

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale
Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

Relazione per la prova finale
«Celle a combustibile: applicazioni spaziali»

Tutor universitario: Prof.ssa Roberta Bertani

Laureando: *Federico Ponzin*

Padova, 21/11/2024

- Una cella a combustibile è un dispositivo elettrochimico in grado di convertire direttamente l'energia chimica in energia elettrica, tramite un processo a temperatura costante in cui l'idrogeno viene combinato con l'ossigeno per formare acqua¹.
- Il principio di funzionamento della cella a combustibile fu scoperto nel 1839 dal fisico inglese William Grove¹. Quasi cento anni dopo, sempre in Gran Bretagna, l'ingegnere Francis Thomas Bacon sviluppò ulteriormente l'invenzione di Grove, dedicando particolare attenzione alla morfologia degli elettrodi e al ruolo del catalizzatore nel promuovere i processi di cella¹.
- In tempi più recenti si sono avuti ulteriori sviluppi tecnologici, prima negli anni Sessanta, a seguito dei programmi spaziali che sono sfociati con lo sbarco del primo uomo sulla Luna e, più recentemente, in relazione alle loro potenzialità nel rinnovamento energetico (ciclo di idrogeno) e nel trasporto ecosostenibile (veicoli elettrici)¹.

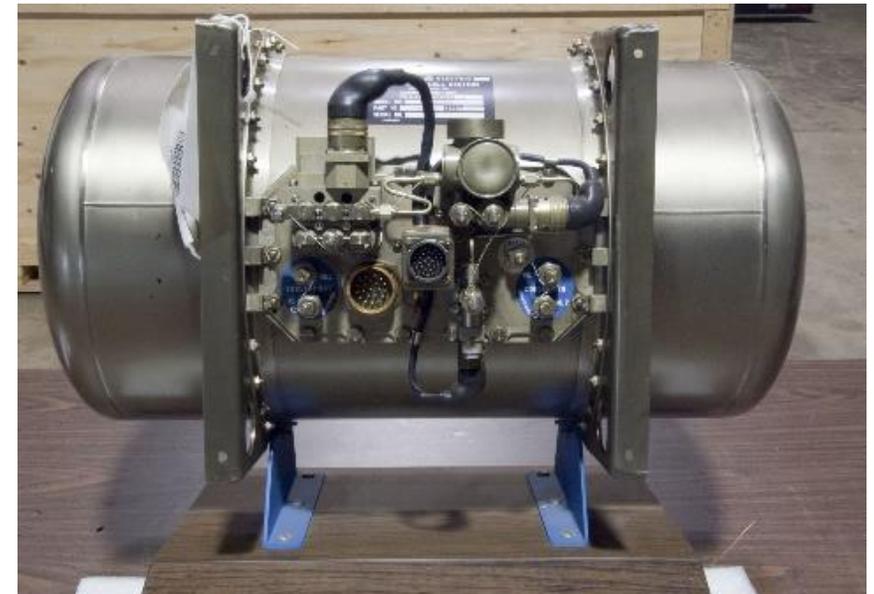
Francis Thomas Bacon e la sua cella a combustibile (Cambridge, 1959)



- Con questa trattazione si vuole descrivere brevemente l'evoluzione storica delle celle a combustibile, spiegarne il funzionamento, analizzarne caratteristiche, vantaggi e svantaggi.
- Inoltre si vuole porre un occhio di riguardo alle più recenti applicazioni e alle possibili evoluzioni future.

