

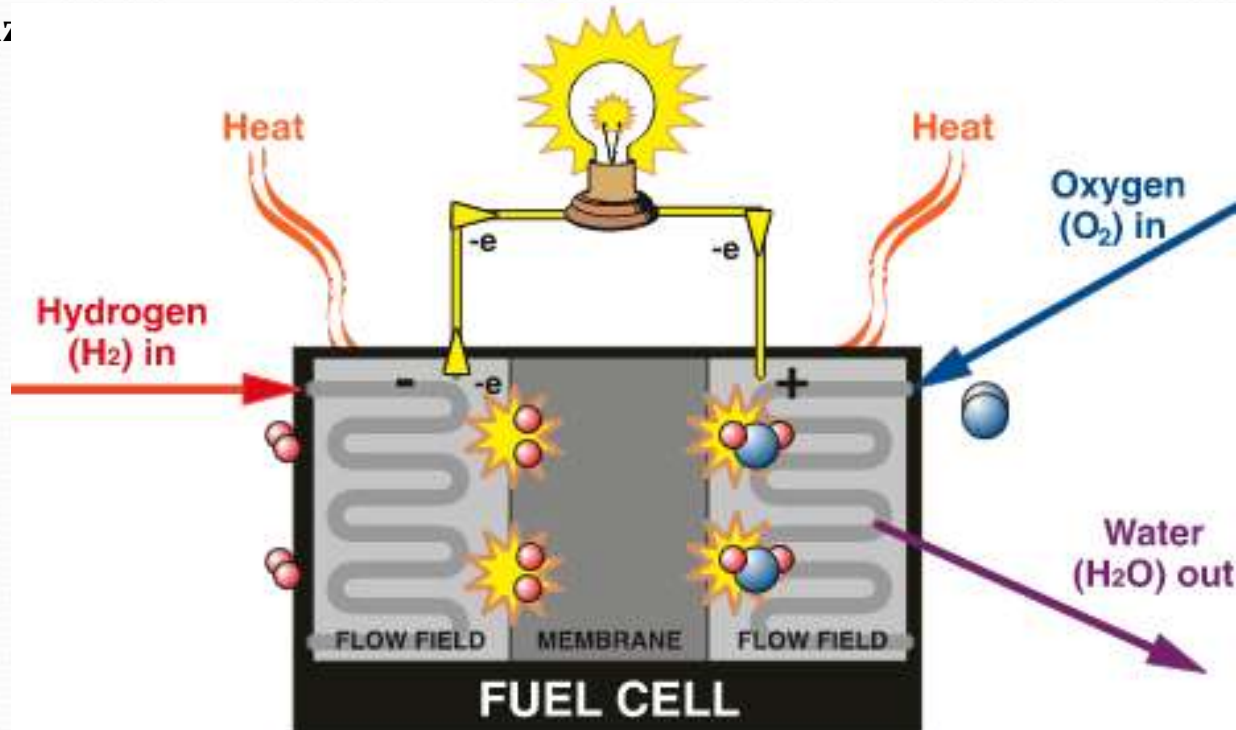
FUEL CELL

Conoscenze Attuali e sviluppi futuri

Forum Energia Alternativa
Conferenza del 27 Marzo 2015
415° Fiera Nazionale di Grottaferrata
Relatore: Dott. Giovanni Merola

Fuel Cell

- Le celle a combustibile (Fuel Cells) sono sistemi elettrochimici capaci di convertire l'energia chimica di un combustibile (in genere idrogeno) e di un comburente (ossigeno o aria) direttamente in energia elettrica, senza l'intervento intermedio di un ciclo termico, ottenendo pertanto rendimenti di conversione più elevati (>60%) rispetto a quelli delle macchine termiche convenz



Combustione dell'idrogeno a confronto con le fuel cells

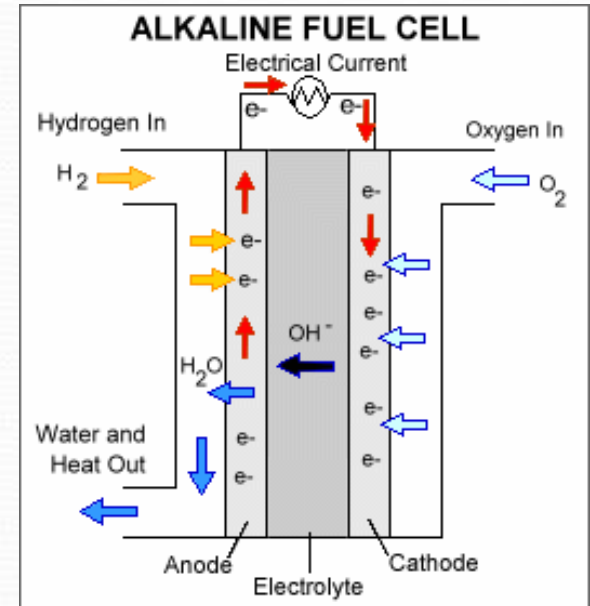
L'efficienza delle fuel cells è nettamente superiore a quella dei motori a combustione interna di idrogeno, e si può ampiamente superare il limite del rendimento di Carnot.

L'efficienza di un ciclo termico di combustione è poco soddisfacente a basse temperature; è interessante solo a temperature molto alte e difficili da raggiungere a causa dei limiti strutturali e dei costi elevati. Inoltre gli organi meccanici in movimento dissipano molta energia in attriti.

Dal punto di vista delle emissioni risulta una lotta impari. I sistemi a fuel cell risultano non inquinanti, mentre i motori termici rilasciano nell'atmosfera pericolose sostanze per l'organismo derivanti dalla combustione con componenti di azoto.

