\text{Potenza assorbita}} = \frac{\text{Potenza erogata}}{\text{Potenza erogata} + \text{Potenza persa}} = \frac{\text{Potenza assorbita} - \text{Potenza persa}}{\text{Potenza assorbita}}$$

Tanto minore è la potenza perduta, tanto più la potenza erogata è prossima alla potenza assorbita ed il rendimento tende a uno.

La potenza persa si trova parte nei materiali che costituiscono la macchina elettrica:

Nei conduttori si ha la perdita dovuta all'effetto joule la quale varia col variare della temperatura con la seguente legge:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha_0 T)$$

dove con  $\rho$  si indica la resistività del materiale,  $\rho_0$  la resistività del materiale alla temperatura di 20 °C,  $\alpha_0$  il coefficiente di variazione della resistività con la temperatura e T la differenza tra la temperatura di a cui si trova il materiale e la temperatura con cui si è decretato  $\rho_0$ .

Nei materiali ferromagnetici si ha una perdita dovuta alle correnti parassite e una relativa al ciclo d'isteresi e si possono calcolare in questo modo:

$$P_{fp} = \alpha f B_m^{1.6} + \beta f^2 B_m^2 \epsilon$$

Con  $\alpha$  e  $\beta$  coefficienti dipendenti solo dai materiali e :

f,  $B_m$  frequenza e induzione massima del campo magnetico supposto sinusoidale

$\epsilon$  spessore del lamierino in direzione ortogonale alle linee di flusso. Normalmente si definisce cifra di perdita di un determinato materiale ferromagnetico la potenza perduta per isteresi e correnti parassite in un Kg di materiale sottoposto ad un campo magnetico sinusoidale con  $B_m = 1T$  e frequenza industriale (f=50 o 60Hz). Come ordine di grandezza, la cifra di perdita nei lamierini ferromagnetici usati nelle macchine rotanti è compresa tra 1 e 3,5 W/Kg per spessori di lamierini di 0,3 ÷ 0,5 mm.

Oltre a queste perdite sono presenti le perdite addizionali le quali comprendono le perdite nei conduttori degli avvolgimenti e nei magneti permanenti per correnti passite, le perdite per isteresi e correnti parassite nelle altre parti metalliche della macchina. Si può calcolare la perdita di potenza per le correnti parassite nei conduttori degli avvolgimenti e nei magneti permanenti con questa formula:

$$P_{ep} = \frac{(2\pi f)^2 B_m^2 d^2}{64\rho}$$

Dove f è la frequenza,  $B_m$  è l'induzione massima del campo magnetico,  $\rho$  la resistività e d il diametro del conduttore. Le perdite per isteresi e per le correnti parassite nelle altre parti metalliche si verificano nelle parti strutturali della macchina che non fanno parte del circuito magnetico. Le perdite addizionali sono definite è per le varie macchine in sede normativa. Esse sono di difficile

determinazione e generalmente non vengono considerate negli sviluppi teorici che portano alla definizione dei modelli matematici delle macchine.

Di conseguenza possiamo riscrivere il rendimento in questo modo:

$$\eta = \frac{P_m}{P_m + P_{fp} + P_{mp} + P_{ep} + P_{ad}}$$

Le varie voci di perdita per semplicità possono essere raggruppate nelle seguenti voci: perdite di eccitazione, perdite sottocarico, perdite nel ferro totali, perdite costanti (rappresentano le perdite misurate a vuoto sia meccaniche che elettriche), perdite addizionali sottocarico.

Tra i vari motori elettrici è stato scelto il motore asincrono per la sua duttilità e facilità nel comportarsi come motore durante la trazione e come generatore in frenata. La macchina asincrona si ottiene disponendo su uno statore privo di salienze un avvolgimento induttore distribuito di tipo aperto polifase e su un rotore, pure isotropo, un avvolgimento di indotto distribuito. L'avvolgimento di indotto può essere di tipo aperto con lo stesso numero di fasi e di poli dell'avvolgimento di statore oppure può consistere in uno o due avvolgimenti a gabbia. Il pacco di lamierini del circuito magnetico di statore è di forma di corona circolare con cave sempre di tipo semiaperto disposte lungo la periferia interna mentre il pacco di lamierini del circuito magnetico di rotore è a forma circolare con cave, ancora di tipo semiaperto, disposte lungo la periferia esterna. Al fine di ridurre la riluttanza del percorso del flusso induttore, l'ampiezza del traferro, di valore costante, è ridotta al minimo compatibilmente con le esigenze meccaniche inerenti alla rotazione del rotore all'interno dello statore. A differenza della macchina sincrona, nel funzionamento a regime permanente la velocità di rotazione della macchina asincrona, pur dipendendo dalla frequenza dalla tensione di alimentazione dello statore e dal numero dei poli, è funzione anche del carico. La macchina asincrona può funzionare sia da generatore sia da motore: comunemente si utilizza come motore, costituendo il motore asincrono il tipo più diffuso di motore elettrico. La teoria della macchina asincrona viene sviluppata con riferimento alla convenzione come motore. Prima di partire con il funzionamento del motore definiamo alcune grandezze:

$p$  : numero di coppie polari

$V_1$  : valore efficace della tensione sinusoidale concatenata di alimentazione

$\square, f$  : pulsazione e frequenza della tensione di alimentazione

$I_0$  : valore efficace della corrente in una fase di statore con circuiti di rotore

$\Phi_0$  : flusso utile per polo con circuiti di rotore aperti

$\Phi$  : flusso utile per polo con circuiti di rotore cortocircuitati.