- L'attenzione della NASA nei confronti delle celle a combustibile iniziò dal momento in cui ci si interessò a trovare un combustibile adatto per affrontare una missione lunare. Gli ingegneri dell'epoca si affidarono alle celle a combustibile piuttosto che alle batterie per l'energia specifica maggiore².
- Nel programma *Mercury*, le celle a combustibile non erano utilizzate in modo diretto, ma si cominciò a esplorare le loro potenzialità per fornire energia durante le missioni spaziali. *Mercury* si affidava principalmente a batterie chimiche per l'alimentazione elettrica.
- Nel programma *Gemini*, invece, le celle a combustibile furono testate più ampiamente. *Gemini 5*, lanciata nel 1965, fu la prima missione a utilizzare celle a combustibile per generare energia elettrica. Questo rappresentò un passo importante per testare tecnologie che sarebbero state cruciali per le missioni *Apollo*. Le celle a combustibile *Gemini* dimostrarono di poter fornire energia in modo affidabile e costante durante le missioni di durata più lunga: erano testate per durare più di 1000 ore (più di 41 giorni)³.

Versione test della cella a combustibile usata nelle missioni *Gemini*³



• Il programma *Apollo* utilizzò le celle a combustibile in maniera più estesa. *Apollo 11*, la missione che portò il primo uomo sulla Luna (20 luglio 1969), utilizzava tre celle a combustibile per alimentare il modulo di comando. Queste celle fornivano elettricità e acqua potabile, un elemento chiave per la sopravvivenza degli astronauti. L'affidabilità e l'efficienza delle celle a combustibile si dimostrarono vitali e la loro capacità di produrre energia senza emissioni nocive contribuì a rendere possibili le missioni lunari.

- Le celle a combustibile utilizzate nelle missioni *Apollo* erano più primitive in termini di tecnologia e materiali rispetto a quelle utilizzate nello Shuttle. Quest'ultime erano anche più affidabili ed efficienti e avevano una maggiore capacità energetica, necessaria a supportare le esigenze di una missione spaziale più lunga e complessa. Lo Space Shuttle era un veicolo riutilizzabile, quindi le celle a combustibile dovevano essere progettate per resistere a più cicli di lancio e rientro. Le celle a combustibile dello Shuttle includevano ulteriori misure di sicurezza e sistemi di controllo per garantire un funzionamento stabile e sicuro durante le missioni spaziali.
- A sinistra è rappresentata una cella a combustibile usata in una missione *Apollo*, mentre a destra una dello Shuttle. Si può notare che la potenza specifica è più che decuplicata, oltre a un netto aumento della potenza di picco, dovuto anche al maggior numero di celle per unità.

System	Specific power (W/kg)	Operation
Gemini	33	
Apollo	25	
Shuttle	275	2500 h at P_{ave}
SPE technology	110-146	> 40 000 h
Alkaline technology	367	> 3000 h
Alkaline technology	110	> 40 000 h
Goal (lightweight cell)	550	

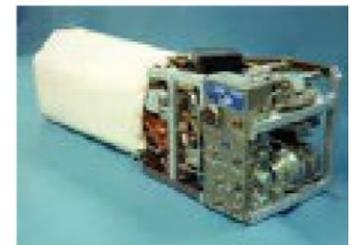


Apollo

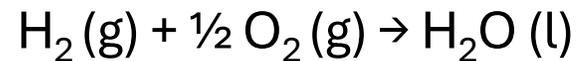
3 unità
31 celle/unità
27-31 V
1.5 kW
(2.3 kW picco)
25 W/kg