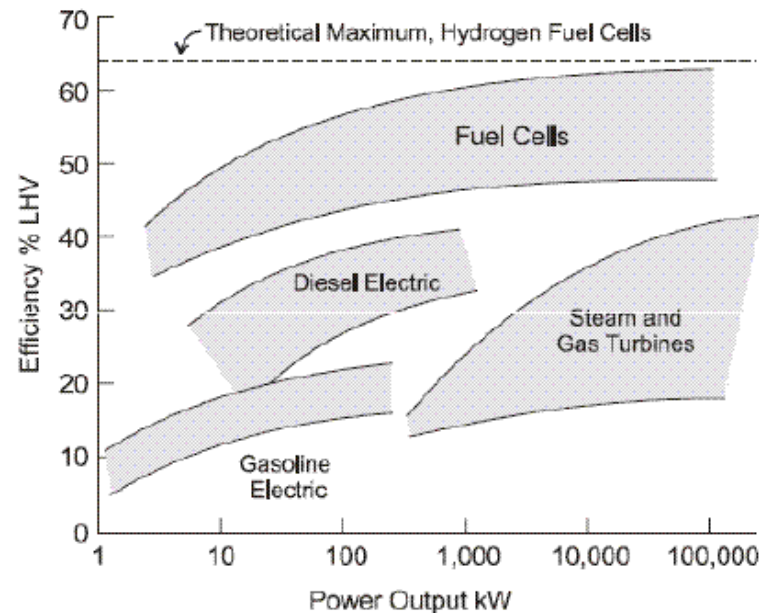
Fuel Cell Storia

- La prima cella a combustibile fu costruita da Sir William Grove nel 1839 che utilizzò elettrodi di platino e acido solforico in qualità di elettrolita. In seguito, a partire dal 1890, William White Jacques utilizzò l'acido fosforico al posto dell'acido solforico. Questi primi dispositivi erano tuttavia caratterizzati da una bassa densità di corrente (basso rendimento).
- Bacon, dopo il 1930, sostituì l'elettrolita acido delle prime celle con un elettrolita alcalino e continuò a sviluppare il sistema (Cella di Bacon) oggi noto con l'acronimo AFC (Alkaline Fuel Cells). Le AFC furono così apprezzate che negli anni '60 furono scelte dalla NASA per la missione lunare APOLLO.
- Alla fine degli anni '50 iniziò l'impiego e lo sviluppo delle PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell), celle che utilizzano come elettrolita una speciale membrana di polimeri per lo scambio di protoni. La produzione si sviluppò negli USA e fu utilizzata dalla NASA per il progetto spaziale GEMINI.



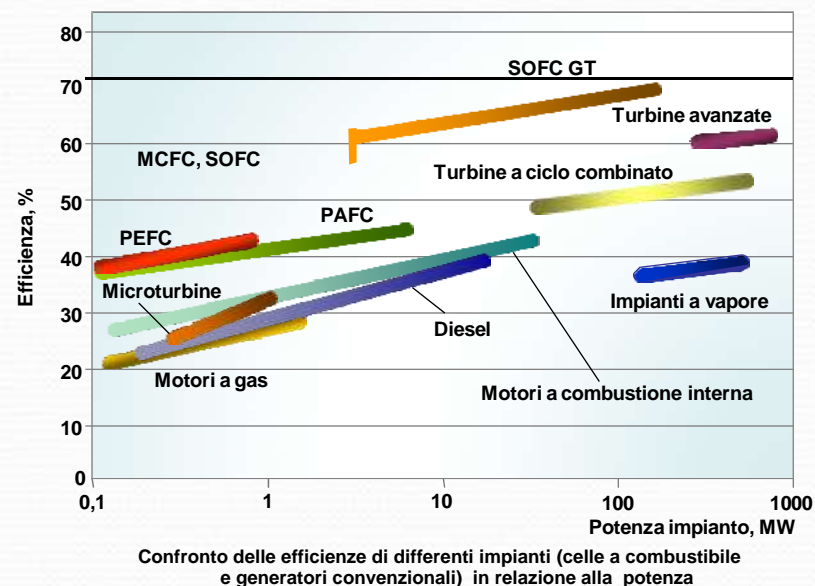
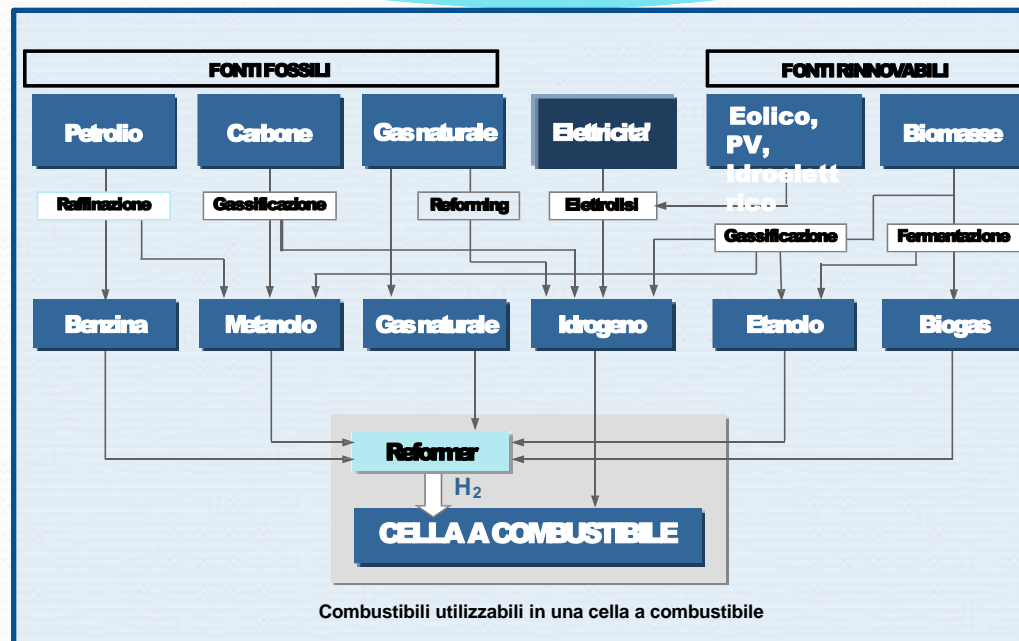
Tipi di tecnologia Fuel cell