$E_1, E_2$  : valori efficaci delle f.e.m. indotte in una fase

$I_1, I_2$  : valori efficaci delle fondamentali delle correnti di una fase a carico

$q_1, q_2$  : numero di cave per polo per fase

$n_1, n_2$  : numero di conduttori per cava

$N_1, N_2$  : numero di conduttori di una fase ( $N_1=2pq_1n_1$ ,  $N_2=2pq_2n_2$ )

$N_s, N_r$  : numero totale di conduttori di statore e di rotore ( $N_s=3N_1$ ,  $N_r=3N_2$ )

$K_1, K_2$  coefficienti di avvolgimento complessivi riferiti alle fondamentali

$K_f = 1,11$  : fattore di forma

$R_1, R_2$  : resistenze di fase

$X_1, X_2$  : reattanze di dispersione di una fase

L'avvolgimento trifase di statore, alimentato da un sistema simmetrico di tensioni concatenate di ampiezza e frequenza costanti, assorbe una terna equilibrata di correnti  $I_0$  che da luogo ad una f.m.m. (forza magnetomotrice) a gradini rotante lungo il traferro con velocità (velocità di sincronismo):

$$n_0 = 60 f / p$$

Rispetto a un riferimento solidale con lo statore, l'andamento temporale della fondamentale di tale f.m.m. è individuato da un vettore  $M_0$  di valore massimo:

$$M_0 = 1,35 n_1 q_1 K_1 I_0$$

Indicando con  $R_0$  la riluttanza del circuito magnetico relativo ad un polo, a  $M_0$  corrisponde il flusso:

$$\Phi_0 = M_0 / R_0$$

Che induce in ciascuna fase di statore e di rotore f.e.m. di frequenza  $f$  e di valore efficace:

$$E_1 = 2 K_f K_1 \Phi_0 f N_1$$

$$E_2 = 2 K_f K_2 \Phi_0 f N_2$$

Il rapporto tra i valori efficaci delle f.e.m. vale:

$$t = E_1 / E_2$$

Per ogni fase di statore si può scrivere l'equazione elettrica:

$$V_1 / \sqrt{3} = -E_1 + (R_1 + jX_1)I_0$$

Quest'ultima relazione e il rapporto tra i valori efficaci sono fondamentalmente analoghe a quelle di un trasformatore a vuoto con rapporto spire  $t$ .

Data la completa simmetria dell'alimentazione e della struttura elettromagnetica della macchina asincrona, è possibile fare riferimento ad una sola fase e tracciare di conseguenza lo schema circuitale relativo ad una fase della macchina trifase. A differenza del trasformatore le due f.e.m. non sono in opposizione di fase a rotore bloccato ma ciò è vero soltanto per quelle posizioni relative tra statore e rotore in cui gli assi magnetici delle fasi corrispondenti sono allineati. Nelle altre posizioni le due f.e.m.  $E_1, E_2$  sono tra loro sfasate poiché il flusso che le produce non è istante per istante, ugualmente concatenato con i due avvolgimenti.

Se ora studiamo il comportamento a rotore bloccato si vedrà che la terna simmetrica di f.e.m. di rotore  $E_2$  dà luogo ad una terna equilibrata di correnti  $I_2$  che produce una f.m.m. a gradini rotante lungo il traferro con la stessa velocità e lo stesso verso della f.m.m. rotante di statore. Infatti tale f.m.m. si comporta, essendo il rotore bloccato, come la f.m.m. di reazione di indotto di una macchina sincrona di cui la f.m.m. di statore rappresenta la f.m.m. di induttore.

Rispetto a un riferimento solidale con lo statore, l'andamento temporale della fondamentale della f.m.m. rotorica è individuato da un vettore  $M_2$  di valore massimo:

$$M_2 = 1.35 n_2 q_2 K_2 I_2$$

La f.m.m.  $M_2$ , essendo creata dalle correnti  $I_2$  indotte da  $\Phi_0$ , tenderebbe, per la legge di Lenz, ad annullare  $\Phi_0$ ; poiché tale flusso è supposto costante, le fasi di statore debbono necessariamente richiamare dalla rete una nuova terna di correnti  $I_{12}$  tali da mettere in gioco al traferro una f.m.m. la cui fondamentale  $M_{12}$  vale:

$$M_{12} = 1,35 n_1 q_1 K_1 I_{12} = -1.35 n_2 q_2 K_2 I_2$$

Si ha pertanto:

$$I_{12} = -\frac{n_2 q_2 K_2 I_2}{N_1 q_1 K_1} = \frac{I_2}{t}$$

E ogni fase di statore circola la corrente:

$$I_1 = I_0 + I_{12}$$

Si può scrivere quindi la relazione:

$$V_1 / \sqrt{3} = -E_1 + (R_1 + jX_1)I_1$$

Analogamente per ogni fase di rotore vale la relazione:

$$E_2 = (R_2 + jX_2)I_2$$

Data l'ipotesi di flusso  $\Phi_0$  e quindi di  $E_1$  costanti, si osserva che la tensione dei due casi studiati sarà diversa. Essendo poi nella pratica imposta e costante la tensione di alimentazione ne consegue che sarà il flusso a variare passando dal valore  $\Phi_0$  al valore  $\Phi$  a carico; le f.e.m. risultano pertanto essere:

$$E_1 = 2K_f K_1 \Phi f N_1$$

$$E_2 = 2 K_f K_2 \Phi f N_2$$

Nel funzionamento di rotore libero di ruotare si ha che i conduttori di rotore sono percorsi da corrente ed immersi in un campo magnetico ad essi perpendicolare, essi sono sede di forze tangenziali che daranno luogo ad una coppia risultante. Essendo tale coppia dovuta a correnti indotte che, per la legge di Lenz, si oppongono alla causa che le ha create. Essa tende a diminuire la velocità relativa tra campo e rotore, ossia a trascinare il rotore nello stesso verso del campo di statore. In definitiva la coppia porta il rotore in rotazione con una velocità  $n$  che, per la presenza di attriti, è minore di  $n_0$ .

