

La necessità di muoversi in tempi rapidi è uno delle questioni cruciali nel mondo odierno. Per la soddisfazione di tale bisogno sono nate tra la fine del 1800 e l'inizio del 1900 le prime automobili con motori a combustione interna alimentate da combustibili fossili. Attualmente sia la crisi del petrolio sia la necessità di abbattere le emissioni di gas serra hanno aperto la strada per la ricerca di combustibili alternativi. Nel seguito verrà analizzato lo stato dell'arte della tecnologia delle fuel cell per autoveicoli alimentati a idrogeno, una tecnologia che potrebbe rispondere positivamente ai problemi nati negli ultimi anni.

SOMMARIO

1	Introduzione	1
2	Fuel cell	7
2.1	Cenni storic	8
2.2	principio di funzionamento	8
2.3	Tipi di fuel cell	9
2.4	PEMFC	12
2.4.1	Struttura della cella	12
2.4.2	Reazioni chimiche	14
2.4.3	Stack	15
2.4.4	Caratteristica esterna e rendimenti	18
3	Architettura dei veicoli a fuel cell	25
3.1	Sistemi di accumulo di idrogeno	26
3.2	Powertrain	28
3.3	Comparazione dei sistemi	30
3.3.1	Descrizione delle tipologie	31
3.3.2	Simulazione	32
3.4	Convertitore DC/DC	40
3.5	Motori elettrici	43
3.5.1	Il motore in corrente continua	43
3.5.2	Motore asincrono trifase	45
3.5.3	Motore sincrono a magneti permanenti	47
3.5.4	Comparazione	48
4	Conclusioni	51
A	Prototipi di FCV	55

1

Introduzione

La maggior parte dell'energia consumata nei paesi industrializzati viene prodotta bruciando combustibili fossili. L'emissione in atmosfera dei gas prodotti dalla combustione comporta una variazione dell'equilibrio naturale che, a sua volta, implica gravi danni all'ecosistema.

Le stime sulle riserve e i consumi mondiali di combustibili fossili hanno fatto emergere scenari futuri allarmanti anche se non sono condivisi da tutti. Le valutazioni più pessimistiche, che si basano sulla curva di Hubbert, assicurano che dopo svariati anni di aumento dei consumi si sta per raggiungere il picco e quindi una nuova fase discendente; anche tra le ipotesi pessimistiche ci sono delle discrepanze. Alcuni prevedono che il picco sia stato raggiunto in questi anni come rappresentato dalla Figura 1 mentre altri assicurano che tale picco, detto peak oil, si raggiungerà attorno al 2030.

Le previsioni ottimistiche, invece, giurano che con i progressi della tecnologia si riuscirà a continuare a soddisfare il fabbisogno mondiale.

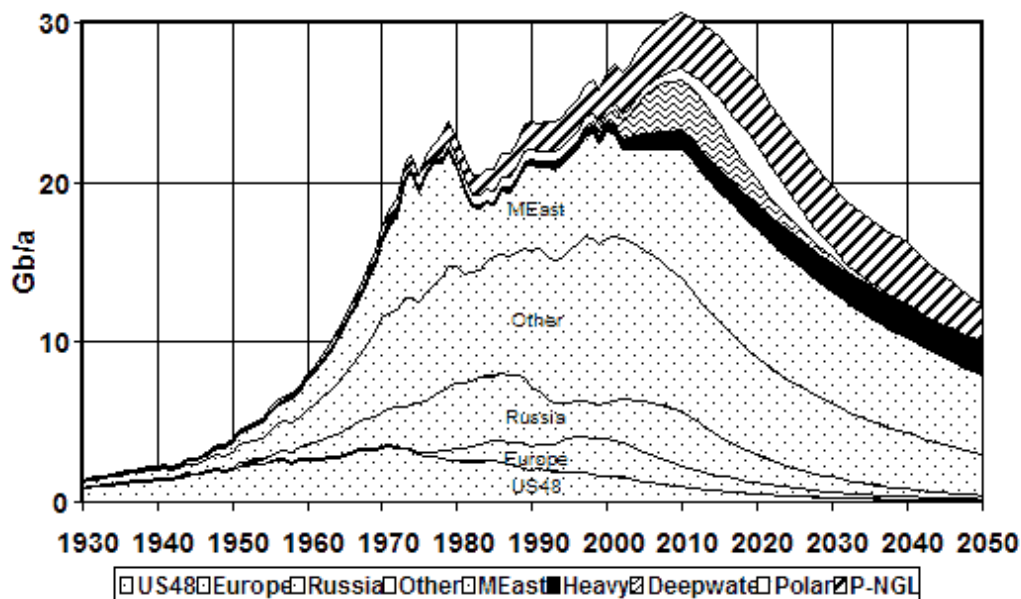


Figura 1 Stima del geologo britannico Colin Campbell. Qui, il picco per il petrolio convenzionale arriva verso il 2005, mentre quello per tutti i liquidi verso il 2010 circa.

Questo argomento è tuttavia molto difficile da trattare e delicato per l'impossibilità di fare stime oggettive sulle riserve di petrolio. Queste ultime sono spesso maggiorate dalle compagnie petrolifere per aumentare il valore delle proprie azioni. Un secondo punto critico riguarda il petrolio non convenzionale la cui estrazione risulta essere molto più difficile e dispendiosa in termini energetici. Un fatto abbastanza allarmante è che le scoperte di giacimenti hanno raggiunto il loro picco nel 1960. Da allora sono in declino e dal 1985 si consuma più petrolio di quanto ne venga scoperto.

Un primo effetto che tutta la popolazione mondiale ha avvertito è stato il costante e consistente aumento dei prezzi a partire dal 1999 anche se in parte è stato determinato dalle delicate relazioni internazionali che hanno visto coinvolti i paesi del Medio Oriente.

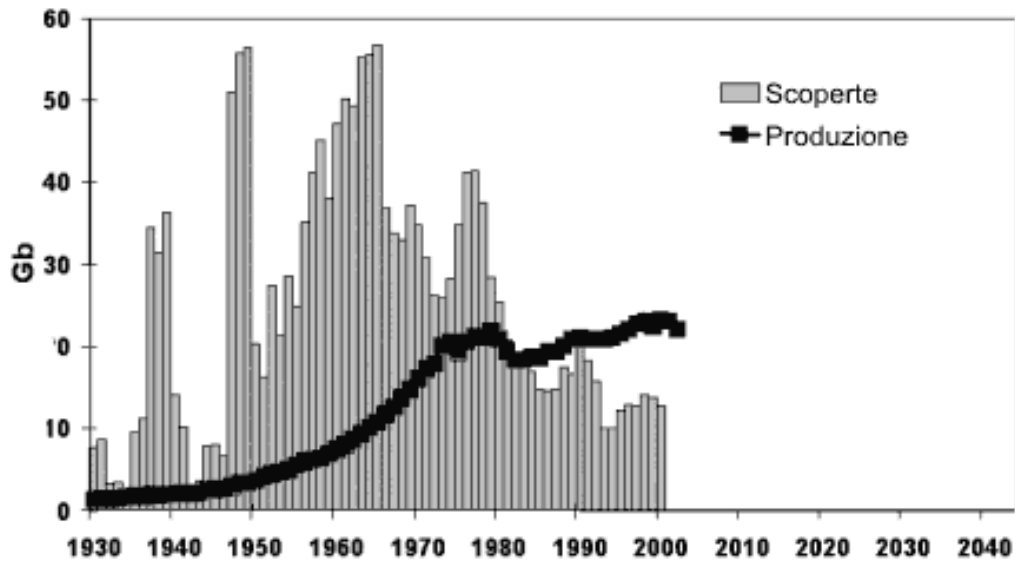


Figura 2 Grafico che mette in relazione scoperte e consumi di petrolio

I motori a combustione interna rappresentano, ad oggi, l'unica tecnologia sufficientemente matura per rispondere ai requisiti richiesti dall'autotrazione e, nonostante negli ultimi anni la tecnologia abbia permesso notevoli miglioramenti in termini di prestazioni e consumi, il contributo alle emissioni mondiali derivanti da questa voce non è diminuita.

I mezzi di trasporto rappresentano una delle principali fonti di consumo di combustibili fossili con circa il 22% del totale ed in particolare la sola componente del trasporto stradale incide per l'85% di tutta la categoria.

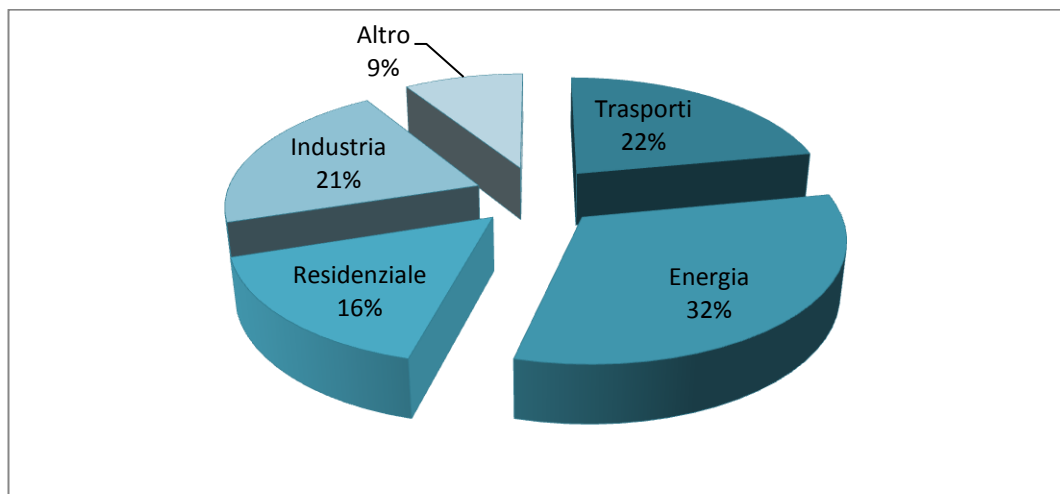


Figura 3 Grafico che mostra le quote di consumo del petrolio mondiale

L'Unione Europea ha già posto in essere una strategia per la riduzione delle emissioni di anidride carbonica, particolato e monossido di carbonio. Altri accordi sono stati presi dalle associazioni dei costruttori come ACEA (Associazione dei costruttori di autoveicoli europei) e JAMA (Japan Automobile Manufacturers Association). Grazie a questi accordi, nel 2012, si dovrebbe raggiungere l'obiettivo di limitare l'emissione media di CO₂ a 120g/km e quindi di raggiungere un consumo medio di 5,8 di benzina o 5,25 litri di gasolio per percorrere 100km.

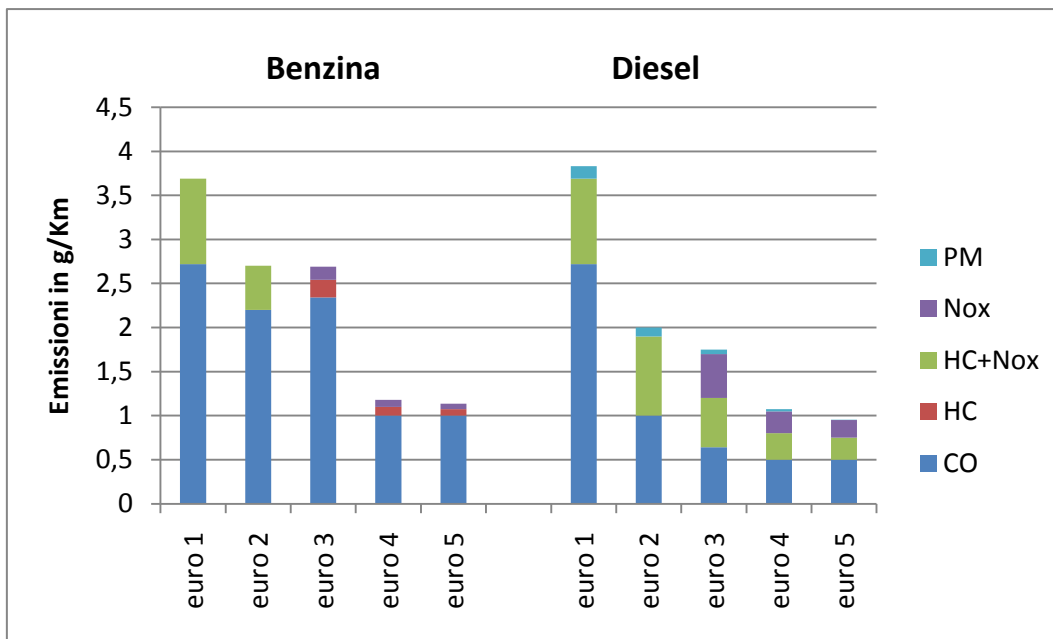


Figura 4 Andamento emissioni limite stabilite dalle normative europee

I progressi registrati fino ad'ora, tuttavia, non sono sufficienti a rientrare, per esempio, nei limiti stabiliti dal protocollo di Kyoto e soprattutto, non possono liberare il settore dei trasporti dalla forte dipendenza dal petrolio.

Negli ultimi anni si sta quindi guardando ad una nuova tecnologia che riesce a soddisfare i requisiti richiesti dalla trazione in modo analogo al motore a combustione interna: la trazione elettrica. In questo settore si stanno diffondendo i veicoli ibridi, ovvero quei veicoli che accoppiano un motore a combustione interna e uno elettrico per migliorare il rendimento complessivo. È evidente che questa non potrà essere la soluzione definitiva. Per questo ci si è prima concentrati prima su veicoli a batterie e poi in maniera sempre

maggiore ai veicoli a celle a combustibile. Quest'ultimi, in seguito ad alcuni sviluppi tecnologici, dovrebbero riuscire a garantire silenziosità, assenza di emissioni, buona autonomia e limitati tempi di rifornimento.

L'utilizzo delle celle a combustibile permette di aumentare il rendimento totale dei veicoli; si passa dagli attuali valori compresi tra 16-18% e 20-24% rispettivamente per i motori a benzina e diesel a valori compresi tra 27-41%. Il divario diventa ancora maggiore se le celle a combustibile vengono alimentate ad idrogeno.

In questo documento si cerca di definire lo stato dell'arte della tecnologia attuale e le idee base per lo sviluppo futuro.

Per prima cosa verranno analizzate le celle a combustibile che come eloquentemente indicato dal nome FCV (Fuel Cell Vehicle) o veicoli a celle a combustibile costituiscono il loro elemento base.

In seguito verrà analizzata la struttura degli FCV. In particolare verranno descritti vari componenti utilizzabili e varie soluzioni costruttive. Al termine saranno messe a confronto per dare una possibile via di sviluppo futuro.

Infine sarà data una rapida carrellata sui principali prototipi di veicoli a celle a combustibile già prodotti e circolanti su strada come veicoli di test.

2

Fuel cell

Una cella a combustibile (o fuel cell) è un dispositivo elettro-chimico che è in grado di erogare energia elettrica trasformando l'energia chimica contenuta nel combustibile. La conversione avviene senza l'impiego di un ciclo termico e quindi si riescono ad ottenere rendimenti buoni, non essendo condizionati dal ciclo di Carnot.