Tipi di tecnologia Fuel cell	Condizioni operative	resa
PEM (Proton Exchange Membrane)	80 ÷ 100 °C; 1 ÷ 8 atm	36÷38 %
PAFC (Phosforic Acid Fuel Cell)	150 ÷ 250 °C; 1 ÷ 8 atm	40 %
AFC (Alcaline Fuel Cell)	80 ÷ 250 °C; 1 ÷ 10 atm	50÷60 %
MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)	600 ÷ 700 °C; 1 ÷ 10 atm	50÷55 %
SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)	800 ÷ 1000 °C; 10 atm	50÷55 %



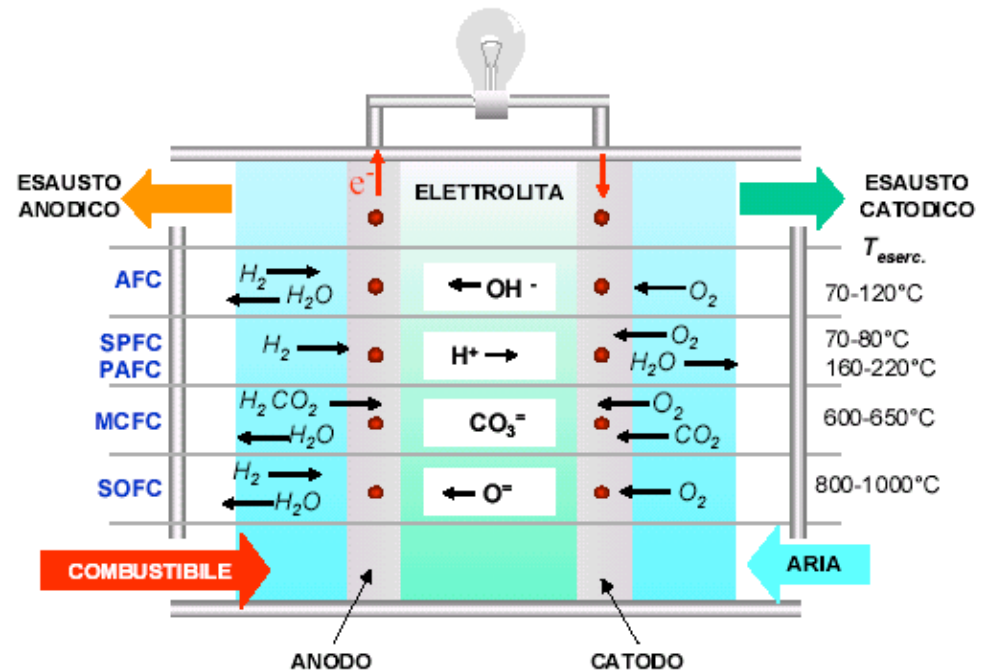
lower heating value (LHV)

- Rendimento elettrico elevato**, con valori che vanno dal 40-48% (riferito al potere calorifico inferiore del combustibile) per gli impianti con celle a bassa temperatura, fino a raggiungere oltre il 60% per quelli con celle ad alta temperatura utilizzate in cicli combinati.
- Possibilità di utilizzo di una ampia gamma di combustibili** come metano, metanolo, gas naturale, gas di sintesi (prodotto da combustibili liquidi, gassificazione del carbone, biomasse).
- Modularità**, che permette di accrescere la potenza installata via via che cresce la domanda di energia elettrica, con notevoli risparmi sul piano economico e con tempi di costruzione che possono risultare notevolmente ridotti.
- Efficienza indipendente dal carico e dalle dimensioni dell'impianto**. Il rendimento delle celle è poco sensibile alle variazioni del carico elettrico, diversamente da quanto si verifica con gli impianti convenzionali. In pratica una cella può operare tra il 30 e il 100% di carico, senza perdite consistenti di efficienza. Il rendimento è inoltre indipendente dalla potenza installata entro un ampio intervallo di potenza, mentre negli impianti tradizionali il rendimento diminuisce al decrescere della taglia dell'impianto.
- Ridotto impatto ambientale**, sia dal punto di vista delle emissioni gassose che di quelle acustiche, il che consente di collocare gli impianti anche in aree residenziali, rendendo il sistema particolarmente adatto alla produzione di energia elettrica distribuita.
- Possibilità di cogenerazione**. Il calore cogenerato può essere disponibile a diversa temperatura, in forma di vapore o acqua calda, ed impiegato per usi sanitari, condizionamento di ambienti, ecc..

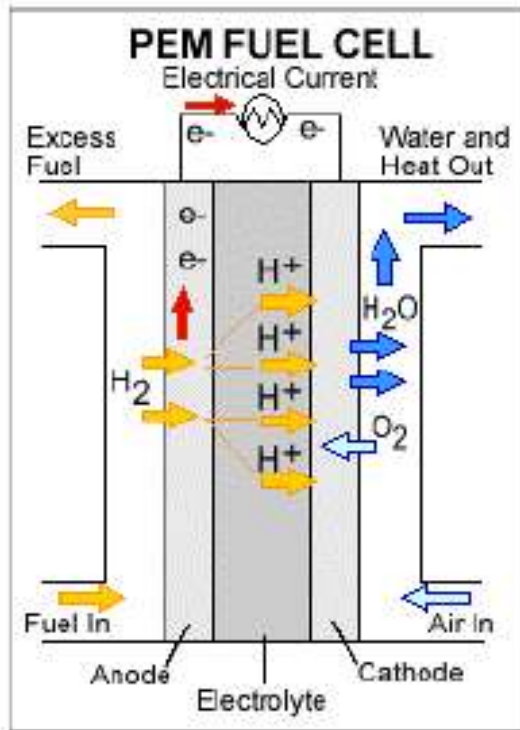


FUNZIONAMENTO E CLASSIFICAZIONE DELLE FC

- ✓ AFC
Alkaline Fuel Cell
- ✓ PEMFC (SPFC)
Proton Exchange Membrane
Fuel Cell
- ✓ PAFC
Phosphoric Acid Fuel Cell
- ✓ MCFC
Phosphoric Acid Fuel Cell
- ✓ MCFC
Molten Carbonate Fuel Cell
- ✓ SOFC
Solid Oxide Fuel Cell