STS

3 unità
96 celle/unità
28 V
12 kW
(16 kW picco)
275 W/kg
 $\eta \approx 70 \%$

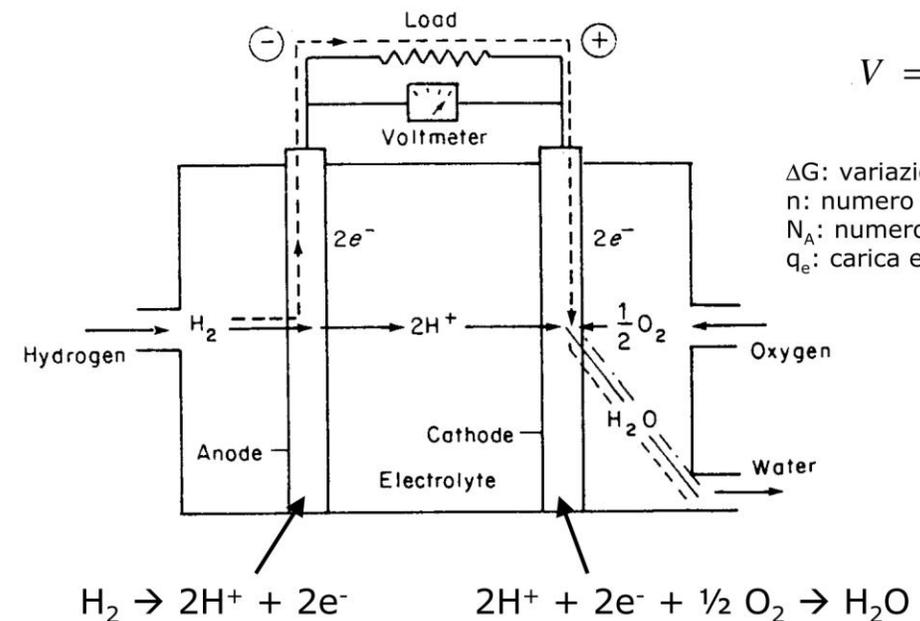


- Le celle a combustibile convertono in maniera diretta e statica l'energia chimica (contenuta nei reagenti) in energia elettrica, attraverso una reazione di combustione dell'idrogeno gassoso con l'ossigeno gassoso, con formazione di acqua¹:



- L'idrogeno è il combustibile più utilizzato, ma possono essere adoperati anche alcoli o benzine¹. Poiché l'idrogeno è sempre legato ad altri elementi in natura, come ad esempio nell'acqua (idrogeno e ossigeno) o negli idrocarburi (idrogeno e carbonio), è necessario che venga prodotto sfruttando dei processi come l'elettrolisi dell'acqua, il *cracking* o il *reforming* in corrente di vapore di combustibili organici, quali il gas naturale, il metanolo o gli idrocarburi¹.
- Tra tutti questi processi di sintesi, solamente l'elettrolisi dell'acqua dà luogo a idrogeno puro, mentre dagli altri si ottengono miscele in cui l'idrogeno è presente con altri componenti gassosi, in genere indesiderati in quanto possono influire sul corretto funzionamento della cella a combustibile¹. Per questo ultimamente ci si sta concentrando sullo studio di celle a combustibile rigenerative che, tramite l'implementazione di pannelli solari, permettono di compiere l'elettrolisi dell'acqua e quindi ricavare l'idrogeno necessario alle celle stesse.

- Dall'anodo (a sinistra) entra il combustibile: l'idrogeno; mentre dal catodo (a destra) l'ossigeno.
- In corrispondenza dell'anodo avviene l'ossidazione dell'idrogeno in 2 ioni H^+ , con cessione di 2 elettroni.
- I due ioni transitano all'interno dell'elettrolita verso il catodo, mentre gli elettroni sono molto più favoriti a transitare verso il circuito ohmico esterno, dove producono lavoro elettrico, e vanno in seguito a ridurre l'ossigeno al catodo, producendo acqua reagendo con gli ioni H^+ .
- Secondo la reazione catodica, che è quella che vediamo in basso a destra, si produce acqua, che viene scaricata dal collettore in basso a destra della cella.
- La tensione nominale si calcola con la legge a destra della schematizzazione.
- Svolgendo questo calcolo si ottiene un valore di poco superiore a 1V.



$$V = \frac{-\Delta G}{n \cdot N_A \cdot q_e}$$

ΔG : variazione dell'energia di Gibbs
 n : numero di elettroni trasferiti
 N_A : numero di Avogadro
 q_e : carica elettrica elementare

- *Densità di potenza estremamente elevata:* le celle a combustibile di ultima generazione raggiungono una densità di potenza di poco inferiore ai 400 W/kg, limitata solo dalle dimensioni e dalla massa. Per incrementare la potenza è possibile collegare più celle in parallelo, ognuna con i propri serbatoi di reagenti.
- *Disponibilità limitata del combustibile:* poiché deve essere caricato in quantità compatibile con i vincoli di massa e volume del veicolo, queste celle sono più indicate per missioni di breve durata.