Il principio di funzionamento delle fuel cell è quindi analogo a quello delle batterie. Esiste però una differenza sostanziale tra i due dispositivi: mentre la batteria fornisce l'energia immagazzinata precedentemente al suo interno, la cella a combustibile fornisce energia elettrica consumando sostanze esterne ed è quindi in grado di operare ininterrottamente in presenza del combustibile.

2.1 Cenni storici

La prima cella a combustibile venne realizzata da William Robert Grove (1811-1896) un giurista e fisico inglese. Egli provò la reversibilità dell'elettrolisi dell'acqua e quindi costruì la prima cella. Dopo aver separato l'idrogeno e l'ossigeno dell'acqua per mezzo di un generatore di tensione, sostituì il generatore di tensione con un amperometro e effettivamente poté constatare che per effetto della ricombinazione dell'idrogeno e dell'ossigeno si poteva generare una piccola corrente.

L'idea venne trascurata per vari decenni e solo verso la fine del 1800 ripresero alcuni esperimenti per opera dei chimici britannici Ludwig Mond e Carl Langer; successivamente venne sviluppata la prima teoria matematica dal tedesco Friederich Wilhelm Ostwald.

Solo verso la metà del 1900 la NASA le utilizzò per generare energia elettrica a bordo delle navicelle spaziali. Lo sviluppo delle celle a combustibile è proseguito in campo militare mentre, negli ultimi decenni grazie alle nuove prospettive, la ricerca si è intensificata anche in campo civile soprattutto in Europa e negli USA.

2.2 principio di funzionamento

Una cella a combustibile è composta da due elettrodi porosi, anodo e catodo, separati da un elettrolita.

L'idrogeno che arriva all'anodo viene separato in ioni di idrogeno e elettroni. Gli ioni di idrogeno passano dall'anodo al catodo attraverso l'elettrolita mentre gli elettroni sono costretti ad andare verso il catodo attraverso un circuito elettrico esterno producendo una corrente. Al catodo l'ossigeno presente si ricombina con gli elettroni e gli ioni di idrogeno formando una molecola d'acqua.

Il processo provoca anche una produzione di calore che deve essere smaltito per garantire alla fuel cell di lavorare in condizioni ottimali.

La reazione chimica totale è esoergonica, ovvero avviene rilasciando energia. Nel nostro caso tale energia si presenta sotto forma di energia elettrica e

calore. In alcuni casi il calore può essere recuperato aumentando così il rendimento totale del sistema.

Ogni singola cella è in grado di produrre bassi valori di energia elettrica. Solitamente infatti si hanno differenze di potenziale di circa 0,6-0,7 volt e densità di corrente comprese tra 300 e 800 mA/cm².

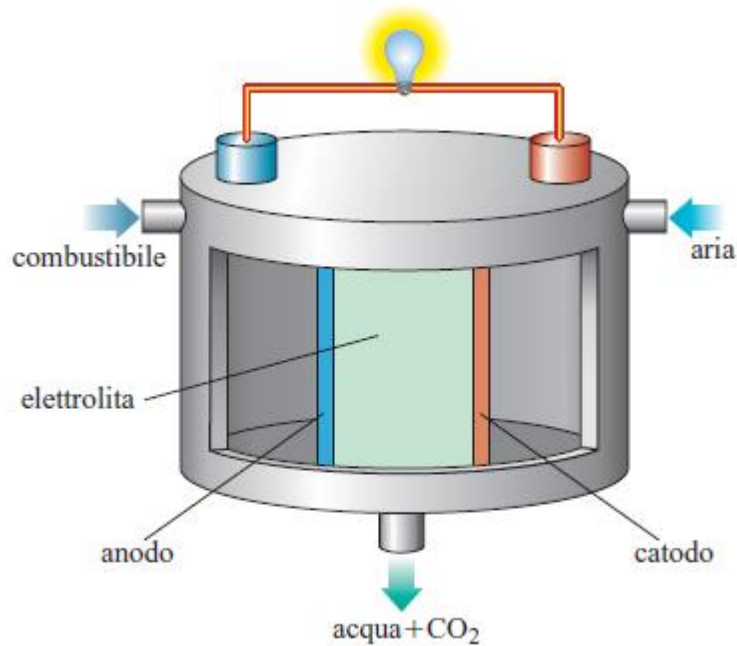


Figura 5 Struttura di una fuel cell

2.3 Tipi di fuel cell

Si possono classificare le fuel cell in base all'elettrolita; quest'ultimo infatti condiziona importanti parametri, per esempio: temperatura operativa, tipo di ioni e direzione di diffusione, materiali costruttivi, gas reagenti, modalità di smaltimento dei prodotti della reazione, resistenza meccanica e durata della cella. In base a questa classificazione si hanno:

- **Celle alcaline** (AFC, Alkaline Fuel Cell): l'elettrolita impiegato è una soluzione acquosa di idrossido di potassio (KOH) con una concentrazione del 35÷50% o del 85% rispettivamente per celle che funzionano a 60÷120 °C e a 220°C. Gli elettrodi sono composti da nichel e i catalizzatori di platino quindi si richiede idrogeno molto puro; lo ione è OH⁻. Per un corretto funzionamento è indispensabile che sia il combustibile che l'aria utilizzata siano privi di CO₂. L'efficienza è

elevata e può arrivare fino al 70% nelle condizioni di piena potenza; tuttavia il costo elevato e la durata limitata le rendono inadatte per la produzione su larga scala. Sono state utilizzate dalla NASA e in campo militare; ad oggi non ci sono programmi di sviluppo.

- **Celle ad elettrolita polimerico** (PEMFC, Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell): l'elettrolita è un polimero, il più usato è il nafion®; gli elettrodi sono realizzati in grafite e i catalizzatori sono di platino per questo è richiesto idrogeno molto puro come combustibile. Di recente si è scoperto che le quantità di platino da utilizzare può essere ridottissima favorendo la riduzione dei costi. Per temperatura di utilizzo, compresa tra 70 e 100°C, dimensioni e semplicità costruttiva sono le più adatte ad essere applicate nei trasporti. Si possono realizzare impianti da 1÷75 kW per impiego mobile e fino a 250 kW per applicazioni statiche.
- **Celle ad acido fosfoico** (PAFC, Phosphoric Acid Fuel Cell): utilizzano un elettrolita liquido composto da acido fosforico con concentrazione pari all'85%. Gli elettrodi sono di grafite, il combustibile è l'idrogeno, l'ione è H⁺ e infine i catalizzatori sono di platino perciò anche in questo caso è richiesto idrogeno molto puro. Per aumentare la velocità di reazione la temperatura di funzionamento è di circa 200°C e il rendimento elettrico è compreso tra il 40 e il 45%. Possono essere impiegate in impianti di cogenerazione e in questo caso l'efficienza sale al 70%. Rappresentano le celle tecnologicamente più affidabili e sono già impiegate in vari impianti statici con potenze nell'ordine delle centinaia di kW; si stanno sperimentando con successo impianti nell'ordine dei MW.
- **Celle a carbonati fusi** (MCFC, Molten Carbonate Fuel Cell): l'elettrolita è composto da una miscela di carbonati, tipicamente litio e potassio, mentre i due elettrodi sono composti da una base di nichel. Per garantire la fusione dell'elettrolita la temperatura di esercizio è di

circa 650°C. Il rendimento elettrico è compreso tra il 50 e il 60%. Data l'elevata temperatura di funzionamento si prestano molto bene per essere utilizzate in applicazioni statiche e in cogenerazione; in questo modo il rendimento sale all'80%.

- **Celle ad ossidi solidi** (SOFC, Solid Oxide Fuel Cell): l'elettrolita è un ossido solido metallico; di norma, viene impiegato l'ossido di zirconio. Per garantire una buona conducibilità dell'elettrolita le temperature di esercizio sono comprese tra 600 e 1000°C. Come combustibili possono essere utilizzati idrogeno, metano o ossido di carbonio. Sono la tipologia di celle alla quale la ricerca sta dedicando le maggiori risorse perché presentano una relativa semplicità costruttiva con rendimenti pari ad almeno il 60% per potenze di almeno 100kW. Grazie alla loro elevata temperatura di utilizzo sono molto indicate per utilizzi in cogenerazione con rendimenti del 90%.
- **Celle a metanolo diretto** (DMFC, Direct Methanol Fuel Cell): sono abbastanza recenti e come le PEMFC utilizzano un elettrolita polimerico. In questa tipologia di celle non è richiesto nessun tipo di reforming in quanto l'anodo catalizzatore estrae direttamente l'idrogeno dal metanolo. Hanno dimensioni molto ridotte (pochi centimetri) e per questo sono adatte per l'alimentazione di apparecchi portatili.

Tipo fuel cell	Ione	Temperatura operativa	Applicazioni
AFC	OH ⁻	60-220°C	Missioni spaziali e campo militare
PEMFC	H ⁺	70-100°C	Veicoli e piccole unità statiche
PAFC	H ⁺	~200°C	Generazione statica già in uso
MCFC	CO ₃ ²⁻	~650°C	Unità di cogenerazione statica
SOFC	O ²⁻	600-1000°C	Unità di cogenerazione statica
DMFC	H ⁺	20-90°C	Alimentazione dispositivi elettronici portatili

Tabella 1 Riassunto caratteristiche tipi fuel cell

2.4 PEMFC

Le attività di ricerca riguardanti le fuel cell nel settore dei trasporti hanno avuto un'accelerazione negli ultimi vent'anni. Dopo aver seguito diverse strade percorribili e aver creato i primi prototipi, tutti i costruttori hanno capito che, per avere i risultati migliori, era necessario impiegare le celle a combustibile ad elettrolita polimerico. Questa scelta è dovuta al fatto che queste fuel cell meglio soddisfano i requisiti richiesti, infatti:

- hanno una bassa temperatura di funzionamento ($70\div 100^{\circ}\text{C}$);
- assenza di problemi di corrosione presenti nelle celle a elettrolita liquido;
- presentano elevate potenza specifica ($0,3\div 1 \text{ W/cm}^2$) e densità di energia;
- si avviano in tempi ridotti (circa un minuto);
- presentano una buona semplicità costruttiva.

Ovviamente accanto ai vantaggi le PEMFC presentano anche alcuni svantaggi dovuti principalmente alla bassa temperatura di esercizio, tra i quali:

- necessitano di combustibile puro, con ridottissima presenza di CO;
- elettrodi più sofisticati, che favoriscano la velocità delle reazioni;
- necessitano di catalizzatori di platino.

2.4.1 Struttura della cella

La struttura di una PEMFC segue lo schema generale presentato in Figura 1, quindi saranno presenti due elettrodi, l'anodo in cui avviene l'ossidazione dell'idrogeno e il catodo in cui avviene la riduzione separati da una membrana polimerica. Questi tre elementi costituiscono il MEA (Membrane Electrode Assembly).

Anodo e catodo sono costituiti da più elementi. Per prima cosa si individua una struttura di supporto che deve garantire la resistenza meccanica della cella. Questo elemento non deve avere solo buone caratteristiche meccaniche ma deve presentare buona conducibilità ed elevata porosità per

garantire una sufficiente velocità di reazione. Questo strato prende il nome di carbon cloth o carbon paper. Sullo strato appena descritto vengono successivamente depositati prima uno strato composto da una miscela di carbone e PTFE e in seguito uno strato di catalizzatore. A questo punto l'elettrodo viene pressato sulla membrana polimerica.

Un altro procedimento costruttivo prevede di costruire la cella partendo dalla membrana polimerica aggiungendole varie componenti necessarie; tuttavia le caratteristiche del MEA sono le stesse e non viene influenzato il modo di utilizzo della fuel cell.

Il miglior catalizzatore sia per l'anodo che per il catodo è il platino e nelle prime PEMFC sperimentali era utilizzato con un contenuto di 28 mg/cm². Negli ultimi anni l'uso di platino si è ridotto in maniera esponenziale fino a passare a 0,2 mg/cm². Con tale concentrazione, contrariamente a quanto accadeva inizialmente, il platino non ha una grande incidenza nei costi.

La membrana polimerica è solitamente composta da materiali perfluorosolfonici e sono prodotti da varie aziende. La membrana che fa parte di questa categoria ed è la più diffusa e la più conosciuta è sicuramente il politetrafluoroetilene solfonato o Nafion® prodotto dalla Dupont introdotta negli anni 60.

In condizioni di temperatura di normale funzionamento della cella e in condizioni di idratazione ideali, cioè quelle che ottimizzano la conduzione protonica, queste membrane presentano una conducibilità protonica di circa 0.1 S/cm e una resistenza per unità d'area di circa 0.05 Ω/cm². Il Nafion® si presenta per lo più in due varianti, il Nafion 115® che ha uno spessore di 125µm e il Nafion 112® che ha uno spessore di 50µm. In generale si può affermare che all'aumentare dello spessore aumenta la resistenza meccanica ma diminuisce la permeabilità protonica e viene resa più difficile l'idratazione.

Sono in fase di sperimentazione membrane rinforzate con uno spessore di soli 30µm e in grado di funzionare a temperature maggiori di quelle attuali

per rendere accettabili valori di impurità nel combustibile superiori a quelli attuali.

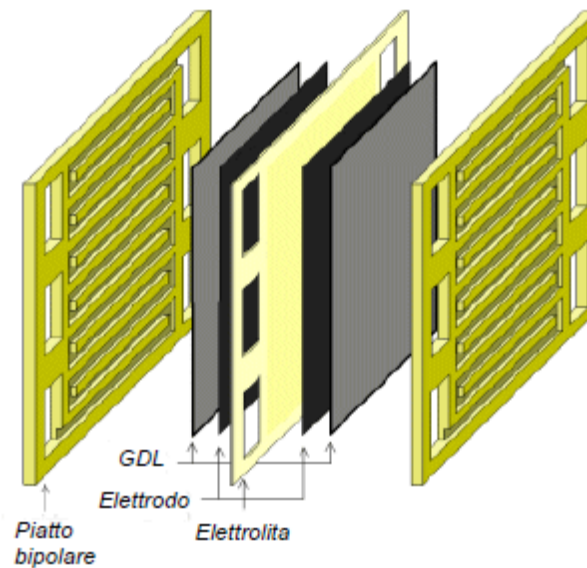
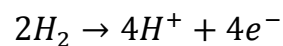


Figura 6 Struttura PEMFC con in evidenza il MEA

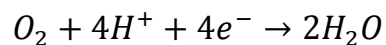
2.4.2 Reazioni chimiche

Analizziamo ora in dettaglio la reazione chimica che avviene all'interno di una PEMFC. Per far ciò dividiamo in due la reazione chimica completa.

Nell'anodo, come detto in precedenza, l'idrogeno si ionizza, creando elettroni e ioni di idrogeno ovvero protoni.



Nel catodo l'ossigeno presente reagisce con gli elettroni che arrivano dall'anodo e i protoni che arrivano dall'elettrolita



È importante notare che per fare in modo che le reazioni chimiche siano bilanciate è necessario avere due molecole di idrogeno per ogni molecola di ossigeno ed inoltre si devono tenere separate le due zone altrimenti non si avrebbe una corrente elettrica.