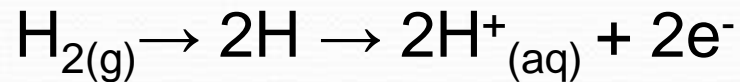


Schema di cella a combustibile

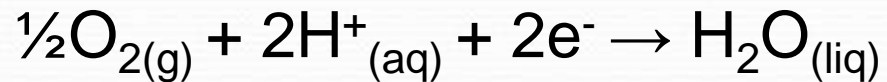


PEM:
Protonic Exchange Membrane

Anodo:

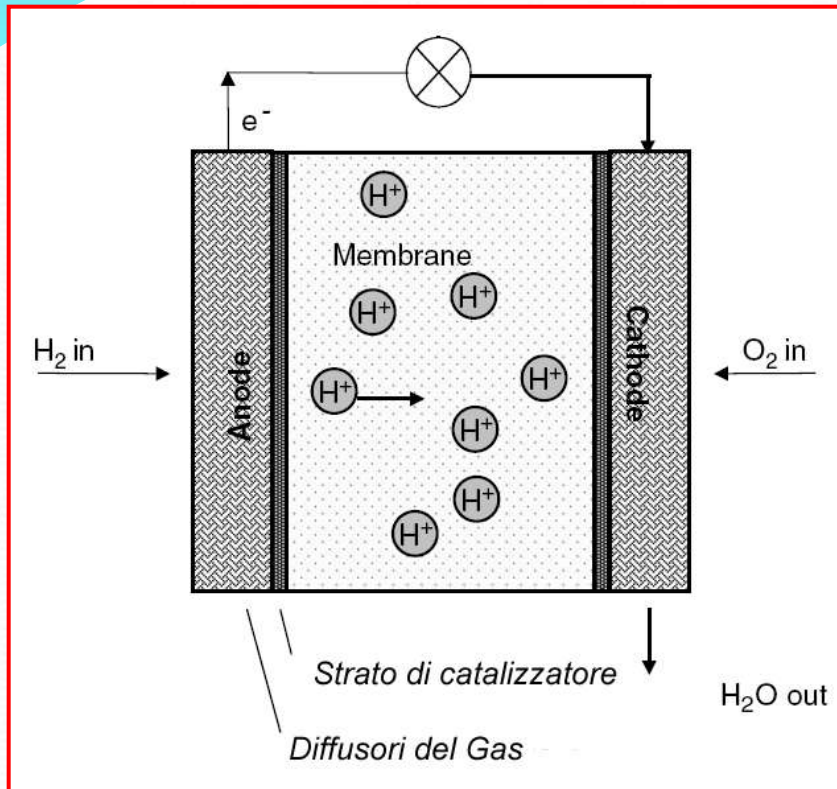


Catodo:



E' un sistema elettrochimico che permette di convertire l'energia chimica in energia elettrica ed è concettualmente l'inverso dell'elettrolisi dell'acqua

PEM: Cella ad elettrolita polimerico



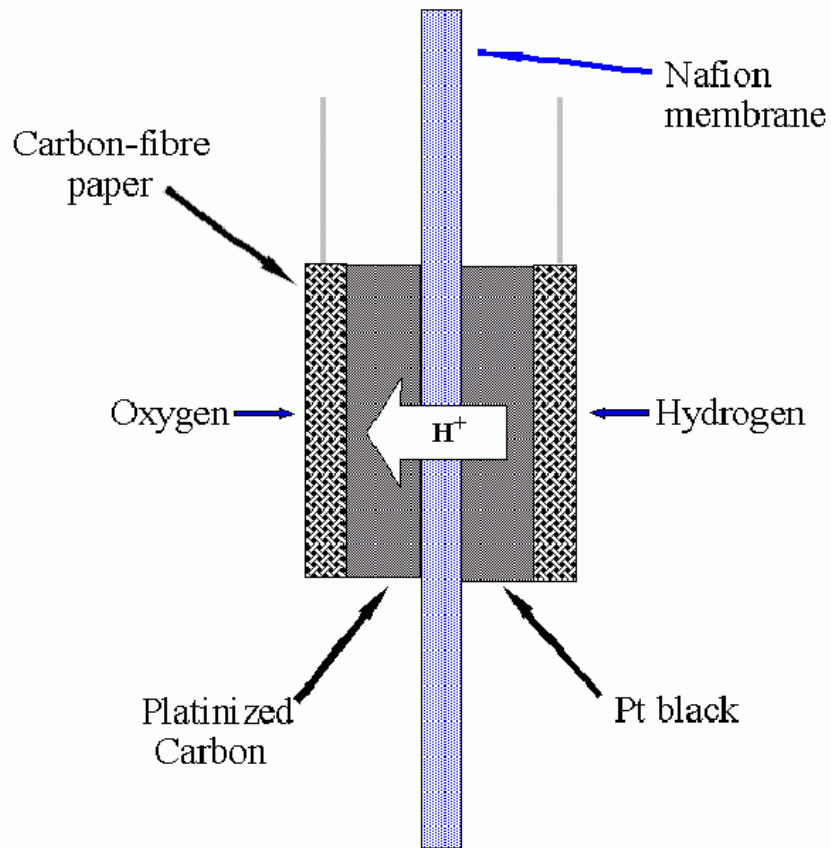
PREGI

- ✓ Bassa Temperatura di funzionamento
- ✓ Facilità di avviamento (ordine del minuto)
- ✓ Elevata densità di potenza
- ✓ Assenza di problemi di corrosione tipici di altri tipi di celle con elettrolita liquido
- ✓ Relativa semplicità costruttiva

DIFETTI

- ✓ Scarsa tolleranza alla presenza del CO nel combustibile
- ✓ difficile integrazione termica fra il sistema di trattamento del combustibile e lo stack

Componenti di PEMFC



- MEA (membrane-electrode assembly), assemblato membrana elettrolitica più elettrodi catalizzatori
75 ÷ 300µm
- GDL (gas diffusion layer)
100 ÷ 300 µm
- BP (bipolar plates)

CONFIGURAZIONE DEI VEICOLI A CELLE A COMBUSTIBILE

In un veicolo a celle a combustibile l'energia prodotta dallo stack fa muovere un motore elettrico, il quale fornisce la propulsione necessaria agli organi di trasmissione del veicolo.