La cella a combustibile più comune è quella elettrolitica a idrogeno/ossigeno, che produce acqua come sottoprodotto della reazione chimica, rendendola particolarmente adatta per missioni con equipaggio, poiché l'acqua è potabile.

È una tecnologia che viene spesso usata a supporto dell'implementazione di una sorgente primaria di potenza.

Vantaggi

- Flessibilità operativa: funzionano in qualsiasi momento (giorno e notte) senza necessità di sorgenti secondarie.
- Bassa degradazione: siccome non sono esposte direttamente allo spazio.
- Elevatissima densità di potenza.
- Produzione di acqua in seguito alla reazione.

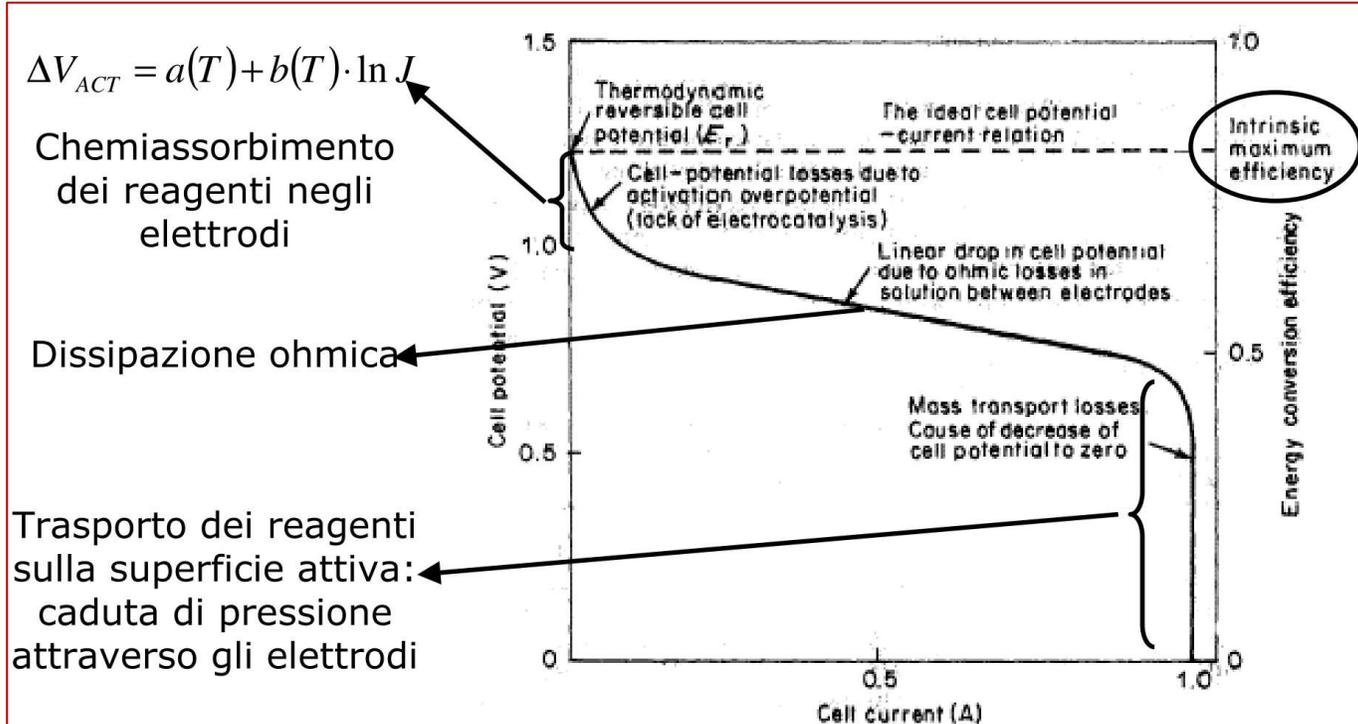
Svantaggi

- Necessità di trasportare a bordo i reagenti, limitando l'autonomia.