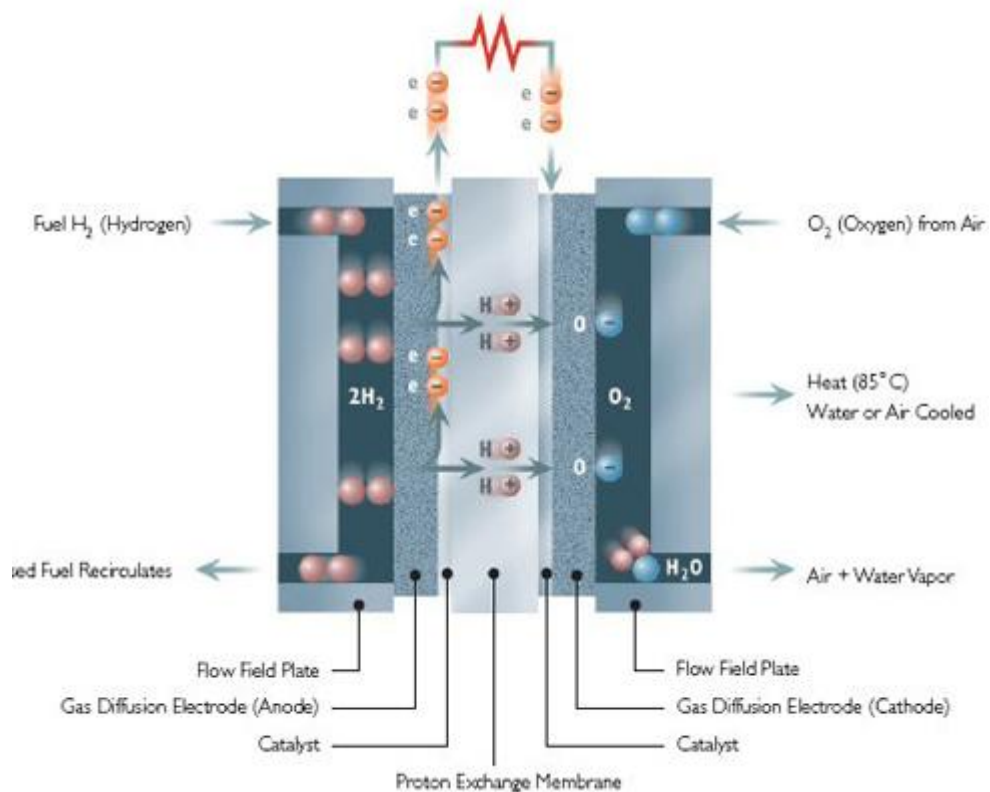


Figura 7 Dettaglio funzionamento PEMFC

2.4.3 Stack

Come già detto in precedenza la tensione a carico fornita da ogni singola fuel cell è di circa 0.7 V. Questo significa che per ottenere la tensione desiderata è necessario connettere molte celle a combustibile in serie. Connettendo l'anodo di ogni cella con il catodo della seguente si ottiene uno stack di celle.

I requisiti che devono essere soddisfatti da un buon sistema di interconnessione sono i seguenti:

- struttura semplice, facile da lavorare ed assemblare;
- piccola resistenza elettrica di interconnessione tra le celle;
- fornitura efficace dei reagenti ai convogliatori di cella;
- separazione dei reagenti di due celle contigue;
- efficace smaltimento del calore;

- rimozione acqua prodotta;
- sigillatura affidabile.

Il sistema più usato che soddisfa tali requisiti è il sistema di interconnessione attraverso piatti bipolari. I piatti bipolari possono essere realizzati con grafite, resine a base di carbone oppure con materiali compositi di grafite e metallo. I costi di realizzazione dei piatti si dividono equamente tra costo delle materie prime e costi di lavorazione; il costo dei piatti incide per il 70% del costo totale del sistema.

Nella progettazione dei piatti bipolari si devono massimizzare resistenza meccanica e uniformità dei gas reagenti mentre deve essere minimizzata la resistenza. Intuitivamente si nota che ognuno di questi parametri non può essere aumentato senza influire sugli altri, per esempio: per aumentare la resistenza meccanica e diminuire la resistenza elettrica è necessario produrre un piatto con meno intagli possibile mentre per garantire una fornitura uniforme ed efficace dei reagenti è necessario avere un numero sufficiente di incisioni e con dimensioni opportune.

Un'altra importante caratteristica che deve essere posseduta da un piatto bipolare è lo spessore sottile in quanto i piatti bipolari costituiscono in pratica tutto il volume dello stack dato che lo spessore del MEA è inferiore al millimetro.

In base alle necessità si possono scegliere diverse geometrie di piatto bipolare come mostrato nella seguente figura. Attualmente la geometria più utilizzata negli stack di grandi dimensione è quella a serpentina mentre si preferisce utilizzare la geometria a canali paralleli negli stack modesti.

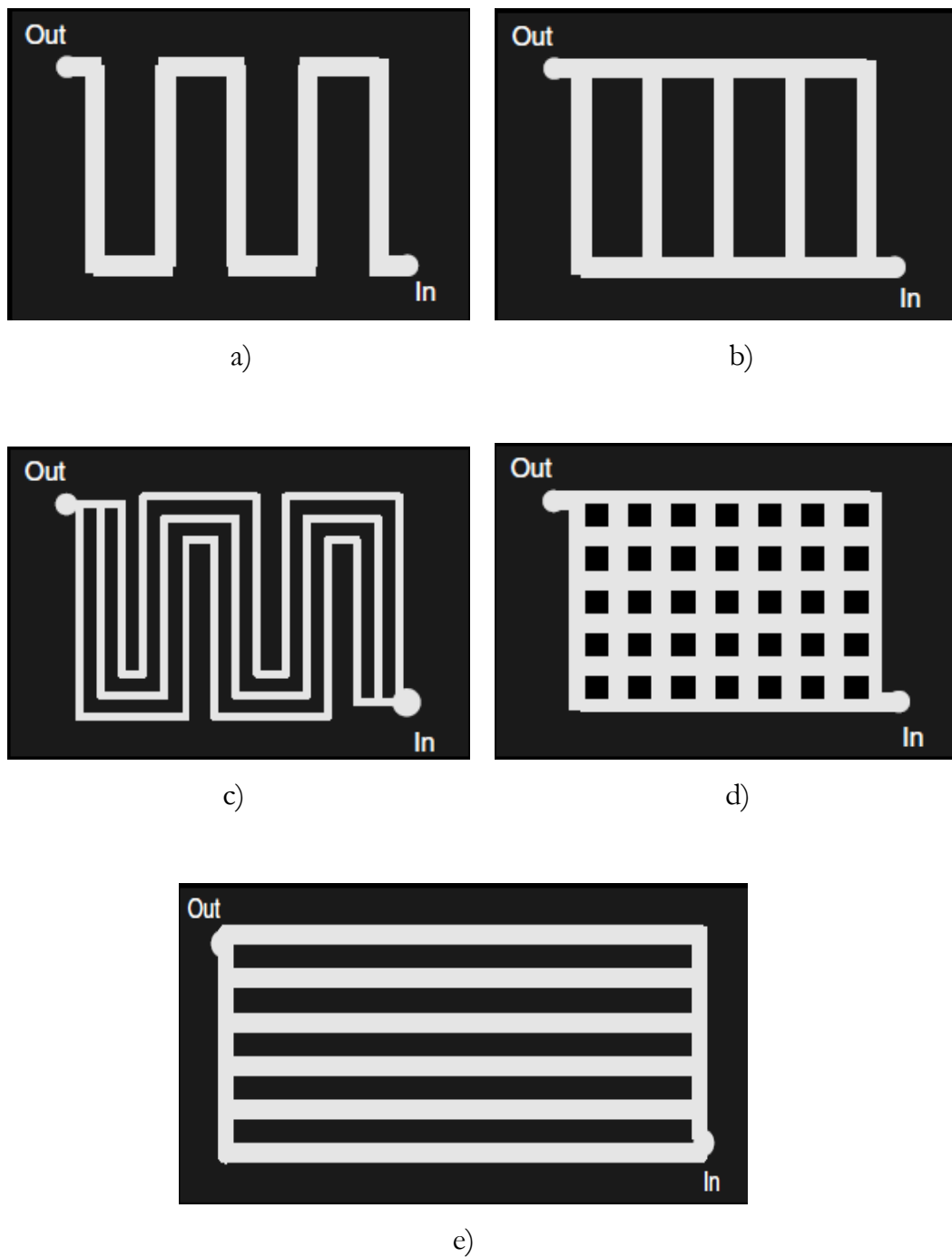


Figura 8 Esempio di differenti disegni configurazione di piatti bipolari: a) serpentina, b) paralleli, c)serpentine parallele, d)griglia, e) paralleli lunghi

2.4.4 Caratteristica esterna e rendimenti

La massima energia ottenibile da una cella a combustibile è rappresentata dalla variazione dell'energia libera di Gibbs relativa alla reazione chimica che avviene all'interno della cella stessa. La variazione di energia è espressa dalla relazione:

$$\Delta G = -nFE_{rev}$$

Con n numero di elettroni che partecipano alla reazione, F costante di Faraday ed E_{rev} potenziale reversibile di cella. Si può dimostrare che, in una fuel cell che produce acqua in forma liquida, il valore massimo della tensione reversibile di cella è:

$$E_{revMAX} = 1,229 V$$

e tale valore viene raggiunto quando la corrente circolante nel circuito elettrico è nulla.

Durante il funzionamento comune la corrente elettrica circolante è ovviamente diversa da zero. In questa situazione la tensione di cella è sempre minore di E_{revMAX} in quanto ci sono perdite irreversibili nel funzionamento. Le perdite, che sono spesso chiamate polarizzazioni, possono essere suddivise in tre diverse categorie:

- **Polarizzazione di attivazione:** è il termine che rappresenta le perdite dovute alla tensione da fornire alla cella perché s'innesci la reazione chimica. Il valore della barriera di tensione dipende dalla velocità con cui avviene la reazione ed è tanto maggiore quanto più lenta è la reazione.

Il valore della tensione di cella è quindi dato da:

$$V = E_{revMAX} - \eta_{ATT}$$

dove η_{ATT} rappresenta la tensione di soglia. La tensione di soglia η_{ATT} è esprimibile esplicitamente attraverso l'equazione di Tafel:

$$\eta_{ATT} = A \ln \frac{j}{j_0}$$

nella quale A è una costante che tiene conto della velocità della reazione, j è la densità di corrente e j_0 è la densità di corrente di scambio¹. Nel caso delle reazioni elettrochimiche nelle PEMFC η_{ATT} può variare tra 50÷100 mV.

- **Polarizzazione ohmica:** rappresenta le perdite che causano una caduta di tensione ai capi della cella dovute alla resistenza che presentano le interconnessioni e soprattutto l'elettrolita nei confronti del flusso di elettroni. La caduta di tensione risulta essere proporzionale alla densità di corrente, per questo motivo queste perdite vengono contraddistinte con il nome di polarizzazione ohmica o, talvolta, perdite resistive. La relazione che lega la caduta di tensione e la densità di corrente è la seguente:

$$\eta_{OHM} = jR$$

dove R è la resistenza specifica per unità d'area e j è la densità di corrente.

- **Polarizzazione di concentrazione:** è causata dal fatto che, attorno all'elettrodo, l'idrogeno non è presente in concentrazione costante. Questo fenomeno si verifica perché i reagenti vengono consumati molto rapidamente e a causa della limitata porosità degli elettrodi che non consentono una adeguata diffusione dei gas. Assumendo che la velocità della reazione chimica sia molto elevata, situazione in cui si possono trascurare le perdite dovute alla polarizzazione di attivazione, le perdite per polarizzazione di concentrazione si possono esprimere come:

$$\eta_{CONC} = C \ln \left(\frac{j_L}{j_L - j} \right)$$

con C coefficiente di concentrazione e j_L massima densità di corrente ottenibile.

¹ è la densità di corrente che corrisponde all'assenza di fenomeni elettrolitici e in condizioni di sovratensione nulla.

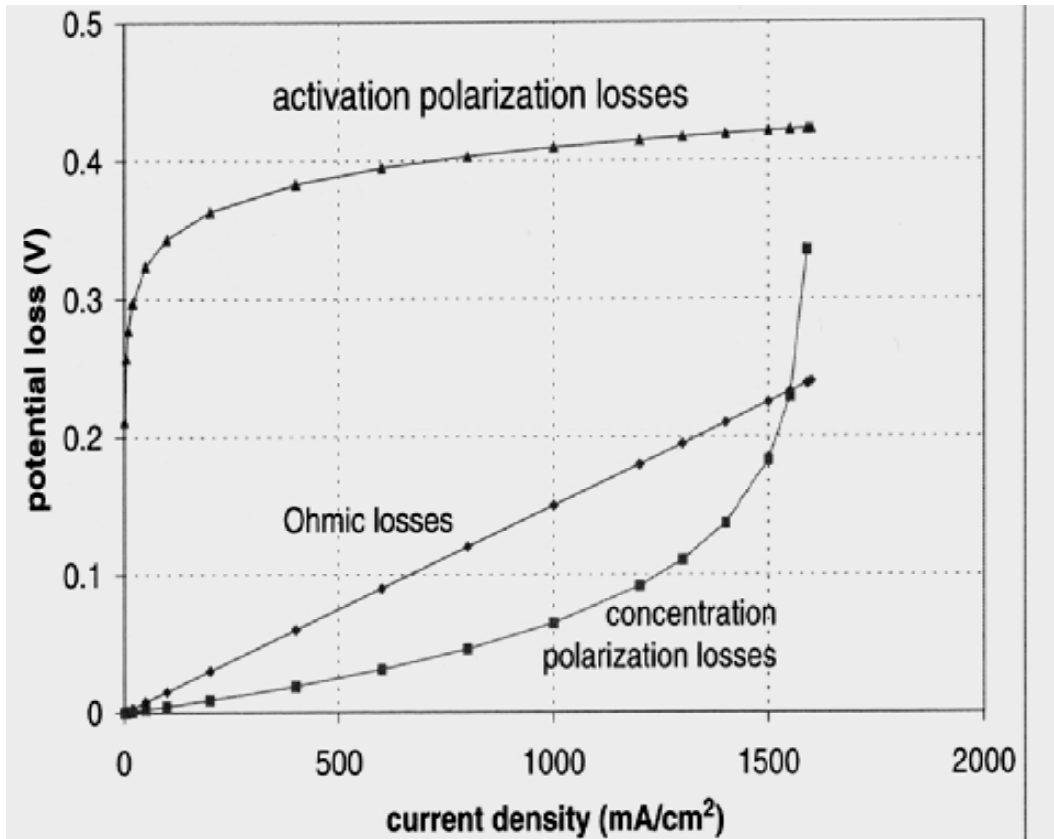


Figura 9 Rappresentazione delle cadute di tensione dovute alle varie polarizzazioni in funzione della densità di corrente

Per ottenere la caratteristica esterna si possono quindi togliere dalla tensione a vuoto le cadute di tensione dovute alle varie polarizzazioni, che come evidenziato dalle relazioni precedenti, sono funzioni della densità di corrente. In questo modo si ha che la tensione di cella può essere espressa nel seguente modo:

$$V_{CELL} = E_{rev_{MAX}} - \eta_{ATT} - \eta_{OHM} - \eta_{CONC}$$

ottenendo il grafico sottostante.