Per generare energia, l'unità costituita dalle celle a combustibile deve essere integrata in

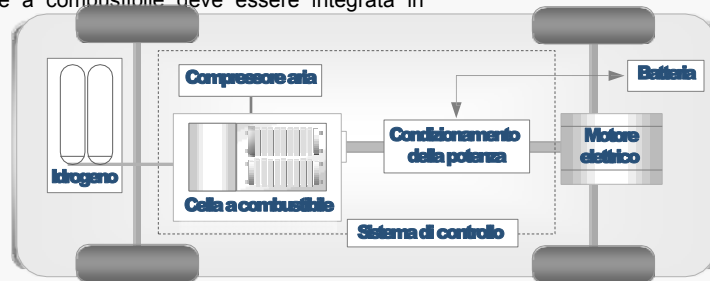
un sistema completo che comprende una sezione di alimentazione del combustibile e dell'aria, un sistema di condizionamento della potenza elettrica, un sistema di recupero del calore sviluppato ed infine una sezione di regolazione e controllo.

Per il sistema di generazione da installare a bordo si possono considerare diverse alternative, a seconda delle scelte effettuate riguardo al combustibile utilizzato (idrogeno, metanolo o benzina) ed alla configurazione del sistema di propulsione.

Abbiamo sistemi in cui la potenza elettrica è fornita esclusivamente dalla cella e sistemi ibridi, in cui la trazione è affidata ad un motore azionato dalla cella ed un sistema di accumulo di energia (batteria o supercondensatore) fornisce il complemento di energia necessario in caso di forti accelerazioni e consente il recupero di energia di frenata.

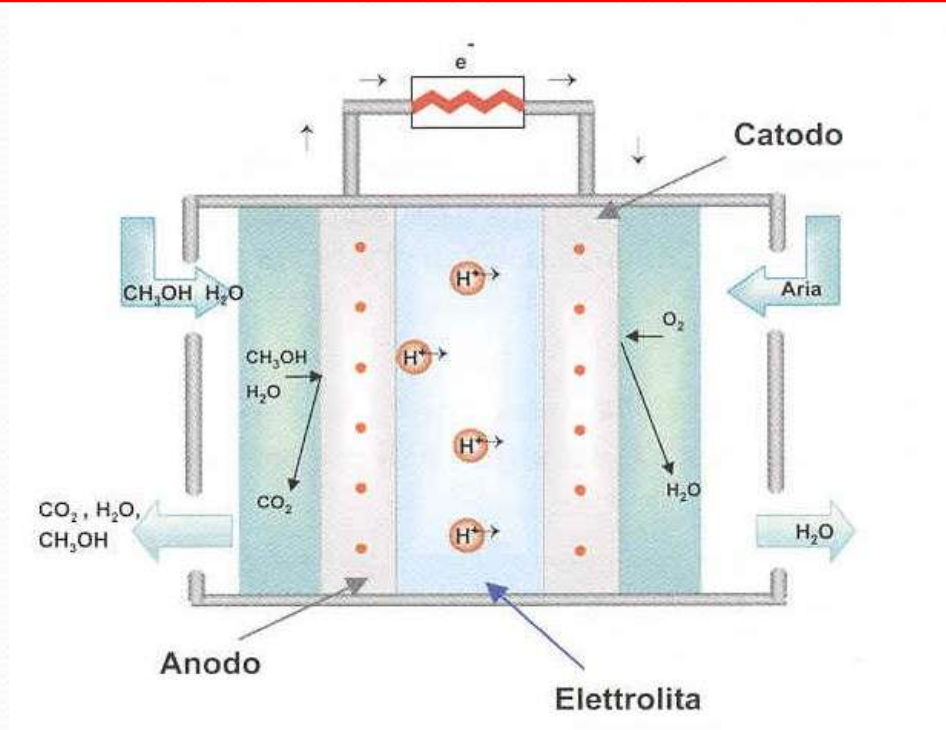
Se la cella copre meno del 25% della potenza si parla di configurazione "range extender", in questo caso la cella funge da sorgente ausiliare di potenza (APU, Auxiliary Power Unit) e viene usata per aumentare l'autonomia del veicolo e per la ricarica delle batterie.

In linea di principio per beneficiare al massimo dei vantaggi energetici ed ambientali delle celle a combustibile rispetto ai motori convenzionali la quota di potenza coperta dalla cella dovrebbe essere in genere la più alta possibile.

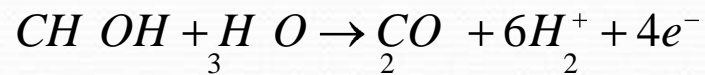


Schema di veicolo ibrido a celle a combustibile

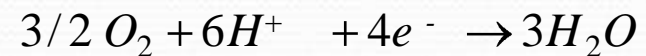
Celle a metanolo diretto (DMFC)