Quando la corrente è zero, si raggiunge il massimo valore di tensione, corrispondente al potenziale di Gibbs. L'analisi della curva mostra diverse fasi di funzionamento: accensione, funzionamento nominale e spegnimento.

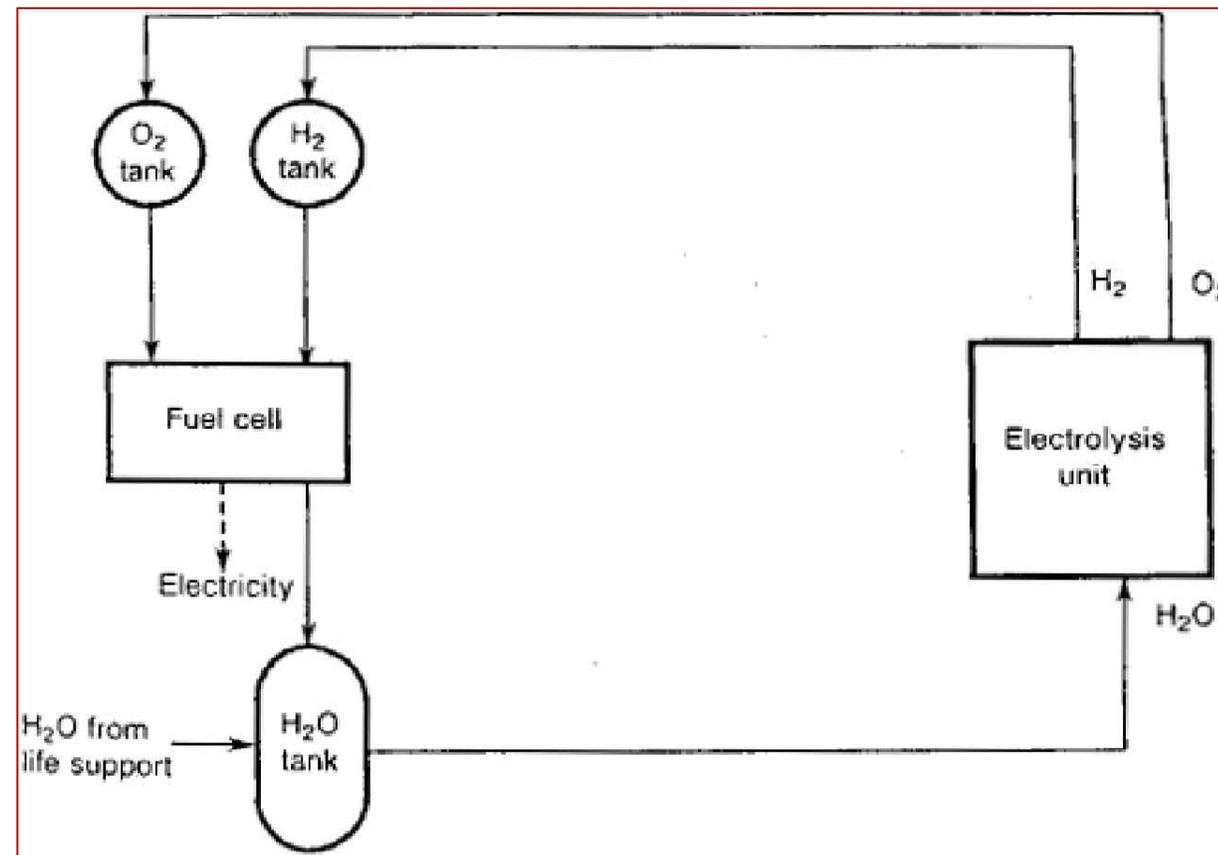
- *Fase I* (accensione): iniziale calo di tensione dovuto all'adsorbimento* dell'idrogeno.
- *Fase II* (funzionamento nominale): il funzionamento ohmico ottimale, che va di pari passo però con una caduta lineare del potenziale della cella dovuta alle perdite ohmiche.