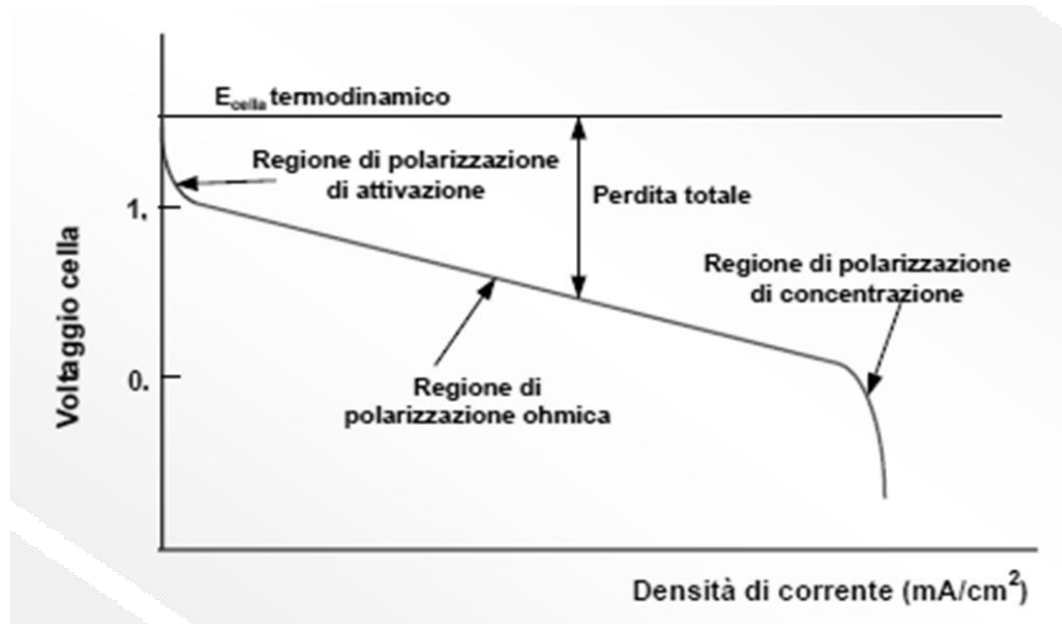


Figura 10 Curva caratteristica tensione/densità di corrente

Per valutare il rendimento di una cella a combustibile conviene inizialmente analizzare il rapporto tra energia utile e l'energia impiegata nella reazione chimica. L'energia utile è espressa dall'energia libera di Gibbs ΔG mentre la seconda è rappresentata dall'entalpia di reazione ΔH . Nelle condizioni standard, ovvero, 25°C (298 K) e 1 atmosfera di pressione si ha che utilizzando come reagenti l'idrogeno e l'ossigeno:

$$\eta_{rev} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = 0,83$$

La precedente relazione si riferisce a un processo ideale e quindi non rappresenta l'effettiva efficienza che si può ottenere in sistemi reali ma ci permette di affermare che il processo chimico che sta alla base delle fuel cell ha rendimenti teorici molto superiori al ciclo di Carnot che invece sta alla base dei motori a combustione interna. Imponendo infatti una condizione di utilizzo tra 400°C e 50°C (673 K- 323 K) si ha che:

$$\eta_{carnot} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} = \frac{673 - 323}{673} = 0,52$$

In un sistema basato sull'utilizzo di fuel cell vanno però considerate altre perdite; esse sono le perdite elettriche interne a carico e le perdite derivanti dal processo di alimentazione del sistema.

Le perdite elettriche interne a carico possono essere esplicitate come rapporto tra potenza utile P_u e potenza generata dalla cella P_g :

$$\eta_{el} = \frac{P_u}{P_g} = \frac{v(i) \cdot i}{E \cdot i} = \frac{v(i)}{E}$$

ovvero attraverso il rapporto tra la tensione a carico e quella a vuoto. Analizzando la Figura 6 si può facilmente dedurre che η_{el} è tanto maggiore quanto minore è la condizione di carico.

Le perdite di combustibile sono dovute al fatto che è necessario fornire al sistema più idrogeno di quello che realmente richiede ovvero, non tutto il combustibile fornito viene trasformato dalla reazione chimica. Introducendo un fattore di sovra-alimentazione λ si ha che:

$$\eta_{comb} = \frac{1}{\lambda}$$

A questo punto per determinare il rendimento totale devono essere considerati tutti i fattori:

$$\eta_{eff} = \eta_{rev} \cdot \eta_{el} \cdot \eta_{comb} = \frac{\Delta G}{\Delta H} \frac{v(i)}{E} \frac{1}{\lambda}$$

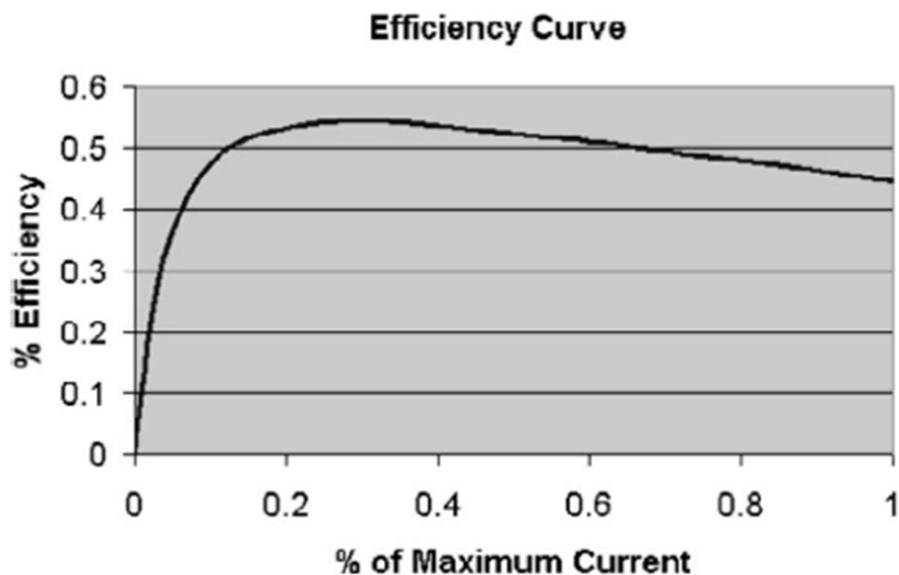


Figura 11 Curva di rendimento di una fuel cell in funzione della percentuale di carico di corrente

Considerando le condizioni di funzionamento ideali, reversibilità della reazione chimica e ponendo $\lambda = 1$, ovvero tutto l'idrogeno fornito viene

trasformato dalla reazione chimica, si ha che il rendimento massimo ottenibile da una cella a combustibile è:

$$\eta_{MAX} = \frac{0,83 \cdot v(i)}{E_{revMAX}} = \frac{0,83 \cdot v(i)}{1,229} \cong 0,675 \cdot v(i)$$

Il rendimento di una PEMFC è strettamente dipendente non solo dal carico di corrente ma anche dalle condizioni di temperatura e pressione.

Le celle che lavorano ad una temperatura maggiore hanno rendimenti migliori. Questo avviene anche se la tensione attesa è più alta nelle fuel cell che lavorano a temperatura più bassa in quanto le perdite per polarizzazione ohmica diminuiscono all'aumentare della temperatura. Un secondo vantaggio derivante dalla elevata temperatura di funzionamento è una riduzione dei problemi di trasporto dei reagenti riducendo la polarizzazione di concentrazione. Altri vantaggi non meno importanti sono la riduzione delle polarizzazioni di attivazione e un aumento della tollerabilità alle impurezze presenti nei reagenti.

L'aumento della pressione di funzionamento porta ad ottenere un miglioramento delle prestazioni. In particolare, per l'elevata pressione a cui si trovano i reagenti, viene ottimizzata la reazione chimica e vengono ridotte le polarizzazioni di cella. I principali difetti delle celle ad elevata pressione sono i costi di produzione e la necessità di trovare nuovi materiali che devono soddisfare requisiti di resistenza maggiori e transitori termici lunghi.

3

Architettura dei veicoli a fuel cell

I veicoli basati sull'utilizzo di celle a combustibile denominati anche FCV (Fuel Cell Vehicle) hanno una storia relativamente breve; infatti il primo prototipo venne realizzato dalla General Motors nel 1967. Era un veicolo che poteva trasportare fino a sei passeggeri che non venne mai utilizzato al di fuori dell'azienda per motivi di sicurezza. Solo nell'ultimo decennio le case automobilistiche hanno iniziato una consistente fase di ricerca e sviluppo in questo campo che ha portato alla realizzazione di diversi prototipi con caratteristiche sempre migliori.

Un tipico modello è rappresentato nella figura sottostante.

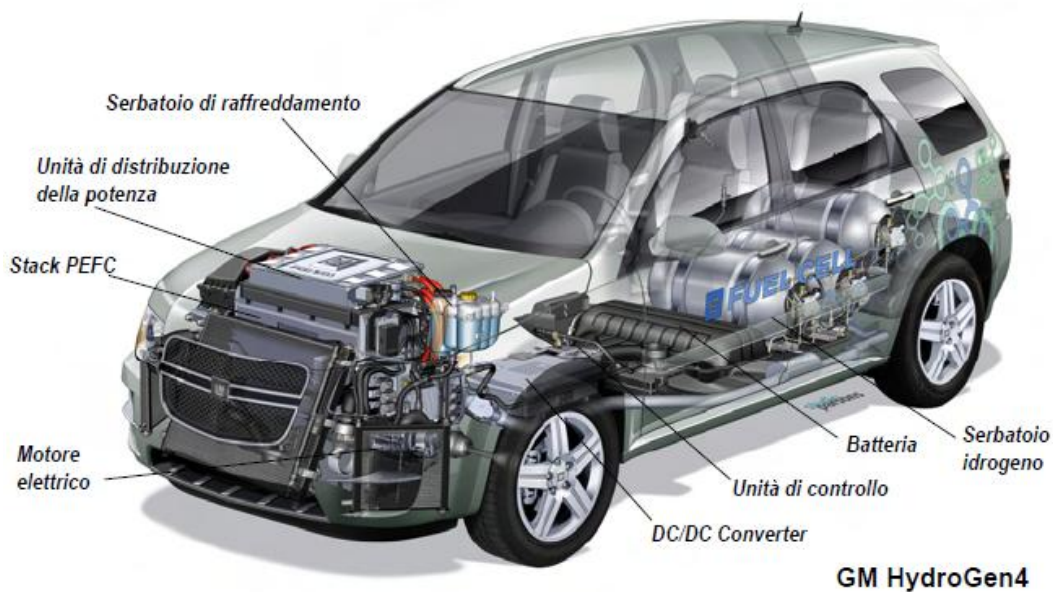


Figura 12 Componenti sistema per la propulsione veicolo a celle a combustibile

Si possono facilmente individuare due blocchi in cui si può dividere l'intero sistema. Il primo blocco comprende i dispositivi per immagazzinamento dell'idrogeno mentre il secondo comprende gli apparati che hanno il compito di generare l'energia meccanica e trasmetterla al veicolo ed è generalmente denominato Powertrain.

3.1 Sistemi di accumulo di idrogeno

Il problema di ottenere un soddisfacente accumulo di idrogeno nei veicoli è ancora lontano dall'essere risolto. In particolare si cerca di raggiungere l'obiettivo di avere un rapporto tra il peso dell'idrogeno e il peso del sistema di almeno il 6% e un costo del sistema che non superi il 120 €/KgH₂. Le difficoltà derivano dal fatto che l'idrogeno ha un elevato rapporto tra energia contenuta e massa ma una bassissima densità di energia riferita al volume e perché gli standard di sicurezza sono difficili da raggiungere se non con materiali pregiati e quindi costosi.

Ci sono varie soluzioni per accumulare l'idrogeno all'interno dei veicoli:

- **Idrogeno compresso:** l'accumulo in forma gassosa dell'idrogeno risulta essere la soluzione più semplice. Con l'introduzione di serbatoi a

350 e a 700 bar ci sono stati notevoli miglioramenti. Questi serbatoi infatti sono composti da un liner metallico o termoplastico rinforzato con fibra di carbonio, vetro ed aramidiche. Il risultato è che questi serbatoi riescono ad immagazzinare un'energia specifica di 1.2 kWh/Kg, pesano 3-4 volte meno dei primi serbatoi in acciaio e offrono una sufficiente sicurezza. Il problema principale risulta essere il costo che si aggira attualmente sui 2400-3300\$/KgH₂ e che potrebbe abbassarsi fino a 350÷600\$/KgH₂ tuttavia ancora molto lontano dai requisiti stabiliti.

- **Idrogeno liquido:** un secondo sistema di accumulo dell'idrogeno è in forma liquida alla temperatura di 22K (-251°C) in serbatoi criogenici. I serbatoi presentano un doppio rivestimento in lamiera d'acciaio all'interno dei quali è stato ricavato il vuoto per evitare trasmissioni di calore.

L'idrogeno in forma liquida è adatto soprattutto ai veicoli che utilizzano idrogeno direttamente come combustibile per motori a combustione interna mentre deve essere riscaldato per essere idoneo ad alimentare le fuel cell. Il condizionamento dell'idrogeno tuttavia non è un grosso problema e quindi i serbatoi criogenici potrebbero essere installati anche nei veicoli a celle a combustibile. Nei serbatoi più recenti le perdite per evaporazione corrispondono all'1% giornaliero e la densità di energia immagazzinata è di circa 6 kWh/Kg. Il principale svantaggio è che per liquefare l'idrogeno è necessario spendere circa il 30% del suo contenuto energetico contro il 4÷7% di energia da spendere nei serbatoi ad alta pressione.

- **Idruri:** questo sistema di stoccaggio utilizza il fatto che l'idrogeno può legarsi chimicamente a sostanze metalliche formando gli idruri; infatti raffreddando il sistema e aumentando la pressione sopra un livello di soglia l'idrogeno penetra all'interno del reticolo cristallino del metallo.

Per riottenere l'idrogeno puro è sufficiente abbassare la pressione e riscaldare il sistema.

I serbatoi adatti per l'uso automobilistico sono quelli che utilizzano idruri che hanno temperature di assorbimento comprese tra 20 e 90 °C. Questi sistemi raggiungono elevata densità di energia volumetrica(3,4 kWh/L) ma una ridotta densità gravimetrica ovvero 0,80 kWh/Kg.

- **Portatori di idrogeno:** sono serbatoi che contengono sostanze chimiche le cui molecole si legano chimicamente all'idrogeno, quali il metano e il metanolo.

Questi sistemi permettono avere densità gravimetrica di circa 4 kWh/Kg e volumetrica di 3,4 kWh/L e quindi abbastanza elevate in entrambi i casi. Il principale svantaggio è che per riottenere l'idrogeno puro sono necessari i reformer che aggiungono peso e ingombro all'interno del veicolo peggiorandone le caratteristiche.

3.2 Powertrain

Le case automobilistiche stanno concentrando i loro sforzi nel cercare di rendere equiparabili i costi, l'autonomia e la durata di vita dei nuovi FCV a quelli dettati dai veicoli convenzionali. Per questo motivo si sta lavorando sui sistemi di trazione dei veicoli che sfruttano le celle a combustibile. In realtà i nuovi veicoli sono veicoli ibridi in quanto oltre alle fuel cell possiedono anche un sistema di immagazzinamento dell'energia indicato con ESS (Energy Storage System).