Nel caso di presenza di una coppia frenante applicata all'albero la rotazione viene frenata: aumenta la velocità relativa tra il campo di statore e rotore, aumenta l'ampiezza delle correnti indotte e si stabilisce una nuova velocità  $n$  inferiore alla precedente, in corrispondenza alla quale la nuova coppia motrice prodotta dalle correnti indotte viene ancora ad equilibrare la coppia resistente esterna e quella dovuta agli attriti. Applicando una coppia esterna all'albero è possibile far raggiungere e superare al rotore la velocità di sincronismo oppure far ruotare il rotore in senso contrario a quello del campo magnetico rotante. Assumendo il verso del campo magnetico rotante di statore come positivo, in corrispondenza a una generica velocità  $n$  del rotore la velocità relativa tra il campo rotante di statore e rotore vale

$(n_0 - n)$  e la frequenza delle f.e.m. indotte nei conduttori di rotore risulta:

$$f_s = p (n_0 - n) / 60$$

Posto:

$$s = (n_0 - n) / n_0$$

Si ha:

$$f_s = p \cdot s \cdot n_0 / 60 = f \cdot s$$

La grandezza adimensionale  $s$  viene denominata scorrimento della macchina asincrona.

$$E_{2s} = 2 K_f K_2 \Phi f_s N_2$$

$$X_{2s} = 2 \pi f_s L_2 = X_2 \cdot s$$

Si ricava quindi la corrente che circola nei conduttori rotorici è:

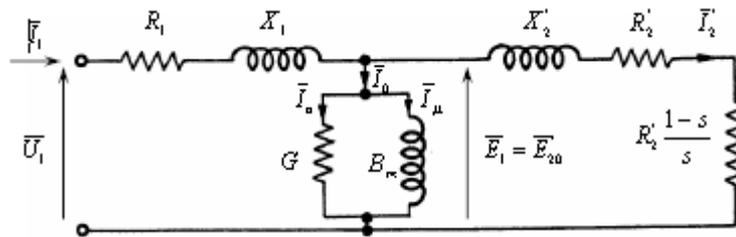
$$I_{2s} = E_{2s} / (R_2 + jX_{2s})$$

Per avere la corrente  $I_{12}$  alla frequenza  $f$  e non a quella  $f_s$  reale nei circuiti rotorici la si moltiplica per  $s$ :

$$I_2 = E_{2s} / (R_2 / s + jX_{2s})$$

Il valore efficace della corrente  $I_2$  resta lo stesso di prima, il valore della f.e.m.  $E_2$  di valore efficace  $E_2 = E_{2s} / s$ . la differenza tra  $I_2$  e  $I_{2s}$  è solamente che la prima ha frequenza  $f$  (uguale a quella di alimentazione) e la seconda  $f_s$ .

Ora che abbiamo studiato la macchina asincrona possiamo vedere il suo circuito elettrico equivalente:



Ora andiamo a definire le potenze in gioco nella macchina asincrona ma prima ci troviamo  $I_{12}$ :

$$I_{12} = (V_1 / \sqrt{3}) / \sqrt{(R_1 + R_{12} / s)^2 + X^2}$$

Potenza elettrica attiva ai morsetti dell'avvolgimento trifase di statore:

$$P_e = 3 (R_1 + R_{12} / s) I_{12}^2 = 3(R_1 + R_{12} + R_{12} \cdot (1-s) / s) I_{12}^2$$

Potenza trasmessa elettromagneticamente:

$$P_t = 3 (R_{12} / s) I_{12}^2 = P_e - P_{ep1}$$

Potenza persa per effetto joule negli avvolgimenti statore e di rotore :

$$P_{ep} = P_{ep1} + P_{ep2} = 3R_1 I_{12}^2 + 3R_2 I_{12}^2$$

Potenza meccanica all'albero, coincidente con quella convertita da elettrica in meccanica:

$$P_m = P_{em} = 3 I_{12}^2 R_{12} \cdot (1-s) / s = P_t - P_{ep2}$$

Velocità angolare del campo rotante di statore:

$$\Omega_0 = 2\pi n_0/60$$

Velocità angolare del rotore:

$$\Omega = 2\pi n/60$$

Coppia elettromagnetica:

$$C = P_{em} / \Omega = P_m / \Omega = 3 I_{12}^2 R_{12} \cdot (1-s)/(s \cdot \Omega) = P_t / \Omega_0$$

Si ha la coppia massima in funzione dello scorrimento quando:

$$dC/ds=0, \text{ ossia per:}$$

$$s = R_{12} / Z = s_M$$

Per tale valore di scorrimento si ricava:

$$C_M = V_1^2 / (2 \Omega_0 Z (1+R_1/Z)) \approx V_1^2 / (2 \Omega_0 Z)$$

Con:

$$Z^2 = R_1^2 + X^2$$

Il valore minimo di coppia si ottiene con scorrimento pari a:

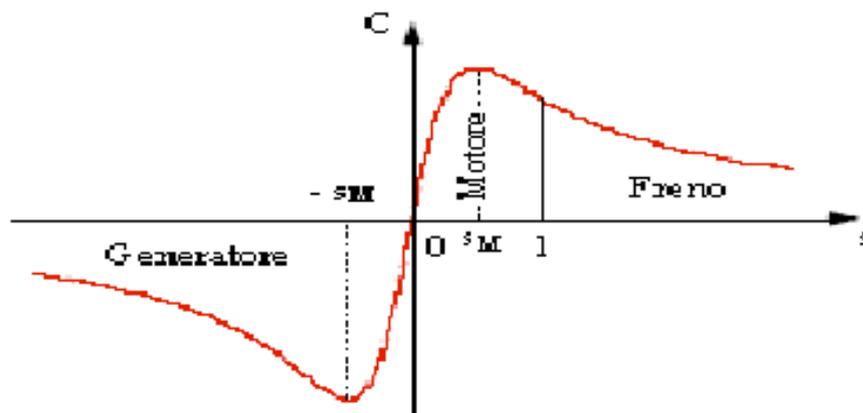
$$s_r = R_{12} / Z$$

e il valore della coppia è:

$$C_M' = V_1^2 / (2 \Omega_0 Z (1-R_1/Z))$$

Per valori di scorrimento compresi tra zero e  $s_r$  la macchina si comporta da generatore con valori minori a  $s_r$  si comporta come freno, tra 1 e zero come motore e oltre il valore unitario nuovamente come freno.