*fenomeno in virtù del quale la superficie di una sostanza solida, detta adsorbente, fissa molecole provenienti da una fase gassosa o liquida con cui è a contatto⁴



- *Fase III* (spegnimento): l'accumulo di ioni H⁺ al catodo causa la generazione di un campo elettrico inverso che impedisce il passaggio di nuovi ioni.

- Un'area di ricerca interessante è l'integrazione di celle a combustibile con pannelli solari, in un sistema di potenza ibrido.
- Questa configurazione prevede l'utilizzo di celle reversibili che producono idrogeno e ossigeno dalle molecole d'acqua tramite un elettrolizzatore, alimentato in parte dall'energia solare sfruttata dai pannelli solari durante le ore diurne.
- In questo modo, si ottimizzerebbero le risorse e si ridurrebbero le problematiche legate alla degradazione e al drag atmosferico dovute ai pannelli.
- A inizio dello scorso anno, grazie al programma *Technology Development Element* dell'ESA, si è finalmente riusciti a sviluppare un sistema a ciclo chiuso di celle a combustibile rigenerative⁵.



- Una volta compiuta l'elettrolisi dell'acqua, i gas reagenti vengono separati e immagazzinati in 2 serbatoi, pronti per essere utilizzati durante le ore notturne dalla cella a combustibile per generare energia elettrica⁵.
- Calore e acqua sono i sottoprodotti, la quale verrà utilizzata nel successivo ciclo⁵.
- Le RFCS sono particolarmente adatte a missioni spaziali con lunghi periodi di eclisse⁵. Inizialmente il loro impiego sarebbe dovuto essere quello di dare carburante ai grandi satelliti geostazionari utilizzati nel settore delle telecomunicazioni, tuttavia il sistema è ideale anche per missioni di esplorazione lunari e marziane⁵.
- Creare un sistema di immagazzinamento dell'energia efficiente per missioni verso la Luna o Marte è estremamente difficile: gli ingegneri devono tenere in considerazione condizioni di illuminazione particolarmente variabili ed estreme variazioni di temperatura tra giorno e notte⁵.
- Le RFCS hanno il potenziale di rimpiazzare le convenzionali batterie ricaricabili, che spesso sono troppo gravose in termini di peso e ingombro⁵.
- Inoltre le RFCS hanno un'energia specifica più elevata. Per grandi sistemi, l'energia specifica è più che doppia rispetto a quella che verrebbe fornita da batterie a ioni di litio⁵.

Sistema rigenerativo di celle a combustibile



- Il gruppo di ricerca e sviluppo del *Jet Propulsion Laboratory* dell'Istituto di tecnologia della California sta sviluppando delle celle a combustibile a metanolo diretto (DMFC), celle a combustibile con membrana a scambio protonico e celle a combustibile alcaline a membrana di scambio, che costituiranno la prossima generazione di celle a combustibile per il settore spaziale⁶.
- Saranno utilizzate come sorgente primaria per esplorazioni planetarie e operazioni sulla superficie di lunga durata⁶.
- Il gruppo di ricerca si sta focalizzando su sistemi di potenza compatti e portatili, tramite l'utilizzo di RFCS, capaci di garantire l'esecuzione di operazioni in ambienti ostili, come garantire potenza a grandi rover o operazioni umane su Marte⁶.