L'ESS ha il compito di immagazzinare l'energia cinetica che viene recuperata in frenata e fornirla al sistema di propulsione quando c'è un picco nella richiesta di energia elettrica che non può essere soddisfatto dalle celle a combustibile. L'ESS può essere formato da batterie e/o supercondensatori.

Le batterie che presentano le caratteristiche migliori per essere utilizzate nei veicoli sono le batterie agli ioni di litio; hanno un'energia specifica compresa tra 50÷500 Wh/Kg e una potenza specifica di compresa tra 10 e 500 w/Kg. I processi di carica e scarica hanno una efficienza compresa tra il 75% ed il 90% e una durata variabile dalle 0,3 alle 3 ore; la durata di vita e le prestazioni di una batteria sono notevolmente condizionate dal numero di processi di carica e scarica eseguiti.

I supercondensatori invece hanno una minore energia specifica che è compresa tra 1 e 10 Wh/Kg ed una maggiore potenza specifica che è compresa tra 1000÷5000 W/Kg. I processi di carica e scarica hanno un'efficienza variabile tra l'85% e il 98% e una durata molto limitata, compresa cioè tra 0.3 e 30 secondi. Contrariamente a ciò che accade nelle batterie le caratteristiche degli ultracondensatori non degradano sensibilmente e in media si registra un calo della capacità del 20% dopo circa 500000 cicli.

Le possibili combinazioni di batterie e supercondensatori per la realizzazione dei sistemi di immagazzinamento dell'energia nei powertrain sono quindi tre:

- **Fuel cell – Battery:**
- **Ful cell – Ultracapacitor:**
- **Fuel cell – Battery – Ultracapacitor:**

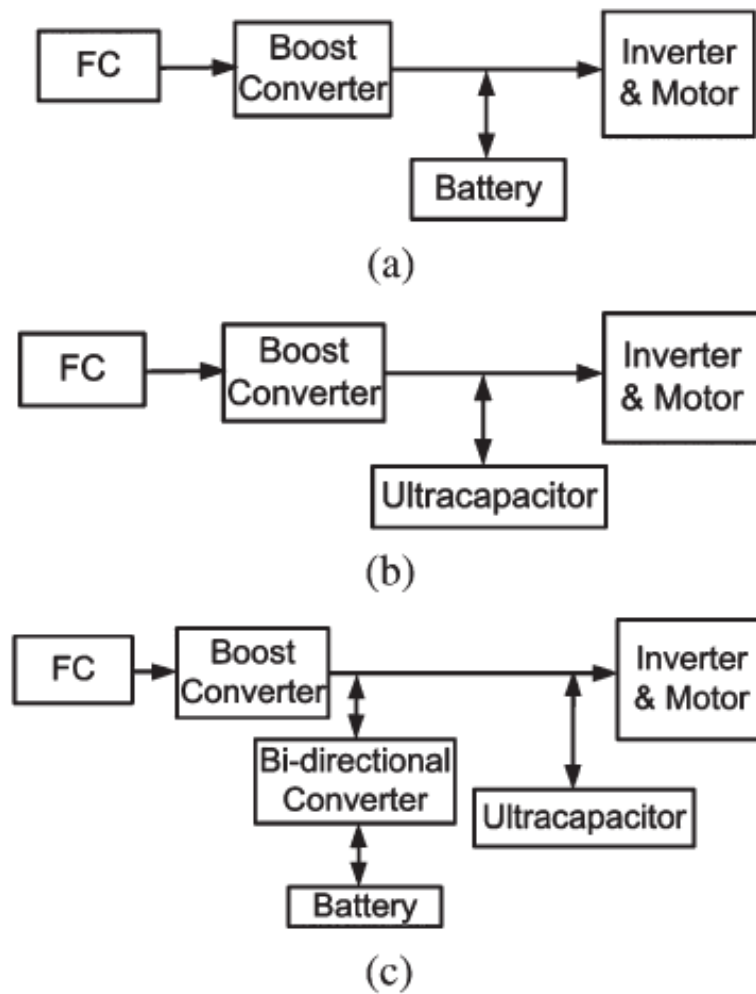


Figura 13 Rappresentazione schematica delle tre topologie

3.3 Comparazione dei sistemi

Gli studi dei sistemi necessari alla propulsione dei veicoli a celle a combustibile sono numerosi. In molti casi però questi hanno come scopo quello di massimizzare le prestazioni di una data tipologia. Utilizzando i risultati della ricerca eseguita sui vari sistemi è interessante invece studiare le performance dei vari sistemi a confronto.

3.3.1 Descrizione delle tipologie

Fuel cell – Battery Vehicle (FC_B)

In questa tipologia di powertrain le batterie accumulano l'energia recuperata in frenata e la forniscono in accelerazione quando l'energia richiesta dal sistema è elevata e le fuel cell non sono in grado di fornirla per intero.

L'analisi del sistema ha portato a definire alcune strategie di controllo per renderlo più efficace:

- per avere una migliore resa in termini chilometrici (fuel economy) le batterie vengono ricaricate utilizzando esclusivamente l'energia cinetica recuperata in frenata fino a quando lo stato di carica SOC (State of Charge) è inferiore al 98%; vengono ricaricate attraverso le celle a combustibile se l'SOC è inferiore al 50%;
- per impedire funzionamenti nella regione in cui il rendimento è bassissimo le fuel cell vengono utilizzate quando la corrente richiesta è superiore al 7,55% di quella massima.

Fuel cell – Ultracapacitor Vehicle (FC-UC)

In questo caso l'ESS è formato da una serie di supercondensatori. A causa della loro limitata capacità di immagazzinare energia anche a bassi carichi di corrente è necessario l'ausilio delle fuel cell che quindi opereranno nella regione a basso rendimento. Per ottenere i migliori risultati è necessario che ad alte velocità la tensione dei supercondensatori sia bassa per poter recuperare più energia possibile.

Fuel cell – Battery – Ultracapacitor Vehicle (FC-B-UC)

Il sistema risulta essere molto simile al sistema Fuel cell – Battery. I supercondensatori danno un supporto alle batterie nella fase di recupero e rilascio dell'energia. Questo sistema ha l'effetto di sfruttare appieno la proprietà dei condensatori di mantenere le proprie caratteristiche nel tempo aumentando la durata di vita delle batterie che sono sottoposte a un minor utilizzo. La strategia di controllo può essere riassunta nei seguenti punti:

- non c'è più il vincolo di avere i supercondensatori a bassa tensione quando il veicolo raggiunge velocità sostenute in quanto l'eventuale energia recuperata in eccesso può essere accumulata dalle batterie;
- l'energia da fornire in eccesso a quella prodotta dalle celle a combustibile proviene inizialmente solo dai supercondensatori; quando quest'ultimi raggiungono la tensione minima subentrano le batterie;
- anche in questo caso fuel cell vengono utilizzate quando la corrente richiesta è superiore al 7,55% di quella massima.

3.3.2 Simulazione

La simulazione dei diversi sistemi è basata sui primi 505 secondi del federal urban driving schedule (FUDS) per la valutazione della fuel economy espressa in miglia per gallone di benzina equivalente (mpgge); per la valutazione dell'accelerazione si è monitorato il tempo impiegato per passare da 0 a 60 mph (0 – 96,5 Km/h).

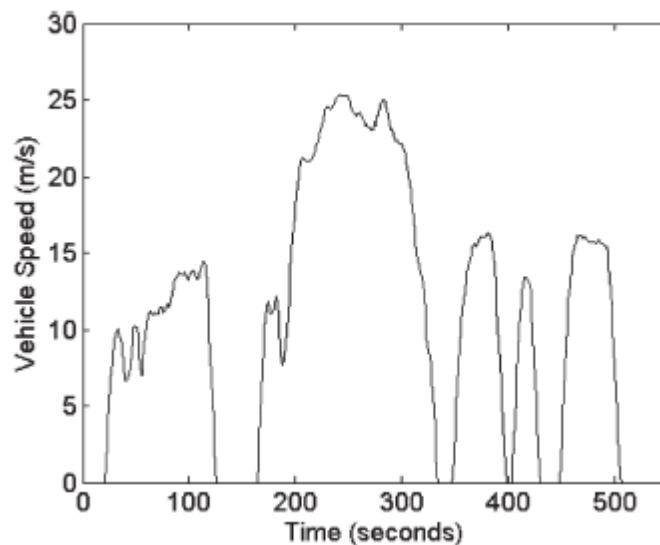


Figura 14 Primi 505 secondi dell'FUDS

Per legare tra loro le diverse variabili da considerare è stata considerata la seguente relazione:

$$F(\text{accel}, \text{mpgge}, \text{cost}) = (0,2 \cdot (1 - \text{accel})) + (0,45 \cdot \text{mpgge}) + \\ + (0,35 \cdot (1 - \text{cost}))$$

dove *accel*, *mpgge*, *cost* sono coefficienti compresi tra 0 e 1 che rappresentano i valori di accelerazione, fuel economy e costo.

Per massimizzare tale funzione si sono trovati dei risultati generali:

- Il migliore dimensionamento delle fuel cell al costo attuale di 4500 \$/kW è di circa 35 kW. La potenza ottimale sale a circa 40 kW se il costo è compreso tra 225÷400 \$/kW che invece è il costo che si dovrebbe raggiungere all'inizio della produzione di massa. Questo è facilmente spiegabile per l'elevato peso dato al costo e per il fatto che per avere un buon rendimento è consigliabile far lavorare le celle a combustibile a basso carico. Nel seguito verranno considerati un costo di 400\$/kW e una dimensione delle fuel cell di 40 kW.
- Il miglior numero di batterie da connettere in serie nel caso del sistema FC-B è 105 mentre è di 75 nel caso di FC-B-UC. Queste configurazioni forniscono rispettivamente 800 e 570 Wh di energia e 24,2 e 17,3 KW di potenza massima.
- Per quanto concerne i supercondensatori si è deciso di collegare in serie 27 gruppi di essi, ai capi di ognuno dei quali viene sviluppata una tensione di 15 V, per un totale di 405 V.

Con questi parametri sono stati ottenuti i risultati evidenziati dai grafici successivi nei quali si riporta anche il numero di stringhe di batterie e supercondensatori collegati in parallelo.

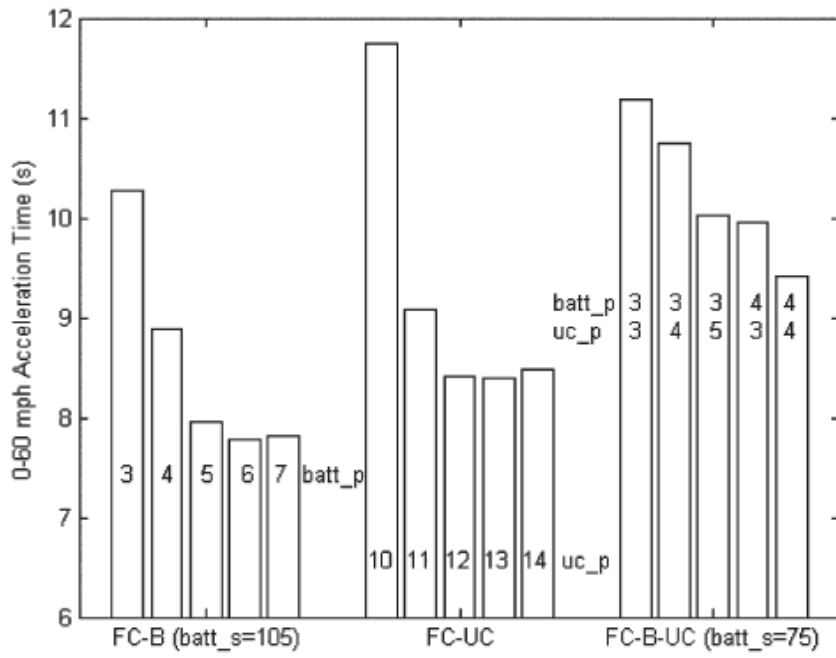


Figura 15 Tempi di accelerazione 0-60 mph

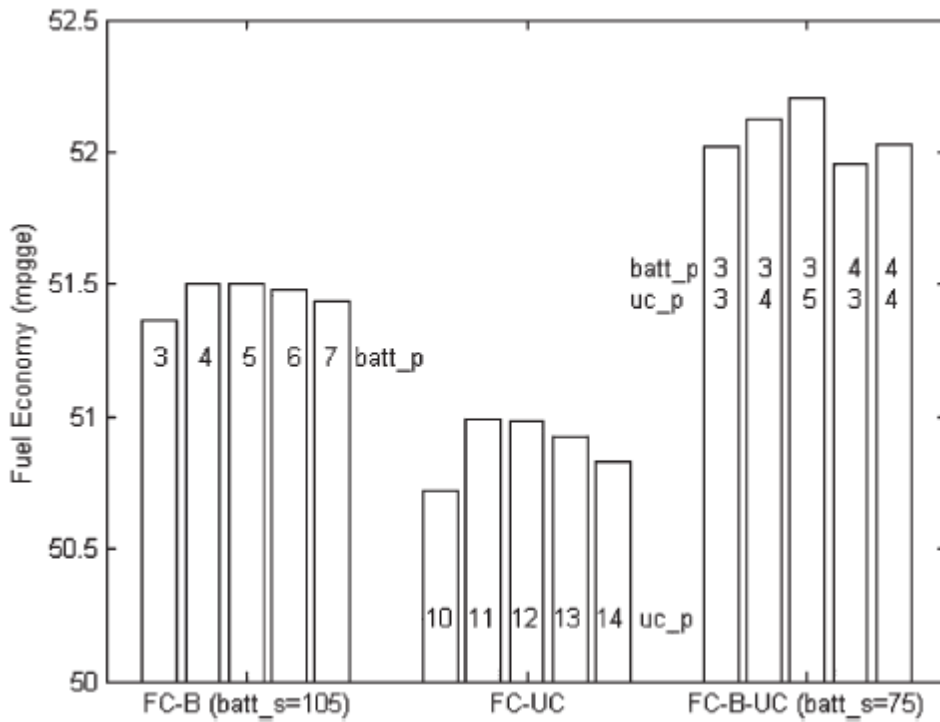


Figura 16 Confronto dei valori di fuel economy.