Reazione anodica



Reazione catodica

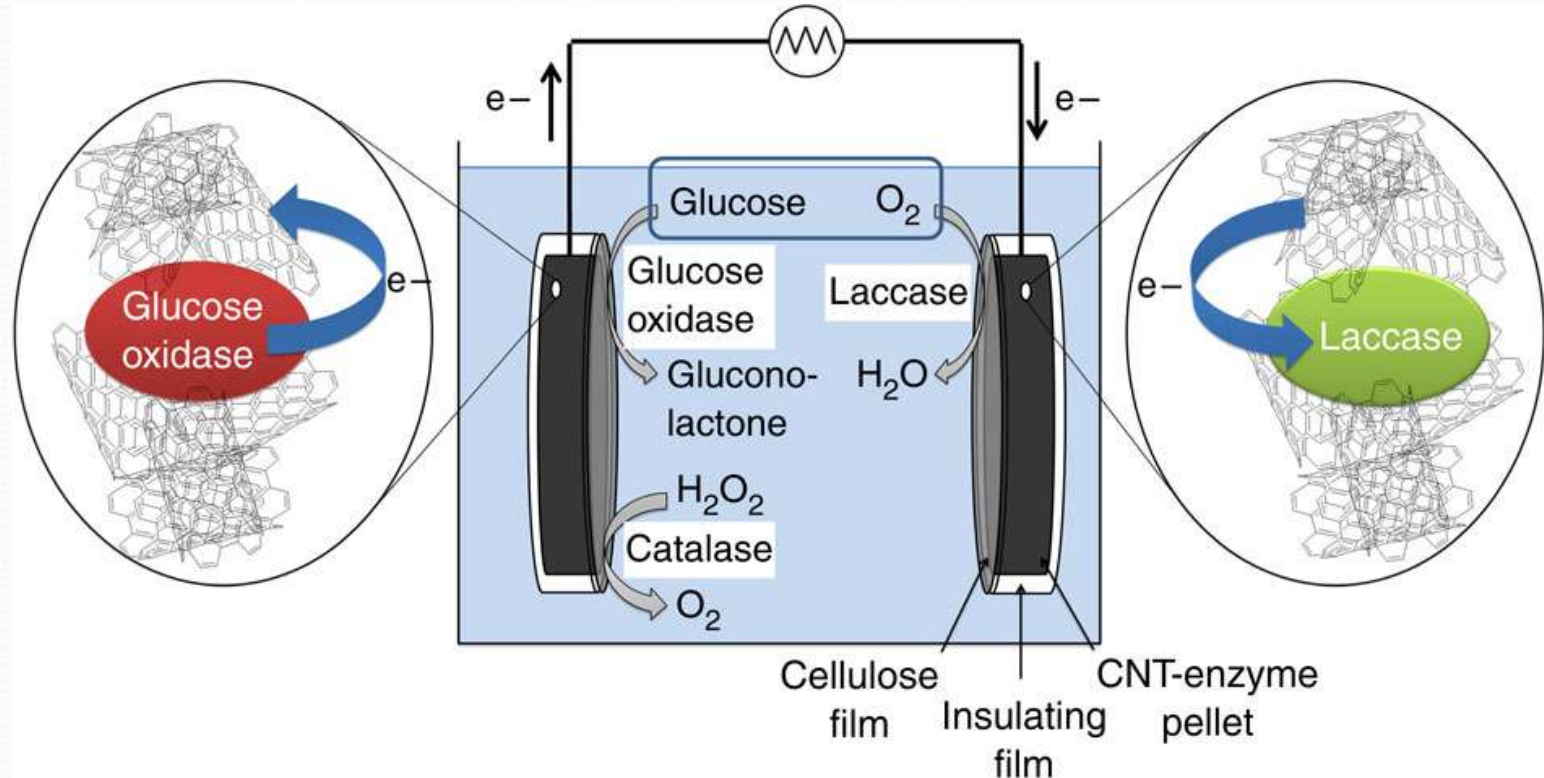


Principali caratteristiche

- Sono Celle relativamente “recenti” ed utilizzano direttamente il metanolo nella camera anodica.
- L’elettrolita è composto da una membrana polimerica come nelle celle PEM
- La temperatura di esercizio è compresa tra i 70 ed i 100 C
- Attualmente l’efficienza è attorno al 35%, mentre la densità di potenza è di circa 180-250 mW/cm²
- Le attuali applicazioni (non in commercio) delle celle DMFC riguardano generatori di piccolissima potenza, qualche decina di Watt, in sostituzione delle usuali batterie per calcolatori, radiotelefoni, ecc. Interessanti prospettive sembrano esserci nel campo della trazione stradale.

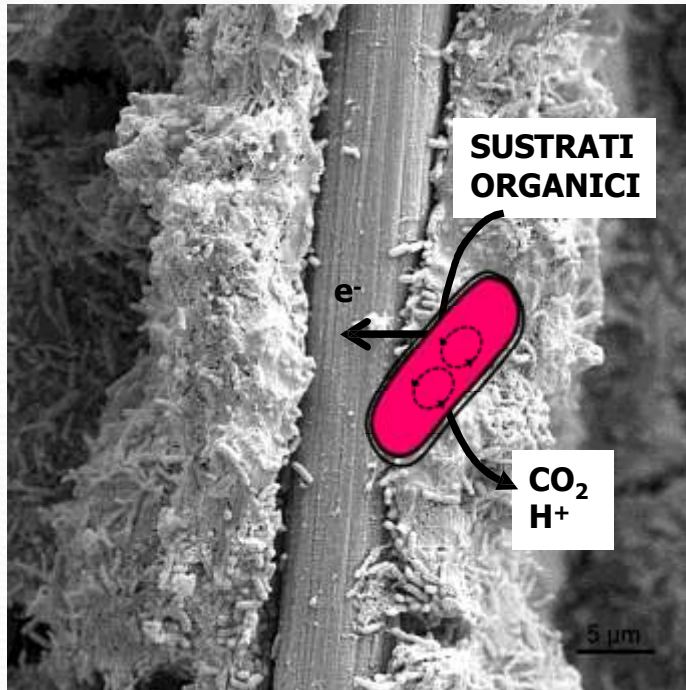
Fuel cell Enzimatische

Mediatorless high-power glucose biofuel cells based on compressed carbon nanotube-enzyme electrodes, Abdelkader Zebda, Chantal Gondran, Alan Le Goff, Michael Holzinger, Philippe Cinquin & Serge Cosnier, Nature Communications 2, Article number: 370 doi:10.1038/ncomms1365



Processi bioelettrochimici

Si basano sull'impiego di colture microbiche "elettricamente-attive", in grado di scambiare elettroni con elettrodi a stato solido per:



- Generare **energia elettrica** dal trattamento di acque reflue (celle a combustibile microbiche) **MFC**.
- Generare **Combustibili o Prodotti Chimici** dal trattamento di acque reflue (celle di elettrolisi microbica) **MEC**.
- Degradare **inquinanti ambientali** (risanamento falde contaminate)