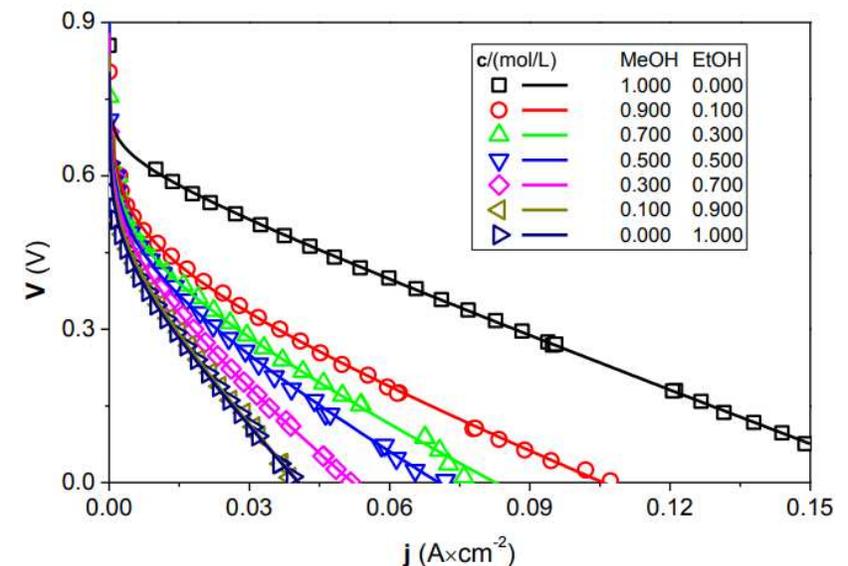
Fuel Cell Powered ATHLETE Mobility System ('07)



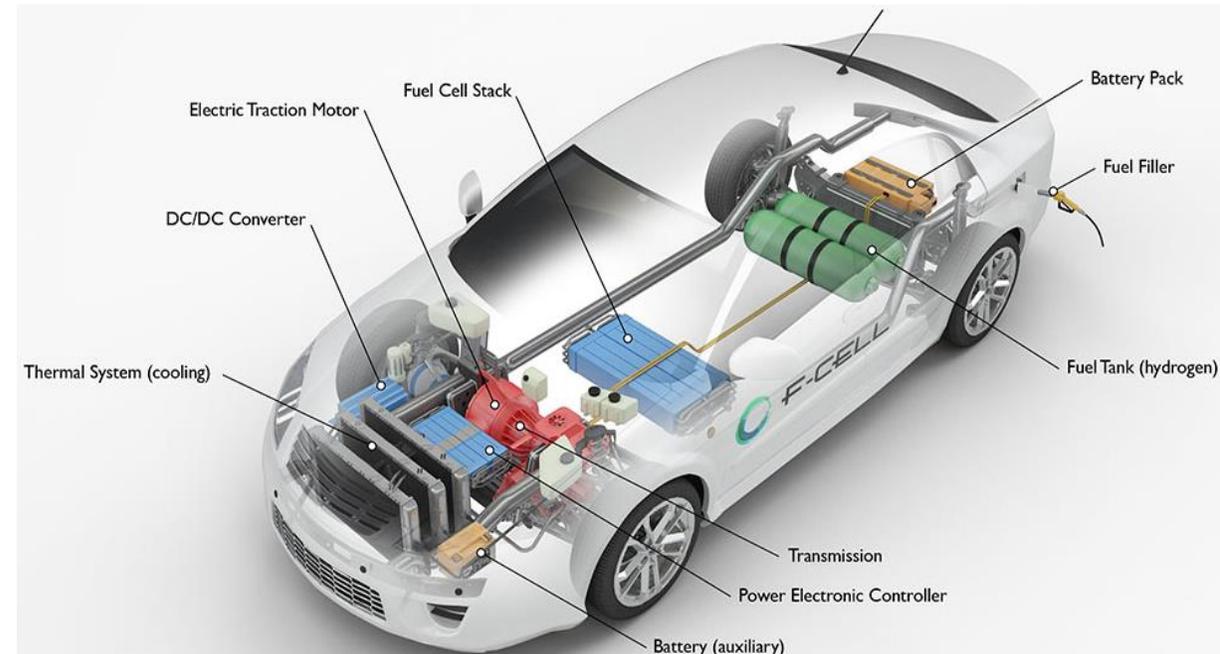
Methanol Electrolysis System ('09)