Caratteristica meccanica della macchina asincrona:



Il rendimento di una macchina asincrona si può calcolare nel seguente modo:

$$\eta = \frac{P_m}{P_e} = \frac{P_m}{P_m + P_{ep1} + P_{ep2}}$$

Solitamente il rendimento di un motore asincrono si aggira attorno al 90%.

Nel caso dell'auto elettrica si dovrà tener conto che anche del fatto che durante il tempo di frenata la macchina andrà a recuperare energia che nelle autovetture convenzionali viene dissipata dai freni sottoforma di calore.

## La macchina ad idrogeno

L'ultima categoria che ci siamo proposti di studiare sono le autovetture ad idrogeno e a fuel cell. Prima di tutto iniziamo col studiare i vari metodi di produzione dell'idrogeno che sono:

- **Steam reforming:** Lo Steam reforming del gas metano è un processo ben sviluppato, ed attraverso il quale si produce il 48% dell' $H_2$  mondiale. Il gas naturale viene fatto reagire con vapor d'acqua ad alta temperatura (700 - 925°C) ed alta pressione (3 - 25 bar), in presenza di un catalizzatore (di solito Ni), per formare un gas di sintesi (syngas), composto da  $H_2$  e CO. il syngas viene trattato con una reazione di water gas shift, con produzione di ulteriore  $H_2$  e la conversione di CO in  $CO_2$ . nella maggior parte degli impianti più moderni, dopo la rimozione del CO nel reattore di shift, si adottano unità che rimuovono la  $CO_2$  ed altre in purezze. Il rendimento di questo processo è 75 ~ 80%. Il costo del metano incide sul costo finale del 52 ~ 68% e se si vuole separare e sequestrare la  $CO_2$  aumentano il costo del 25% circa.
- **Ossidazione parziale:** L'idrogeno può essere ottenuto dall'ossidazione parziale di idrocarburi pesanti, come nafta, o carbone. Il processo consiste nella reazione con una limitata quantità di ossidante ( $O_2$  o aria), per formare syngas, ad una temperatura di 700 ~ 800 °C, se si impiega un catalizzatore, e di 1100 ~ 1500 °C, in caso contrario. In questo caso il rendimento è del 60% con costi sensibilmente più elevati.
- **Reforming auto termico:** Questo processo combina le migliori caratteristiche dei due processi appena descritti. A differenza del primo non richiede sorgenti esterne di calore perché il necessario viene prodotto dalla reazione di ossidazione parziale (esotermica) sostiene il processo di steam reforming (endotermico). Anche

in questo processo avviene l'arricchimento in idrogeno attraverso un processo di schift.

- **Gassificazione:** La gassificazione del carbone è un processo che, in condizioni di alta pressione e temperatura, in presenza di ossigeno e vapore, trasforma il carbone in syngas. Il calore necessario è fornito dalla ossidazione parziale del combustibile. L'efficienza di questo processo varia dalla tecnologia impiegata e dalla capacità dell'impianto ed essa varia dal 40 al 60%. La percentuale prodotta con questo processo varia attorno al 25 ~ 30%.
- **Elettrolisi:** Il processo di elettrolisi richiede il passaggio di corrente elettrica attraverso l'acqua (necessaria una soluzione di acqua e non di H<sub>2</sub>O pura). La corrente entra nella cella elettrolitica del catodo, attraversa l'acqua ed esce dall'anodo. Il passaggio di una corrente in una soluzione produce una scissione della molecola dell'acqua liberando al contempo energia. La produzione di idrogeno con questo processo è del 4% a causa dell'elevato costo. Viene ancora utilizzata per soddisfare le richieste ad alta purezza. Il rendimento del processo di generazione di H<sub>2</sub> da elettrolisi dell'acqua si definisce come il rapporto tra il potere calorifero inferiore dell'idrogeno diviso l'energia elettrica in ingresso. Il rendimento teorico è del 85% ma quello reale varia tra il 55% ed il 70% senza considerare i rendimenti della generazione elettrica.

*(dati del 2007 ricavati dal sito <http://www.iea.org/> )*

Di conseguenza abbiamo che il rendimento medio con cui si ottiene l'idrogeno è di circa il 68% visto che la maggior parte di esso si produce con lo Steam reforming il quale ha un rendimento che varia tra il 75 ~ 80%.

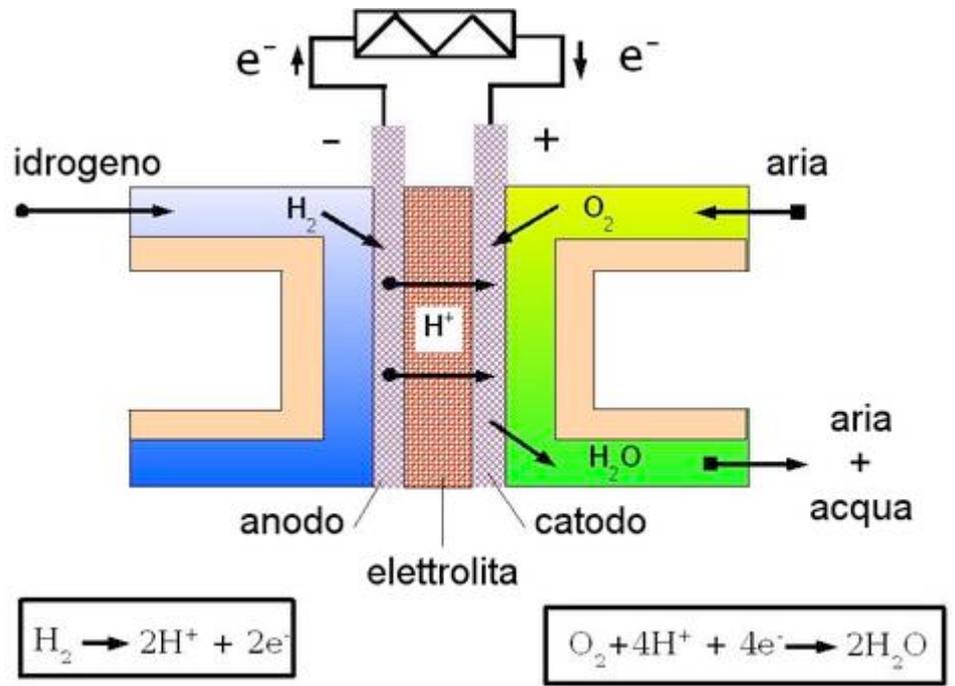
Dopo aver visto come si ottiene l'idrogeno si deve tener conto della distribuzione nella quale sono presenti a sua volta perdite non nulle e di conseguenza ne dovremmo tenere conto. L'idrogeno si può distribuire attraverso gli idrogenodotti (sono simili ai metanodotti già presenti nel territorio), oppure in forma