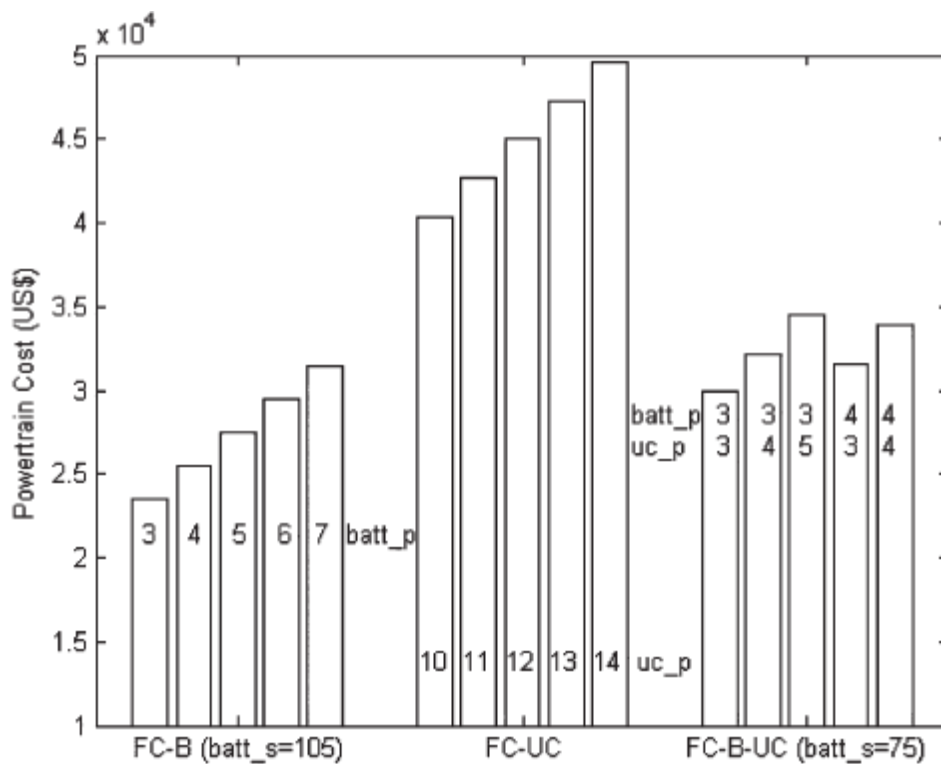


Figura 17 Confronto del costo dei differenti powertrain

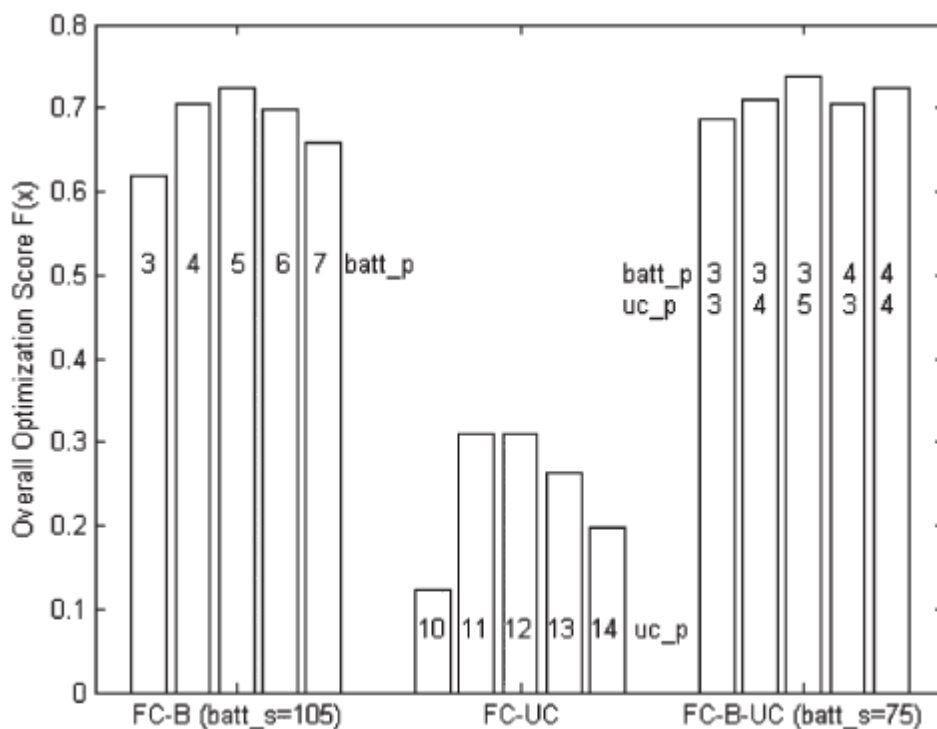


Figura 18 Valori della funzione F(accel,mpgge,cost)

La prima conclusione a cui si perviene è che per avere tempi di accelerazione in linea con quelli degli attuali veicoli per la tipologia di

powertrain FC-UC sono necessarie addirittura 11 stringhe in parallelo di supercondensatori. Questo ha come effetto di alzare in maniera spropositata costi e massa del sistema. Il peso elevato infine si traduce in consumi elevati di energia e quindi influisce negativamente nella fuel economy.

Per quanto concerne le altre due tipologie si hanno prestazioni simili e per sistemi equivalenti in termini di accelerazione e quindi di prestazioni sono stati costruiti due sistemi per analizzare meglio la situazione.

Vehicle Parameters (fc kW = 40)	Acceleration Time (s)	Fuel Economy (mpgge)	Cost (US\$)	ESS Cost Breakdown (US\$)
<u>FC-B</u> batt_s = 105 batt_p = 3	10.267	51.362	\$23468	<u>Batteries:</u> 6032
<u>FC-B-UC</u> batt_s = 75 batt_p = 4 uc_p = 2	10.161	51.792	\$29335	<u>Batteries:</u> \$5745 <u>Battery DC/DC:</u> \$1564 <u>Ultracapacitors:</u> \$4590

Tabella 2 Caratteristiche sistemi equivalenti FC-B FC-B-UC

Come si può notare la fuel economy è a vantaggio del sistema FC-B-UC; questo è dovuto alla miglior efficienza del sistema di ESS anche se il peso, dovuto ai componenti aggiuntivi, è nettamente superiore al sistema che utilizza solo le batterie come ESS. Sfortunatamente, ad una migliore fuel economy, si contrappone un costo nettamente superiore ovvero circa il 25% in più.

Un vantaggio mostrato in Figura 8 è che nel sistema FC-B-UC le batterie sono utilizzate in maniera molto minore rispetto al sistema FC-B con una conseguente maggiore durata.

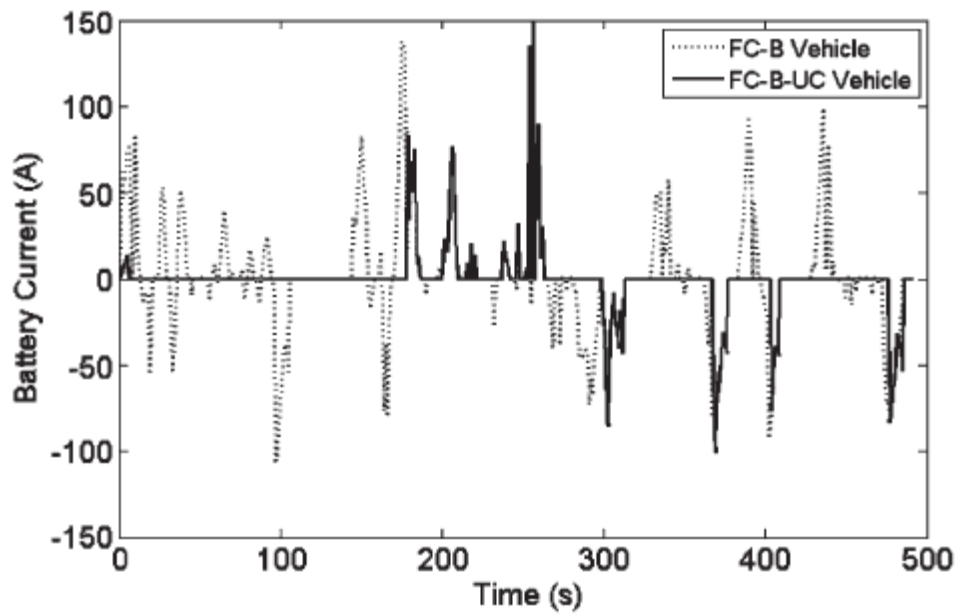


Figura 19 Corrente che interessa le batterie nel caso dei sistemi FC-B e FC-B-UC

I risultati appena esposti ci indicano quindi che, a parte la topologia FC-B, non c'è una netta differenza tra le altre due e che i vantaggi della FC-B-UC si contrappongono al maggior costo.

Di recente sono state proposte altre due varianti basate sulla topologia FC-B-UC che almeno teoricamente potrebbero spostare l'equilibrio a favore di quest'ultima.

Le due topologie presentate sono rappresentate in Figura 9 (b e c).

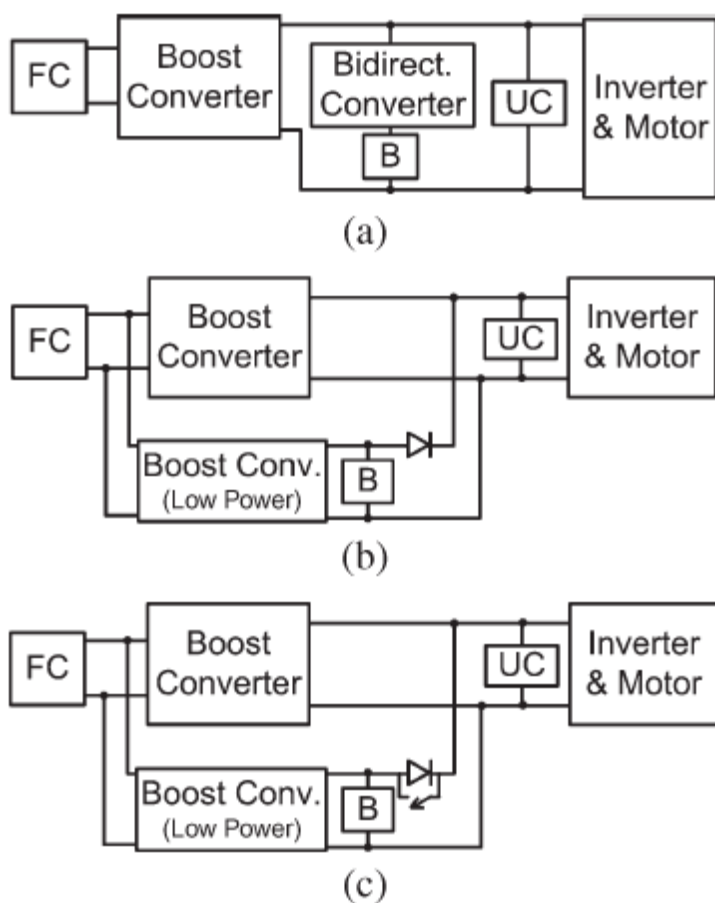


Figura 20 Confronto tra la topologia FC-B-UC tradizionale (a) e le due nuove topologie proposte (b e c)

Il principale svantaggio della topologia presentata in precedenza è quello di utilizzare un convertitore DC/DC bidirezionale ad alta potenza che ha l'effetto di introdurre notevoli costi, massa e perdite. Per connettere le batterie al bus ad elevata tensione viene utilizzato un diodo nel primo caso e una coppia diodo-interruttore nel secondo.

Il principio di funzionamento della topologia b è il seguente: quando è richiesta dell'energia supplementare a quella fornita dalle fuel cell, viene fornita solo dai supercondensatori fino a quando la loro tensione non raggiunge quella delle batterie e quindi il diodo entra in conduzione. A questo punto l'energia viene fornita in combinazione dai due sistemi e quando la richiesta supplementare si esaurisce la batteria carica i supercondensatori alla loro tensione nominale. L'energia cinetica può essere recuperata solo caricando i supercondensatori.

Nella topologia c il funzionamento è simile tranne nel momento del recupero dell'energia cinetica in frenata. In questa situazione, per effetto della chiusura dell'interruttore, il diodo viene cortocircuitato e quindi è possibile avere una corrente entrante nelle batterie e quindi un recupero dell'energia supplementare.

Entrambe le topologie utilizzano un piccolo boost converter che viene utilizzato per ricaricare le batterie tramite le fuel cell quando queste ultime stanno lavorando in una regione a bassa efficienza. Per evitare il funzionamento a bassa efficienza viene richiesta una potenza superiore a quella necessaria al moto del veicolo che andrà a caricare le batterie.

Il principale vantaggio della topologia c è che consente un più efficace recupero dell'energia cinetica in frenata; tuttavia, dimensionando in maniera opportuna il sistema di supercondensatori nella topologia b, questa differenza diminuisce. Gli svantaggi della topologia c derivano dal fatto che ci sono costi e peso aggiuntivi, una più difficile strategia di controllo, minor durata di vita delle batterie in quanto sono utilizzate più frequentemente.

Una simulazione simile alla precedente prova che entrambe le nuove topologie presentate offrono prestazioni migliori rispetto alla precedente FC-B-UC come illustrato dalla Figura 10.

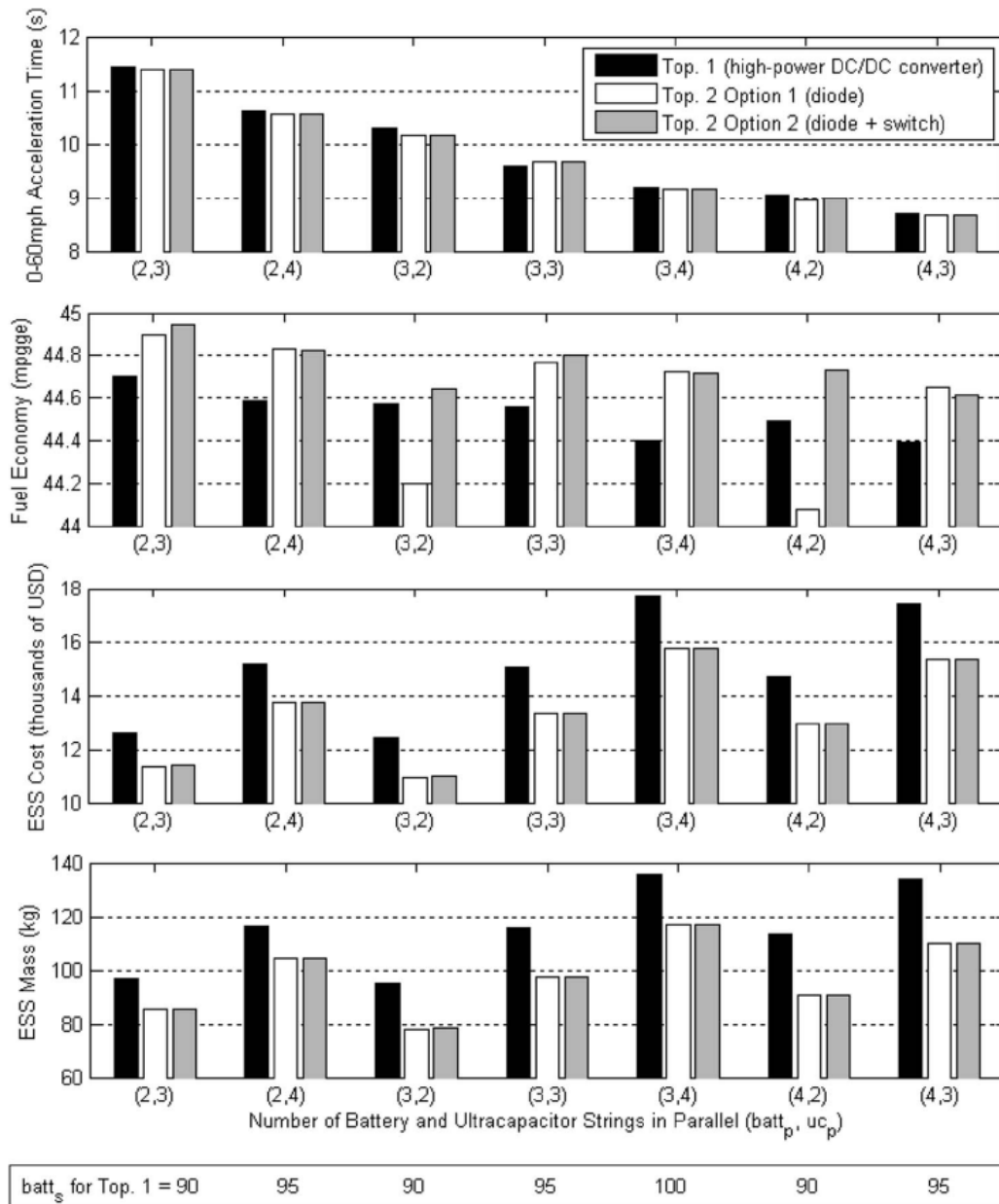


Figura 21 Risultati della studio comparativo

3.4 Convertitore DC/DC

È il dispositivo che permette l'utilizzo delle fuel cell come generatori di energia elettrica. Normalmente infatti la tensione prodotta risulta essere non adatta all'utilizzo diretto e non si mantiene costante. Utilizzando questi dispositivi si riesce a trasformare la tensione in uscita dalle fuel cell nella tensione voluta.