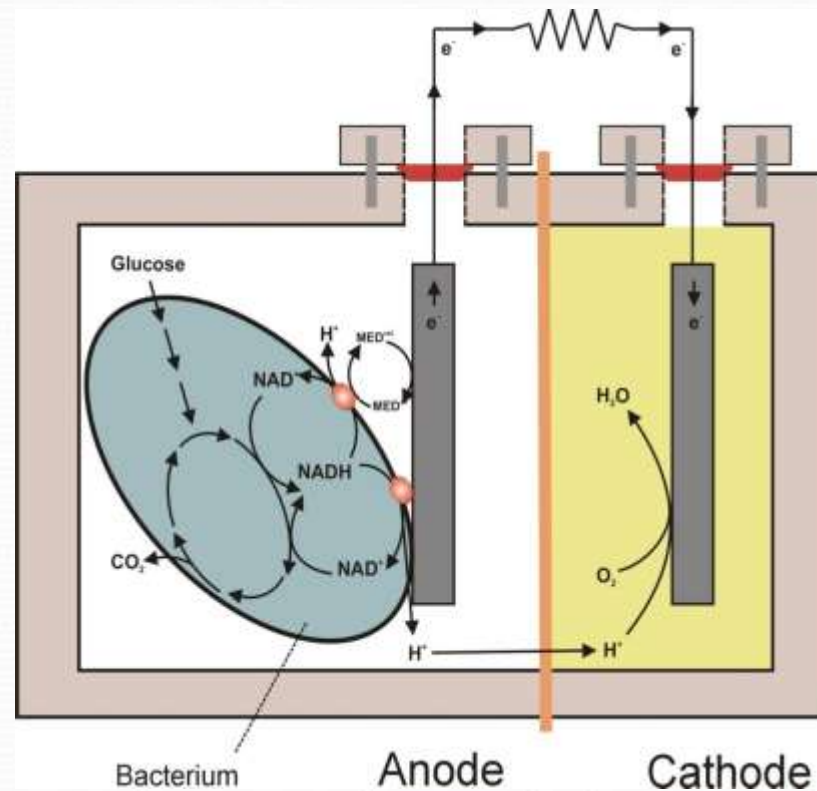
Possibilità di controllare/monitorare il processo biologico attraverso misure di corrente/potenziale elettrodico

Elevata flessibilità e versatilità

Celle a combustibile microbiche (microbial fuel cells, MFC)

Anodo

Respirazione "anaerobica", ossidazione Biologica in cui l'anodo funge da accettore esterno di elettroni (al posto dell'ossigeno)



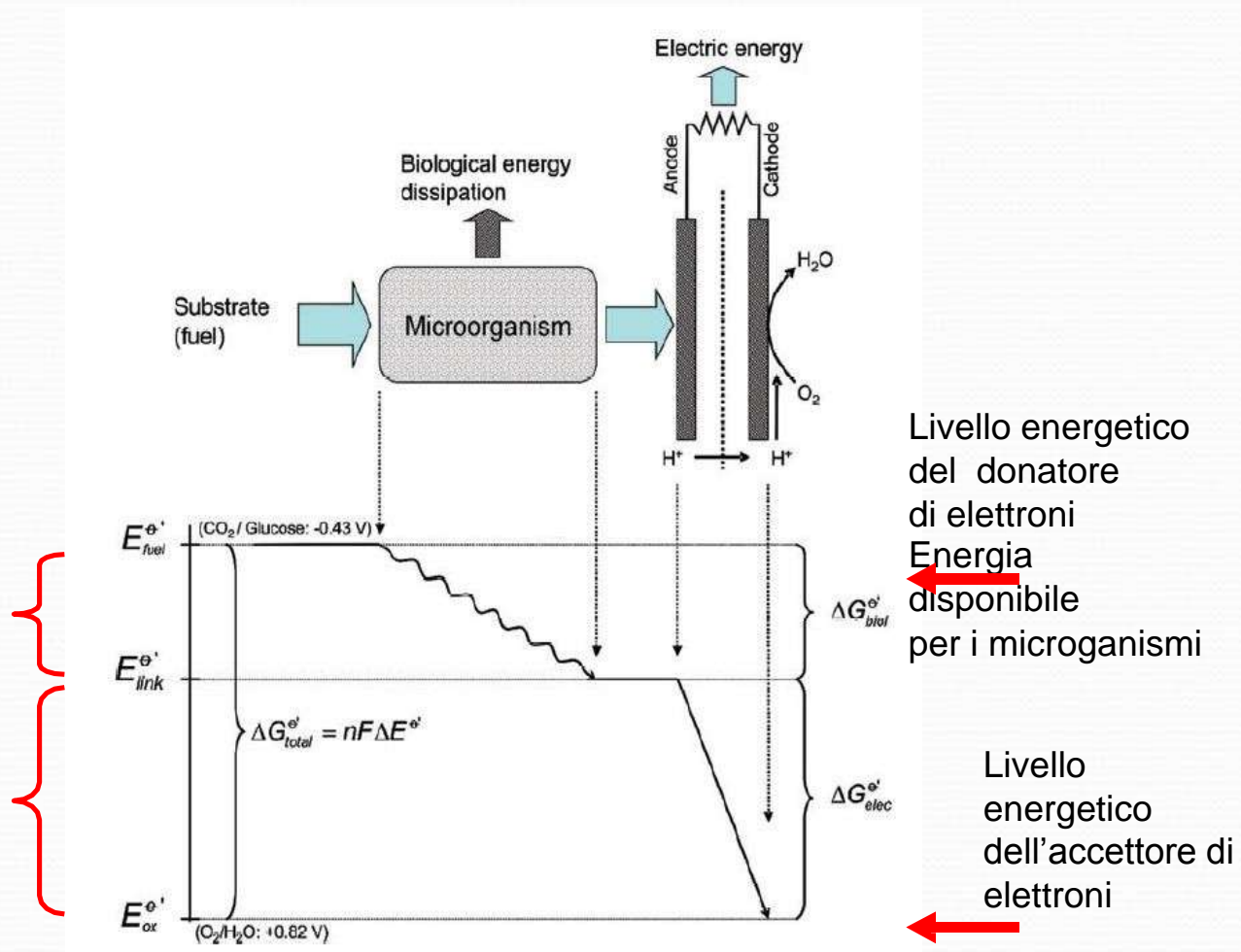
Catodo

Riduzione elettrochimica dell'ossigeno in cui il catodo funge da donatore di elettroni

K. Rabaey et al., Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy regeneration, Trends Biotechnol., 23, 291-298, 2005.