liquida utilizzando dei serbatoi in appositi navi od altri mezzi di trasporto come potrà essere l'auto ad idrogeno. Cominciamo subito col dire che il trasporto di idrogeno in serbatoi - bombole non è semplice perché esso necessita di una maggiore complessità e che da un punto di vista energetico costa il 30% del contenuto energetico a differenza di quello compresso compreso tra il 4 ed il 7%. Per il costo elevato che possiede l'idrogeno liquido attualmente si sceglie di utilizzare la compressione. Sebbene sia costoso si sta investendo molto nella ricerca per trovare dei metodi di stoccaggio per l'idrogeno liquido visto che proprio in questo stato possiede una densità energetica specifica maggiore, circa 6 kWh/Kg contro i 12,5 kWh/Kg della benzina. Attualmente la tecnica di distribuzione più affermata è attraverso l'utilizzo dei idrogenodotti i quali grazie all'esperienza acquisita nel trasporto di gas naturale e al fatto che l'idrogeno è meno viscoso, ma possiede una densità energetica volumetrica minore allora con un'adatta progettazione, l'energia necessaria per il suo pompaggio diventa paragonabile a quella richiesta per la stessa quantità di energia trasportata con il metano. Di conseguenza non essendoci per ora grandi distribuzioni di idrogeno metteremo il rendimento medio di un metanodotto.

L'energia posseduta dall'idrogeno si può sfruttare in due modi con la tecnologia presente: il primo attraverso la combustione in un motore endotermico e il secondo attraverso la pila a combustibile (fuel cell). Per il secondo metodo la distribuzione dell'idrogeno potrebbe non essere necessaria se le pile fossero prodotte vicino ad un produttore d'idrogeno ma successivamente si dovrebbe tener conto della distribuzione delle batterie stesse. Non essendo già presente una produzione di pile a combustibile e di conseguenza non essendo presente attualmente la distribuzione delle stesse il computo del rendimento della distribuzione risulta più difficoltoso se non totalmente incalcolabile visto che non si può prevedere come il mercato risponderà all'ingresso del nuovo prodotto. Dopo questa premessa si ipotizza che la distribuzione delle pile a combustibile presenterà un rendimento pari a quello della distribuzione carburante fossile. Prima di esprimere il valore del rendimento della pila a combustibile la studieremo a cercheremo di capire se presenta margini di miglioramento.

## La pila a combustibile, o fuel cell

La pila a combustibile, è un sistema redox (si avvale di reazioni chimiche di ossidazione, isolando il flusso di elettroni, e convogliandolo verso motori o altri impieghi), e quindi possono impiegare anche idrocarburi oltre all'idrogeno puro. La fuel cell, è un dispositivo che converte direttamente l'energia di un combustibile in elettrica e calore senza passare attraverso cicli termici e quindi senza risentire delle limitazioni imposte a questi ultimi dalla termodinamica. In sostanza funziona in modo analogo ad una batteria a secco, in quanto produce energia elettrica attraverso un



processo elettrochimico; a differenza di quest'ultima, tuttavia, consuma sostanze provenienti dall'esterno ed è quindi in grado di funzionare senza interruzioni, finché al sistema viene fornito combustibile ed ossidante. Una cella è composta da due elettrodi separati da un elettrolita. Le reazioni che avvengono agli elettrodi consumano fondamentalmente idrogeno e ossigeno e producono acqua, attivando un passaggio di corrente elettrica nel circuito esterno. L'elettrolita, che ha la funzione di condurre gli ioni prodotti da una reazione e consumati dall'altra, chiude il circuito elettrico all'interno della cella. La trasformazione elettrochimica è accompagnata da produzione di calore. La pila a combustibile è una tecnologia sperimentale ed è ancora costosa e ingombrante. La realizzazione di una fuel cell richiede infatti metalli della serie chimica del platino (estremamente costoso) mentre gli altri materiali provati fino ad ora hanno dimostrato una vita utile troppo breve. Dal momento che la diffusione dell'utilizzo dell'idrogeno come una fonte portatile di energia ha senso soltanto se impiegato in pile a combustibile (la semplice combustione con l'ossigeno atmosferico in motori a combustione interna produce inquinanti come i  $NO_x$ , rumore, ed ha una minor resa energetica in termini di efficienza), le persone che auspicano

una economia all'idrogeno sperano che i progressi nelle nanotecnologie e nella produzione in serie ridurrà questi problemi in modo di rendere queste pile efficaci in rapporto al loro costo. Se quest'ultimi divenissero competitivi rispetto ai motori diesel e alle turbine, tra i primi utilizzatori ci sarebbero le centrali elettriche alimentate a gas naturale (che sono poco inquinanti). Queste possono avere un ottimo rapporto peso/potenza (ma ad esso si aggiungerebbe anche il peso dei motori elettrici), sono più efficienti (ignorando i consumi del processo produttivo) rispetto ai motori a combustione interna, e non producono emissioni dannose. Se potessero essere fabbricate economicamente, le fuel cells, sarebbero economicamente convenienti in una macchina ibrida avanzata (ovvero che combina l'energia elettrica prodotta da celle a.c. e quella erogata da batterie a sua volta da ricaricare direttamente o con l'energia solare di pannelli di un parcheggio, o con l'energia elettrica domestica da fonte eolica o da cogenerazione oppure direttamente con la corrente di casa). Le pile a combustibile presentano un rendimento attuale del 40% e in un prossimo futuro si pensa possa arrivare ad un massimo di 60%.