Il principio di funzionamento si basa sulla commutazione di interruttori elettronici che normalmente sono dei transistor MOSFET.

I convertitori DC/DC possono essere: buck converter ovvero quelli che producono una tensione in uscita minore di quella in ingresso, boost converter ovvero quelli che producono una tensione in uscita più alta di quella in ingresso oppure buck/boost converter che a seconda del funzionamento produce una tensione più alta o più bassa. Solitamente nel campo dell'autotrazione vengono utilizzati i boost converter dato che la tensione prodotta da uno stack di celle è solitamente inferiore a quella necessaria per comandare i motori elettrici.

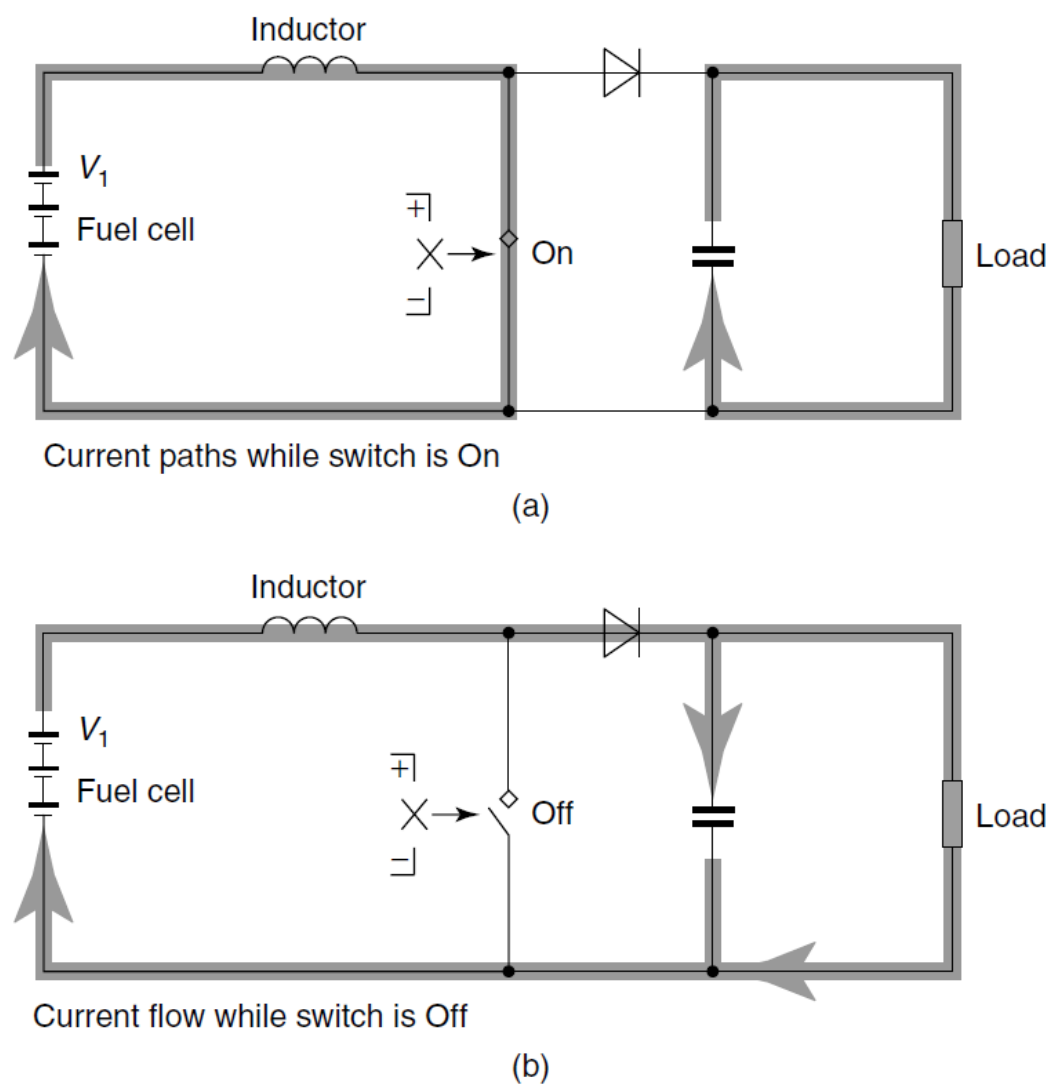


Figura 22 Funzionamento boost DC/DC converter

Nella condizione (a) l'interruttore è chiuso e quindi tutta la tensione presente in ingresso appare ai capi dell'induttore. In base all'equazione di stato dell'induttore:

$$\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{V_{IN}}{L}$$

si registra una variazione, nel nostro caso positiva, essendo la tensione ai capi dello stack di fuel cell positiva, della corrente circolante nell'induttore.

Quando l'interruttore viene aperto la corrente che interessa l'induttore circola attraverso il carico. In questa situazione, considerando nulla la caduta di tensione nel diodo e i componenti del circuito ideali si può dimostrare che la tensione di uscita V_O è pari a:

$$V_O = \frac{t_{ON} + t_{OFF}}{t_{OFF}} V_{IN}$$

e definendo il duty cycle

$$D = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}}$$

che quindi è sempre compreso tra 0 e 1, si ottiene:

$$V_O = \frac{1}{1 - D} V_{IN}$$

e quindi V_O è sempre maggiore di V_{IN} .

L'efficienza di questi circuiti supera senza grosse difficoltà costruttive l'80%. Il problema derivante dall'utilizzo di questi convertitori è che la si registra una variazione di corrente che fluisce nell'induttore denominata corrente di ripple:

$$\Delta I_L = \frac{V_{IN} \cdot D \cdot T}{L}$$

che ha l'effetto di ridurre la durata di vita delle fuel cell.

Per ottenere minori correnti di ripple sono state proposte altre tipologie che prevedono l'utilizzo di più componenti e quindi un aumento di peso e costi.

3.5 Motori elettrici

La scelta della tipologia del motore elettrico da installare nel sistema di trazione dei veicoli è un fattore importante per determinare caratteristiche quali: il consumo di energia, affidabilità e i costi di produzione e manutenzione.

I motori elettrici devono essere efficienti anche in funzionamento da generatori di energia elettrica per garantire il massimo recupero di energia cinetica nelle fasi di decelerazione.

Le tipologie di motori elettrici usati nella trazione sono sostanzialmente tre:

- Motore in corrente continua o motore DC;
- Motore asincrono trifase;
- Motore sincrono a magneti permanenti.

3.5.1 Il motore in corrente continua

Lo statore è formato da un nucleo ferromagnetico e da due avvolgimenti percorsi da corrente per creare il campo magnetico necessario all'interno della macchina. Gli avvolgimenti possono essere sostituiti anche da una coppia di magneti permanenti.

Il rotore è composto da un supporto metallico sul quale vengono alloggiati solitamente due o più bobine isolate tra loro che sono connesse all'alimentazione esterna attraverso un sistema di spazzole collettore.

Il sistema di connessione inverte l'alimentazione alle bobine per due volte ad ogni giro in base alla posizione angolare del rotore; questo garantisce che la forza generata effetto dell'attrazione dei poli contrari e della repulsione dei poli dello stesso sia tale da fare ruotare lo statore sempre nella stessa direzione.

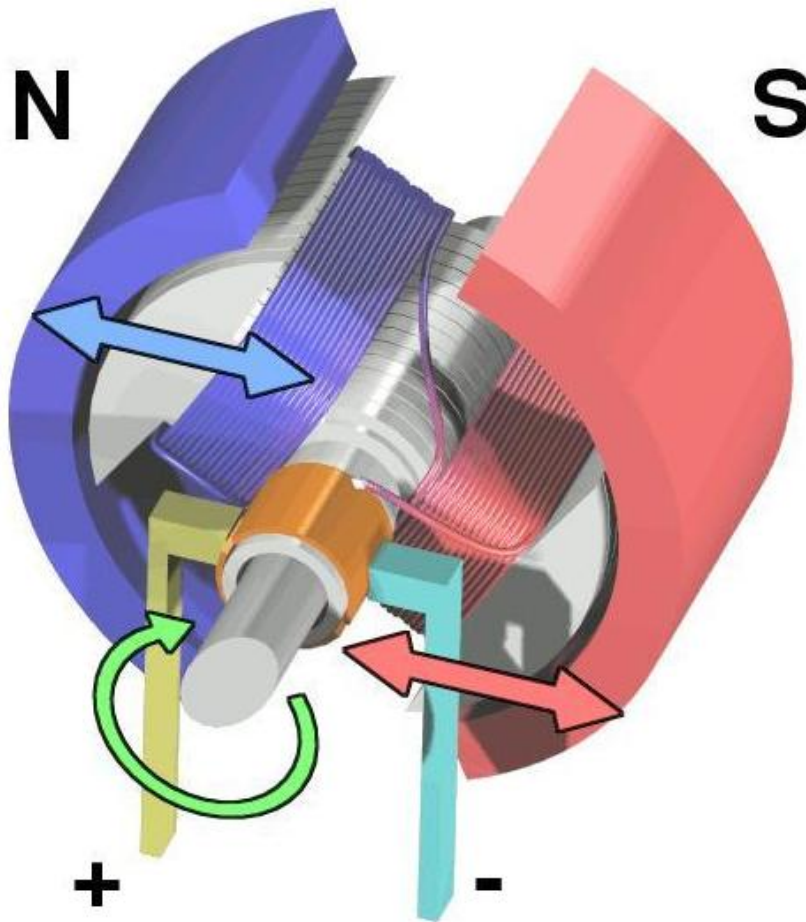


Figura 23 Principio di funzionamento di un motore DC

La velocità di rotazione può essere regolata variando la tensione di alimentazione del rotore. In particolare la velocità varia linearmente con la tensione e questo risulta essere un grosso pregio. I principali limiti derivano dai contatti striscianti infatti:

- il regime di rotazione deve essere limitato perché più alta è la velocità e maggiore deve essere la pressione esercitata dalla spazzole per garantire un buon contatto elettrico.
- le commutazioni che avvengono nel sistema di alimentazione del rotore provocano scintille e conseguenti disturbi elettrici.
- le spazzole di grafite devono essere sostituite frequentemente a causa dell'elevato consumo determinato dallo strofinio.

Il rendimento medio dei motori elettrici in corrente continua si aggira sull'80%.

Per evitare tali problemi si cerca di invertire la struttura di rotore e statore; infatti nei motori DC brushless gli avvolgimenti rotorici vengono installati sullo statore e il rotore è composto da magneti permanenti. In questo modo non è più necessario il sistema di spazzole e collettore in quanto gli avvolgimenti sui quali deve essere variato il verso della corrente sono fermi. Il principale svantaggio di questa variante è l'aumento dei costi derivanti dalla necessità di disporre di un sistema di controllo per l'inversione della corrente negli avvolgimenti mentre in precedenza questo compito veniva esplicato in maniera automatica dal sistema spazzole-collettore.

3.5.2 Motore asincrono trifase

Il motore asincrono è un motore elettrico alimentato da una terna di tensioni alternate. La terna tensioni alimenta le bobine che sono disposte sullo statore con una distanza angolare pari a 120° ; la disposizione meccanica unita allo sfasamento elettrico, anch'esso di 120° , hanno l'effetto di produrre un campo magnetico, composto somma dei singoli campi magnetici prodotti dagli avvolgimenti, che risulta essere rotante. All'interno dello statore è comunque possibile installare più terne di avvolgimenti; una terna di avvolgimenti prende il nome di coppia polare.

All'interno dello statore è presente il rotore sul quale sono disposti degli avvolgimenti o talvolta delle barre metalliche chiuse in corto-circuito. Il campo magnetico di statore ha l'effetto di indurre delle correnti che a loro volta produrranno un campo magnetico opposto. Per effetto dei campi magnetici opposti il rotore si mette in movimento.

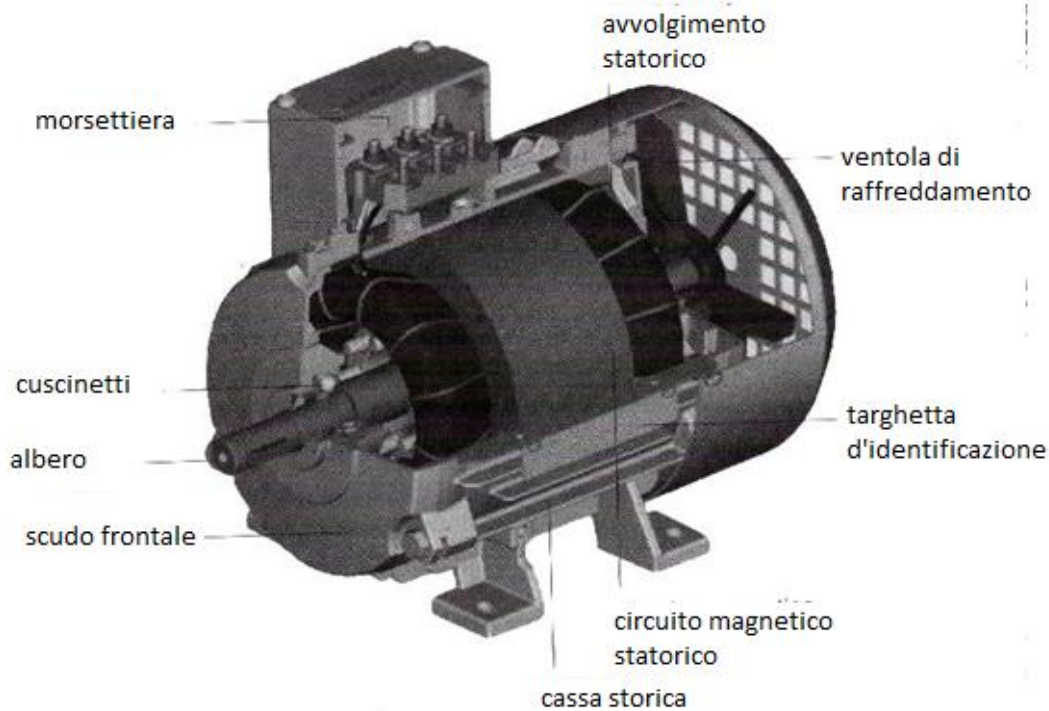


Figura 24 Rappresentazione di motore asincrono trifase

La velocità del rotore è sempre inferiore a quella del campo magnetico statorico. In particolare viene definito scorrimento il valore

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s}$$

con n_s velocità di sincronismo e n_r velocità di rotazione del rotore. La velocità di sincronismo n_s ha la seguente espressione:

$$n_s = 60 \frac{f}{p}$$

dove f è la frequenza del sistema di alimentazione e p il numero di coppie polari. È importante notare che lo scorrimento non potrà mai essere nullo perché in quel caso non si avrebbe una corrente indotta sul rotore e conseguentemente una forza applicata e quindi esso rallenterebbe.