- Le DMFC hanno il pregio di poter offrire alte potenze e densità di energia con basse emissioni e un rifornimento veloce e conveniente⁷.
- Recentemente sono state messe a punto però anche celle a combustibile a etanolo diretto (DEFC), in quanto l'etanolo può essere prodotto in grandi quantità da fonti rinnovabili e inoltre è meno tossico del metanolo e ha una densità di potenza più elevata⁷.
- Tuttavia gli aspetti della sua ossidazione elettrochimica rendono piuttosto basse le prestazioni delle DEFC⁷.
- La possibilità di usare metanolo ed etanolo assieme in una cella a combustibile ad alcol diretto (DAFC) permetterebbe di trarre beneficio dei vantaggi di ciascun alcol⁷.
- Questa possibilità è stata teoricamente studiata mettendo a confronto una DAFC alimentata a metanolo ed etanolo rispetto alla stessa cella a combustibile alimentata con soltanto metanolo o etanolo⁷.
- La performance della DAFC al variare delle concentrazioni di metanolo ed etanolo è mostrata in figura.
- Si può notare che la performance diminuisce gradualmente da puro metanolo a puro etanolo⁷.
- Anche a basse concentrazioni di etanolo ($y_{EtOH} = 0,1$), esso penalizza nettamente il comportamento della cella: sia per quanto riguarda la cinetica delle reazioni, sia per quanto riguarda la conduttività protonica⁷.



- La ricerca riguardo le celle a combustibile è senza dubbio interessante, ma soprattutto è una delle tecnologie più studiate del momento, e non solo in ambito aerospaziale.
- È ormai sulla bocca di tutti, infatti, parlare di veicoli alimentati a idrogeno, tant'è che il governo statunitense ha recentissimamente stanziato 46 milioni di dollari per accelerare la ricerca e lo sviluppo in questo settore⁸.
- I fondi verranno utilizzati per cercare di arrivare alla decarbonizzazione in settori critici, quali il trasporto pesante e i processi chimici e industriali⁸.
- I veicoli elettrici che funzionano tramite celle a combustibile a idrogeno sono più efficienti dei convenzionali motori a combustione interna perché non vi sono le limitazioni imposte dal ciclo di Carnot¹.
- Inoltre non producono nemmeno emissioni pericolose, bensì soltanto vapor d'acqua e aria calda⁹.
- Inoltre è possibile dotarli di un sistema di frenaggio rigenerativo, che permetterebbe loro di recuperare l'energia persa in frenata e immagazzinarla tramite l'utilizzo di batterie⁹, permettendo al motore di generare rapide accelerazioni¹⁰.



- ¹ https://www.treccani.it/enciclopedia/celle-a-combustibile_%28Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica%29/
- ² <https://www.nasa.gov/technology/tech-transfer-spinoffs/tech-today-nasas-moonshot-launched-commercial-fuel-cell-industry/>
- ³ https://www.si.edu/object/fuel-cell-gemini:nasm_A19660646000
- ⁴ <https://www.treccani.it/enciclopedia/adsorbimento/>
- ⁵ https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Shaping_the_Future/Surviving_the_Lunar_Night_with_a_Regenerative_Fuel_Cell_System
- ⁶ <https://electrochem.jpl.nasa.gov/?page=research-fuel-cells>
- ⁷ [https://oa.upm.es/19632/1/INVE MEM 2011 123564.pdf](https://oa.upm.es/19632/1/INVE_MEM_2011_123564.pdf)
- ⁸ <https://www.hydrogeninsight.com/innovation/us-government-announces-46m-of-new-funding-to-advance-hydrogen-technologies/2-1-1729534>
- ⁹ <https://afdc.energy.gov/vehicles/fuel-cell>
- ¹⁰ <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-fuel-cell-electric-cars-work>