Ora che abbiamo visto il principio di funzionamento di una pila a combustibile e sappiamo già dallo studio precedente il rendimento di un motore elettrico asincrono possiamo ricavarci il rendimento complessivo.

L'ultima tipologia di autovettura è data dalla combustione dell'idrogeno in un motore endotermico il quale possiede un rendimento del 40% circa.

Negli ultimi anni, la Direct Carbon Fuel Cell (DCFC) ha studiato le fuel cell ed ha inventato un prototipo che genera allo stesso tempo energia elettrica ed idrogeno ad altissima efficienza.

L'invenzione utilizza il metano o gas naturale come combustibile in una cella a combustibile a carbone con coprodotti idrogeno ed elettricità. Il DCFC è costituito da una cella elettrochimica con elettrolita sale fuso, di solito alcalini (Na, Li, K) carbonato a 600 °C a 1000 °C all'interno di un compartimento anodo e un catodo vano. I vani sono separati da una membrana permeabile agli ioni (ossido di zirconio o altri membrana permeabile ad alta temperatura). Nel vano catodo, l'ossigeno reagisce con l'aria di CO<sub>2</sub> riciclati per la produzione di ioni di carbonato (CO<sub>3</sub><sup>=</sup>), che viaggia verso il compartimento anodo attraverso la membrana permeabile. Nel compartimento anodo, lo ione carbonato reagisce con il carbonio del combustibile

per la produzione di CO<sub>2</sub> e rilasciando elettroni che produce elettricità. Le reazioni sono le seguenti:

al catodo:  $4e^- + 2CO_2 + O_2 = (2CO_3^-)$  ;

All'anodo:  $C + 2CO_3^- = 3CO_2 + 4e^-$ ;

La reazione globale:  $C + O_2 = CO_2$ .

L'efficienza teorica termodinamica nel DCFC è al 100% per la conversione dell'entalpia ( $\Delta H$ ) di ossidazione di carbonio alle emissioni di CO<sub>2</sub> per l'energia libera ( $\Delta F$ ) di reazione, che genera la forza elettromagnetica. Poiché la variazione di entropia per l'ossidazione del carbonio in CO<sub>2</sub> è pari a zero,  $\Delta H = \Delta F$ . La cella a combustibile di sale fuso è ben noto per la conversione dell'idrogeno in energia elettrica.

Tuttavia, il teorico rendimento termodinamico dell'idrogeno come combustibile è solo il 70%. Così, la cella a combustibile a carbonati fusi con carburante di carbonio è intrinsecamente più efficiente rispetto alla cella a combustibile a carbonati fusi con combustibile a idrogeno. In laboratorio, l'efficienza termica per la DCFC con combustibile l'idrogeno sono stati raggiunti valori del 90%. Per un combustibile comune la densità di corrente della cella per la produzione di energia elettrica, il DCFC è progettato per essere l'80% ad alta efficienza termica. È anche noto che il gas naturale (metano) può essere decomposto in carbonio e idrogeno a temperature al di sopra dei 500°C. Molto lavoro è stato eseguito su di cracking del metano a carbonio e idrogeno in vari reattori, come un forno riscaldato a gas o di elettricità, un plasma ad alta temperatura o in un bagno di metallo fuso (TIN) o in sale fuso (solfato o carbonato). La reazione è endotermica, a 18 kcal / g-mol di CH<sub>4</sub> da guidare la reazione di decomposizione ed è la seguente:  $CH_4 = C + 2H_2$

Questa invenzione utilizza il metano (gas naturale) come alimentazione per la produzione di idrogeno e di elettricità, combinando il metano la decomposizione di sale fuso con la cella a combustibile di carbonio (DCFC) in una sola unità, nota come Gas naturale Direct Fuel Cell di carbonio (NGDCFC). Il compartimento anodo del DCFC funge da decompositore del metano per formare particelle di carbonio solido, che rimane in sale fuso, e l'idrogeno è generato dalla reazione. Il carbonio in sale fuso si unisce con lo ione carbonato (CO<sub>3</sub><sup>-</sup>) e produce energia elettrica per il circuito di potenza e la CO<sub>2</sub> si evolve dall'anodo. Per evitare che H<sub>2</sub> gassoso reagisca con le elevate concentrazioni di CO<sub>2</sub> gassosa le quali produrrebbero H<sub>2</sub>O e CO nel compartimento anodo. Quindi i gas vengono raffreddati rapidamente in quanto sono