Il motore asincrono trifase ha importanti vantaggi tra i quali: ha una buona densità di potenza, è robusto, è il più affidabile motore elettrico esistente e presenta un rendimento di circa il 90%. Il principale difetto è regolazione della velocità che come si è visto dipende dal numero di coppie polari e dalla frequenza. Negli ultimi anni, grazie all'importante sviluppo

dell'elettronica di potenza, è diventato relativamente semplice variare la frequenza e quindi ottenere la velocità desiderata.

3.5.3 Motore sincrono a magneti permanenti

La struttura dello statore è del tutto simile a quella dello statore del motore asincrono trifase. Anche in questo caso ci sono delle coppie polari alimentate da un sistema trifase che generano un campo magnetico rotante.

Il rotore è composto da magneti permanenti e quindi è presente un campo magnetico dovuto allo statore.

Il motore sincrono non è auto avviante; per avviare il motore viene aumentata lentamente la frequenza del sistema di alimentazione così da far accelerare il motore, in questo modo infatti il rotore riesce a seguire il campo magnetico rotante, fino a raggiungere la velocità nominale. Il rotore gira a questo punto alla velocità costante di

$$n = 60 \frac{f}{p}$$

con f e p numero di coppie polari dello statore; anche in questo caso quindi è necessario variare la frequenza per cambiare la velocità

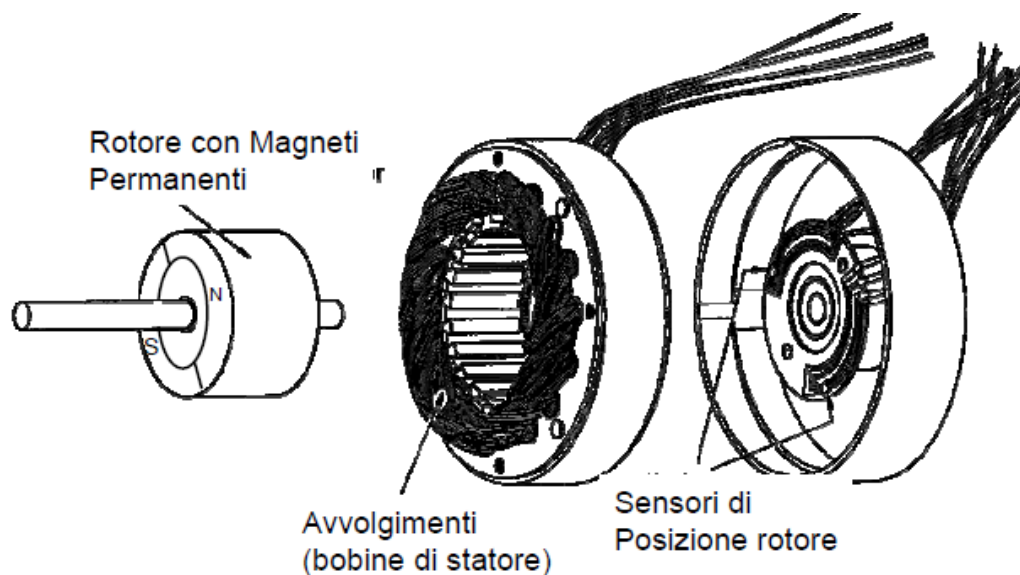


Figura 25 Spaccato di un motore sincrono a magneti permanenti

I motori sincroni a magneti permanenti hanno il vantaggio avere un rendimento maggiore rispetto ai motori asincroni perché i magneti permanenti non richiedono la componente di magnetizzante del campo statorico che invece è necessaria nel rotore di un motore asincrono. Il rendimento medio di questa categoria di motori è superiore al 95%.

I difetti del motore in esame sono gli elevati costi di realizzazione, la minore affidabilità e la manutenzione più frequente rispetto ad un motore asincrono e infine il fatto che non è autoavviante.

3.5.4 Comparazione

È interessante ora valutare l'efficacia delle varie soluzioni proposte in precedenza applicate ad un veicolo. Uno studio basato su efficienza dei motori, peso, costi ed fuel economy ha condotto ai seguenti risultati.

PM= Motore sincrono a magneti permanenti

IM= Motore asincrono trifase

DC= Motore in corrente continua brushless

RENDIMENTO			
	Motore	Elettronica	Totale
PM	97	93	90
IM	90	93	84
DC	80	98	78

Tabella 3 Rendimenti dei vari sistemi di trazione

PESO			
	Motore	Elettronica	Totale
PM	100	100	200
IM	200	100	300
DC	400	50	450

Tabella 4 Peso dei vari sistemi di trazione riferiti al peso di PM=100

COSTO DEL SISTEMA			
	1993	1998	2003
PM	150	90	60
IM	100	90	80
DC	100	105	110

Tabella 5 Costi dei vari sistemi riferiti a DC=100

Per la valutazione della fuel economy sono stati considerati tre diversi cicli di guida, ovvero: CYC-UDDS, velocità costante, e NurembergR36.

CARATTERISTICHE CICLI			
	CYC-UDDS	Costante	NurembergR36
Vmax (km/h)	91,25	96,56	53,7
Vmedia (km/h)	31,51	96,56	14,33
Amedia (m/s²)	0,5	0	0,58
Dmedia (m/s²)	-0,58	0	-0,55

Tabella 6 Caratteristiche cicli

Il tutti e tre i casi i risultati sono risultati essere i seguenti.

FUEL ECONOMY ED EMISSIONI			
	IM	PM	DC
HC (g/km)	0,168	0,16	0,158
Co (g/km)	0,819	0,783	0,729
Nox (g/km)	0,185	0,168	0,167
Consumo (L/100Km)	6,8	6,4	6,3

Tabella 7 Risultati della simulazione che mostrano emissioni e consumi equivalenti

Dai risultati è emerso che se da un punto di vista costruttivo, tecnologico ed economico i motori asincroni trifase rappresentano, per ora, la migliore opzione da scegliere; guardando i risultati di fuel economy ed emissioni si capisce che i motori sincroni a magneti permanenti e i motori DC brushless offrono potenzialità maggiori e a seguito di sviluppi tecnologici e costruttivi possono diventare la scelta più consistente in futuro.

4

Conclusioni

La ricerca di nuove tipologie di veicoli, per la sostituzione dei veicoli convenzionali che utilizzano il motore a combustione interna alimentato con combustibili fossili, ha inizialmente prodotto due scuole di pensiero:

- La prima prevedeva di utilizzare motori a combustione interna alimentati ad idrogeno;
- La seconda escludeva l'utilizzo del motore a combustione interna e l'utilizzo di motori elettrici.

Tra le due soluzioni, quella che maggiormente ha attirato interessi e capitali è decisamente stata la seconda; questo è avvenuto per i maggiori rendimenti teorici raggiungibili utilizzando un sistema elettrico nonostante la tecnologia necessaria per la prima fosse molto simile a quella che già possediamo.

Anche tra i sostenitori dei veicoli elettrici ci sono stati diverse interpretazioni:

- Veicoli alimentati esclusivamente da batterie;
- Veicoli a celle a combustibile.

La principale differenza tra le due soluzioni è l'autonomia che può essere raggiunta dai veicoli. Nel primo caso sono raggiungibili percorrenze di circa 200 Km mentre nel secondo caso si superano di norma i 400 Km. La differenza sostanziale è che per ricaricare i veicoli a batterie sono necessarie dalle 6 alle 10 ore mentre per rifornire i veicoli a fuel cell si impiega un tempo compreso tra 3 e 5 minuti.

Considerato che la media di percorrenza di un automobilista europeo è di poco inferiore ai 40 Km al giorno i veicoli a batterie potrebbero rispondere al bisogno di una buona parte degli automobilisti ma non sarebbero in grado di soddisfare i requisiti di alcune categorie quali per esempio rappresentanti e camionisti che percorrono molta più strada in un giorno.

Il limite dato dagli accumulatori e dai loro sistemi di ricarica ha quindi spinto le ricerche sui FCV. Anche in questo caso ci sono notevoli problemi da ottimizzare e risolvere.

Il primo è sicuramente il problema dei costi derivanti dalle celle a combustibile che impiegano materiali nobili come il platino, i sistemi di accumulo dell'idrogeno che sono molto complicati e il costo delle batterie. Secondo le previsioni questi costi dovrebbero scendere notevolmente in una decina di anni e una ulteriore diminuzione si avrebbe con l'inizio della produzione in serie.

Un altro problema che si cerca di risolvere è quello di garantire ai nuovi veicoli prestazioni, durata di vita e fruibilità in linea con quelli attuali. Per raggiungere questi obiettivi i prototipi realizzati stanno percorrendo milioni di chilometri, i costruttori sono alla ricerca di nuovi materiali e stanno lavorando all'ottimizzazione di quelli esistenti.

Il principale problema sembra essere l'idrogeno. Esso non esiste sulla terra in forma pura ma si presenta legato ad altre sostanze come nel metano e nell'acqua. Ad oggi circa il 95% dell'idrogeno viene prodotto attraverso il

reforming del metano. In questo modo non si risolve il problema di rendere indipendente il sistema dell'autotrazione dai combustibili fossili e l'effettiva emissione di gas serra verrebbe solo spostata dai veicoli ai siti di produzione dell'idrogeno.

Un secondo modo di produrre l'idrogeno è attraverso elettrolisi dell'acqua. Questo sistema anche se è meno efficiente è molto interessante perché necessita di energia elettrica. Se questa energia elettrica fosse prodotta da fonti rinnovabili si eliminerebbe completamente la relazione esistente con i combustibili fossili e le emissioni di gas nocivi. In questi termini anche il nucleare potrebbe svolgere un ruolo di primo piano.

Infine, sempre quanto riguarda l'idrogeno c'è il problema di creare una rete di trasporto che ha requisiti diversi da quelli offerti da gasdotti e oleodotti.

Questi problemi vengono trattati in generale dall'economia dell'idrogeno. Per ora c'è ancora un lungo cammino tecnologico da compiere per raggiungere la sostenibilità di un mondo basato sull'idrogeno ma le premesse e le aspettative sono importanti.

Appendice A

Prototipi di FCV

La fase di sperimentazione dei veicoli a fuel cell è ad uno stato avanzato infatti molte case automobilistiche hanno prodotto dei prototipi che sfruttano telaio e carrozzeria di modelli in commercio ma sono dotati di sistemi di powertrain basati sull'utilizzo delle celle a combustibile.

Questi prototipi, che hanno dimostrato di rispettare i normali standard di sicurezza superando i crash test, stanno accumulando chilometri di prove su strada fornendo risultati soddisfacenti. Di seguito verranno presentate le caratteristiche tecniche di alcuni di questi divisi raggruppati per casa automobilistica per meglio apprezzare anche l'evoluzione negli anni. Come già detto in precedenza tutti i prototipi utilizzano le PEM fuel cell.

Mercedes

Classe A F-Cell (2004)



- Potenza stack FC:** 72 kW
- Autonomia:** 177 km
- Velocità max.:** 140 km/h
- Combustibile:** idrogeno (350 bar)
- Batterie:** NIMH
- Motore:** sincrono a magneti permanenti

F600 HYGENIUS (2005)



- Potenza stack FC:** 66 kW
- Autonomia:** >400 km
- Velocità max.:** 174 km/h
- Combustibile:** idrogeno (700 bar)
- Batterie:** Li-ione
- Motore:** sincrono a magneti permanenti

Classe B F-Cell (2008)



- Potenza stack FC:** 100 kW
- Autonomia:** 400 km
- Velocità max.:** 170 km/h
- Combustibile:** idrogeno (700 bar)
- Batterie:** Li-ione
- Motore:** sincrono a magneti permanenti

Ford Motor Company

Focus FCEV Hybrid (2002)



Potenza stack FC: 68 kW

Autonomia: 260-320 km

Velocità max.: 128 km/h

Combustibile: idrogeno (350 bar)

Batterie: NIMH

Motore: asincrono trifase

Edge (2007)



Potenza stack FC: -

Autonomia: 360 km

Velocità max.: 140 km/h

Combustibile: idrogeno (350 bar)

Batterie: Li-ione

Motore: asincrono trifase

Honda Motor Company

FCX (2003)



Potenza stack FC: 86 Kw

Autonomia: 395 km

Velocità max.: 150 km/h

Combustibile: idrogeno (350 bar)

Batterie: -

FCX Clarity (2007)**Potenza stack FC:** 100 Kw**Autonomia:** 430 km**Velocità max.:** 160 km/h**Combustibile:** idrogeno (350 bar)**Batterie:** Li-ione**Motore:** sincro a magneti permanenti**Kia Sportage (2004)****Potenza stack FC:** 80 Kw**Autonomia:** 300 km**Velocità max.:** 150 km/h**Combustibile:** idrogeno (350 bar)**Batterie:** -**Nissan X-Trail FCV (2003)****Potenza stack FC:** 63 Kw**Autonomia:** 145 km**Velocità max.:** 350 km/h**Combustibile:** idrogeno (350 bar)**Batterie:** -**Suzuki SX4-FCV (2009)****Potenza stack FC:** 80 Kw**Autonomia:** 250 km**Velocità max.:** 150 km/h**Combustibile:** idrogeno (700 bar)**Batterie:** Li-ione**Motore:** asincrono trifase

Bibliografia

1. Jennifer Bauman and Mehrdad Kazerani, "*A Comparative Study of Fuel-Cell–Battery, Fuel-Cell–Ultracapacitor, and Fuel-Cell–Battery–Ultracapacitor Vehicles.*", IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. 57, NO. 2, MARCH 2008.
2. Jennifer Baumann and Mehrdad Kazerani, "*An Analytical Optimization Method for Improved Fuel Cell–Battery–Ultracapacitor Powertrain.*", IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. 58, NO. 7, SEPTEMBER 2009.
3. Nasser Hashernnia and Behzad Asaei, "*Comparative Study of Using Different Electric Motors in the Electric Vehicles*", Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines.
4. Marina Ronchetti, "CELLE A COMBUSTIBILE. *Stato di sviluppo e prospettive della tecnologia.*", ENEA Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente Roma, 2008.
5. J. H. Hirschenhofer et al., "*Fuel Cell Handbook 6th edition*", National Technical Information Service, Springfield, 2002.
6. Gaetano Conte, "MACCHINE ELETTRICHE", HOEPLI, 2009.