emessi dal compartimento anodo. Una personificazione alternativa divide il vano anodo in due sezioni: una CH<sub>4</sub> anticamera sezione di decomposizione e una sezione anodo principale. Le due sezioni sono separate con l'aggiunta di un deflettore in torretta all'anodo vano. Questo garantisce maggiore efficienza al deflettore perché separa l'anticamera per il metano di decomposizione che si terrà all'interno del compartimento anodo la quale consente la rimozione d'idrogeno separatamente dal sale fuso e ridurre al minimo possibile reazione con la CO<sub>2</sub> in evoluzione nella sezione principale anodo. Il particolato solido carbonico prodotto nella sezione di decomposizione dell'anticamera CH<sub>4</sub> è mantenuta nei carbonati fusi di sale. I flussi di carbonio attraverso il deflettore a torretta con la sezione dell'anodo principale dove si trova l'elettrodo anodico, permettendo al carbonio di reagire con lo ione carbonato di formare CO<sub>2</sub>. In questo modo, l'idrogeno si evolve separatamente in CH<sub>4</sub> anticamera sezione decomposizione e la CO<sub>2</sub> si evolve nella sezione principale anodo. Il metano alimenta il gas rilasciato nella sezione decomposizione dell'anticamera CH<sub>4</sub> che fornisce la convezione sufficiente e la turbolenza per la miscelazione del sale fuso carbonato di flusso di carbonio attraverso le feritoie per la sezione principale anodo. Il posizionamento delle feritoie promuove la circolazione di il sale fuso tra le due sezioni anodo. La CO<sub>2</sub> è riciclata dalla sezione principale anodo al compartimento catodico da entrambe indietro attraverso la diffusione della membrana è di riciclo dei gas di CO<sub>2</sub>. L'energia termica per decomporre il metano di carbonio e di idrogeno nella sezione decomposizione dell'anticamera CH<sub>4</sub> si ottiene dalla inefficienza del 20% della reazione di ossidazione del carbonio DCFC. Così, il DCFC opera auto termicamente, cioè non richiede ulteriore input di energia. Il preriscaldamento del gas di alimentazione naturale è compiuto da gas a gas attraverso gli scambiatori di calore che trasferiscono il calore dal H<sub>2</sub> e dalla CO<sub>2</sub> degli effluenti e dalla cella al gas naturale agli ingressi di aria alla cella. Questa invenzione è particolarmente adatta alla produzione e alla fornitura d'idrogeno nelle stazioni di rifornimento dei veicoli. Una naturale alimentazione a gas DCFC è molto più efficiente ed economica rispetto al valore convenzionale del reforming di gas. E' anche possibile farlo con notevole riduzione di gas serra emissioni di CO<sub>2</sub> rispetto al valore convenzionale del processo di reforming. La CO<sub>2</sub> viene emessa al 100% di concentrazione, in modo che possa essere facilmente raccolta e venduta o sequestrata. Inoltre, la presente invenzione contemporaneamente produce energia

elettrica, che può essere venduto alle aziende e può essere dispensata alla stessa stazione per i veicoli a trazione elettrica, che alcuni pensano finirà per sorpassare i veicoli alimentati a idrogeno. In ogni caso, questo sistema potrebbe essere impiegato indipendentemente dalla fornitura di idrogeno per veicoli o per i veicoli elettrici. Un altro vantaggio decisivo di questa invenzione è che l'idrogeno e l'elettricità sono coprodotto in un'unica unità. Questo semplifica le operazioni e di riduce considerevolmente gli investimenti di capitale che sarebbero altrimenti necessari con l'utilizzo del tradizionale metodo dello steam reforming di gas naturale. L'efficienza complessiva è del 100% grazie al fatto che con la cogenerazione si ha un rendimento per la generazione dell'idrogeno pari al 64% e quello per la produzione dell'energia elettrica pari al 36%. Questi rendimenti potranno essere ritoccati in difetto ma resta evidente che se questa invenzione risulterà realizzabile la produzione d'idrogeno inizierà ad essere competitiva con la generazione degli altri vettori energetici.

## Confronto:

Ora siamo in possesso di tutti i vari rendimenti di tutti dei processi che ci permettono di arrivare dalla fonte alla ruota di ogni tipologia di autovettura e quindi possiamo andare a trovare l'efficienza globale dei vari modelli di automobili. Attraverso le tabelle seguenti andremo a vedere il rendimento migliore ed percorso più dispendioso da un punto di vista energetico per ogni tipologia di autoveicolo.

### Il motore endotermico:

Rendimento delle raffinerie	Rendimento della distribuzione	Rendimento del motore endotermico	Rendimento complessivo
75%	75%	30% (ad accensione comandata)	16,88%
		43% (ad accensione spontanea)	24,19%

Si può notare che i rendimenti sono molto ridotti ma si nota che il motore ad accensione spontanea è molto più performante rispetto a quello ad accensione comandata.

Il secondo motore analizzato era **il motore elettrico** con il quale si deve considerare prima di tutto il rendimento medio di generazione del KWh e poi si può passare a studiare il resto della filiera. Si ha quindi:

Rendimenti centrali elettriche	Rendimento medio di generazione
33% (centrali nucleari)	
100%(60% eolico)	
100%(0,6% biomasse)	
100%(16% fotovoltaico)	
100%(12-15% solare 45% sperimentale)	52%
100%(80-90% centrali idroelettriche)	
100%(10-17% centrali geotermiche)	
43%(52% in futuro per le centrali a carbone)	
55%(centrali a ciclo combinato)	
43%(centrali ad olio combustibile)	

Il rendimento medio di generazione è stato calcolato ponderando l'efficienza dei vari processi produttivi con la percentuale con cui sono stati impiegati per produrre l'energia elettrica nel mondo nell'anno 2007 (dato fornito dall'ENEA).

Sebbene il dato non sia riferito all'anno scorso si ritiene valido ed affidabile perché lo scenario di produzione non ha visto variazioni considerevoli.

<b>Rendimento medio di generazione</b>	<b>Rendimento della distribuzione</b>	<b>Rapporto di conversione delle batterie</b>	<b>Motore elettrico</b>	<b>Rendimento complessivo</b>
52%	94,53%	95%	90%	42,03%

Da questa analisi si vede che la macchina trainata da un motore elettrico è molto più efficiente rispetto alla stessa movimentata con un motore endotermico. Il massimo rendimento che si può ottenere è del 80,82% se partiamo dalla generazione con le fonti rinnovabili che possiedono rendimento unitario come riportato in precedenza. Il peggior rendimento si ha con l'utilizzo di centrali nucleari che possiedono un rendimento di generazione pari al 33% e di conseguenza si ottiene un'efficienza complessiva pari a 26,67%. Sebbene sia molto minore sia della precedente che di quella ponderata è sempre maggiore e di molto a quella ottenuta dal motore a combustione interna.

Per ultimo si analizza il rendimento complessivo delle **vetture ad idrogeno** sempre andando prima a calcolarsi il rendimento medio di generazione dell'idrogeno e si è ottenuto:

<b>Rendimento di generazione</b>	<b>Rendimento medio di generazione</b>
75-80% (steam reforming)	
60% (ossidazione parziale)	
64% (reforming autotermico)	68%
40-60% (massificazione)	
55-70% (elettrolisi)	

Non è stata considerata l'ultima invenzione perché non è ancora attiva nel mercato e quindi non si può dire il reale rendimento di generazione.

<b>Rendimento medio di generazione</b>	<b>Rendimento di distribuzione</b>	<b>Fuel cell</b>	<b>Motore elettrico</b>	<b>Rendimento complessivo</b>
		40% (60% in futuro)	90%	22,77% (34,15%)
68%	93-60% (gassoso - liquido)		<b>Motore endotermico</b>	
			40%	25,30%

Si deve premettere che la distribuzione dell'idrogeno non è ancora molto sviluppata sebbene si pensi che essa possa essere paragonata a quella del metano e per correttezza non si dovrebbe scrivere il rendimento e lo stesso ragionamento si può fare per la generazione che attualmente come è riportato nello studio si stanno

studiando nuovi sistemi di produzione e di conseguenza questi dati andranno via via correggendosi con il tempo e la maggiore conoscenza della tecnologia utilizzata in questo settore. Attualmente però balza agli occhi il fatto che il rendimento sia migliore del motore endotermico e peggiore del motore elettrico. Questa tipologia possiede un massimo del rendimento con la generazione del steam reforming con il quale si ottiene un'efficienza complessiva pari al 29,76% se utilizziamo come motore il motore endotermico. Il minimo si ha quando si genera l'idrogeno con la gassificazione poi si utilizza un motore elettrico alimentato dalle pile a combustibile e così si ottiene un rendimento complessivo pari al 18,41%. Si vede che pure il minimo del motore a pile a combustibile presenta un'efficienza migliore del motore a combustione interna ad accensione comandata.

## **Conclusioni:**

Si è notato dai vari rendimenti complessivi che il motore elettrico è il più efficiente anche se nel computo del suo rendimento non è stato conteggiato il fatto che esso in frenata possa recuperare l'energia. Sebbene esso si il migliore da un punto di vista energetico resta il problema che presenta dei forti limiti per quanto riguarda l'autonomia e i tempi di ricarica. L'autonomia con i sistemi attuali si riesce ad arrivare al massimo ad una cinquantina di chilometri con tempi di ricarica che sono dell'ordine di grandezza di qualche ora quando con una vettura endotermica si possiede un'autonomia fino a mille chilometri con tempi di rifornimento dell'ordine di una decina di minuti. Per ora il motore endotermico sebbene sia il più energivoro è il più adatto a soddisfare i bisogni della società. Diventeranno più competitivi le altre tipologie solo nel momento in cui ci fossero nuove invenzioni come la Direct Carbon Fuel Cell (DCFC) che renderebbero competitive le altre due tecnologie. Oppure la continuazione delle restrizioni nelle nuove vetture immatricolate (coi sistemi EURO5,EURO6...) che di fatto già dalla restrizione prevista per rientrare nei canoni EURO6 la tecnologia del motore endotermico ad accensione spontanea diventa impraticabile. Oltre alle restrizioni di carattere ambientale potrebbero essere incentivate le auto elettriche per cercare di livellare il grafico dei consumi di energia elettrica giornaliera. Questo potrebbe a far diminuire il costo di generazione del KWh e di conseguenza si potrebbe avere un abbassamento del prezzo finale per tutta l'utenza. Ma attualmente non si è pronti a far entrare in commercio le vetture ad alimentazione elettrica perché la tassazione del KWh per utilizzo di trazione dovrebbe essere differente da quella per uso domestico (stesso problema che è sorto con l'introduzione delle vetture a metano). In fine le vetture ad idrogeno sono ancora troppo acerbe sia da un punto di vista di generazione della materia prima sia per un problema legato al fatto che le pile a combustibile sono ancora in via di sperimentazione e non si è arrivati ad una tecnologia in entrambi i casi redditizia economicamente ed energeticamente. Attualmente nessuna tipologia dei veicoli studiati comporterebbe all'abbattimento dell'inquinamento perché la prima inquina direttamente tramite la combustione nel veicolo e le altre in fase di generazione del vettore energetico. Di conseguenza bisognerebbe prima trovare delle fonti rinnovabili e poi sfruttarle. Per quanto riguarda l'energia elettrica che ne possiede già di

consolidate bisogna sottolineare che per un funzionamento corretto del sistema elettrico si dovrebbe avere una produzione provenienti da quest'ultime non superiori al 20% perché essendo intermittenti e non controllabili nell'atto di generazione del KWh non si possono modulare. La percentuale si potrebbe superare solo se ci fosse la possibilità di accumulare l'energia elettrica (che attualmente non è conveniente ne da un punto di vista economico ne da quello energetico).

## **Bibliografia**

Libro: Macchine per allievi ingegneri (libreria Internazionale Cortina Padova, autore Giuseppe Vetrone, ed 2007)

Libro: Macchine Elettriche Rotanti "seconda edizione" (Libreria internazionale Cortina Padova, Autori M. Andriollo G. Martinelli A. Morini, Ed. 2009)

## **Sitografia**

Sito: <http://www.sciencedirect.com/>

Sito: <http://www.terna.it/>

Sito: <http://www.iea.org/>

Sito: <http://www.elsevier.com/>

Sito: [http://www.die.unipd.it/~zollino/didattica/corsi/TECNICA\\_ED\\_ECONOMIA\\_DELL\\_ENERGIA/AA2009-2010/Lezioni-2009-10/](http://www.die.unipd.it/~zollino/didattica/corsi/TECNICA_ED_ECONOMIA_DELL_ENERGIA/AA2009-2010/Lezioni-2009-10/)