Flusso di energia in una MFC

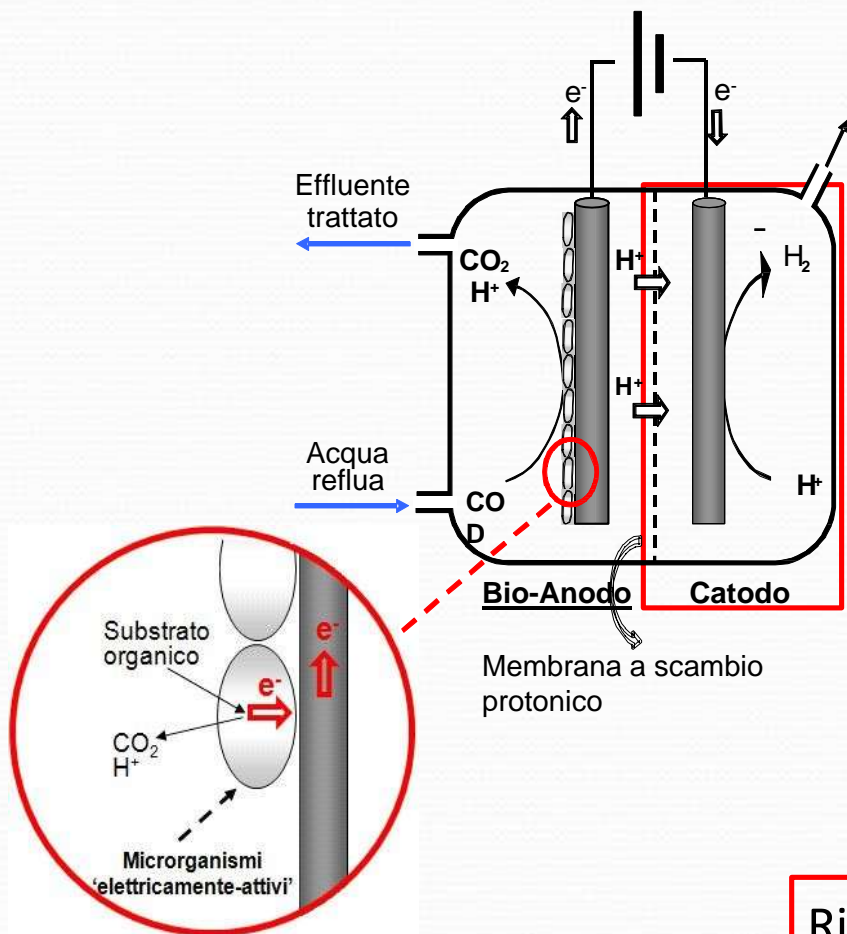
Energia elettrica



Livello energetico del donatore di elettroni
 Energia disponibile per i microrganismi
 Livello energetico dell'accettore di elettroni

Celle di elettrolisi microbica (MEC):

In una MEC, l'ossidazione biologica di substrati organici (all' anodo) è accoppiata alla generazione di combustibili o prodotti chimici (catodo)



Reazione anodica:

i microrganismi catalizzano l'ossidazione della sostanza organica utilizzando l'elettrodo come accettore esterno di elettroni

Reazione catodica:

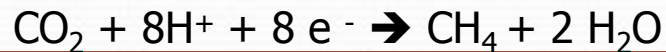
attraverso l'aggiunta di energia elettrica dall'esterno ed in presenza di un opportuno catalizzatore (tipicamente a base di metalli nobili) è possibile ottenere al catodo prodotti di interesse (quali idrogeno molecolare, $E' = -0.41 \text{ V, vs SHE}$)



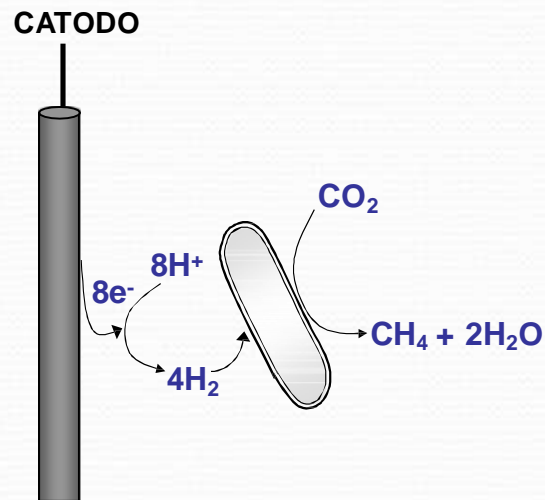
Ricerca di catodi alternativi, a elevata efficienza e di basso costo

Catodi biologici per la produzione di Metano

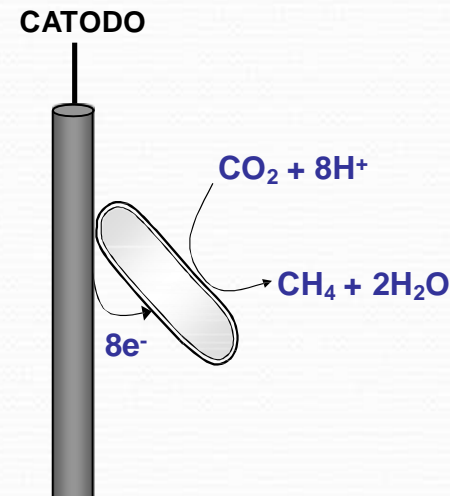
Microrganismi metanigeni catalizzano la riduzione dell'anidride carbonica a metano utilizzando un elettrodo di grafite polarizzato come donatore di elettroni:



$$E' = -0.244 \text{ V vs. SHE}$$

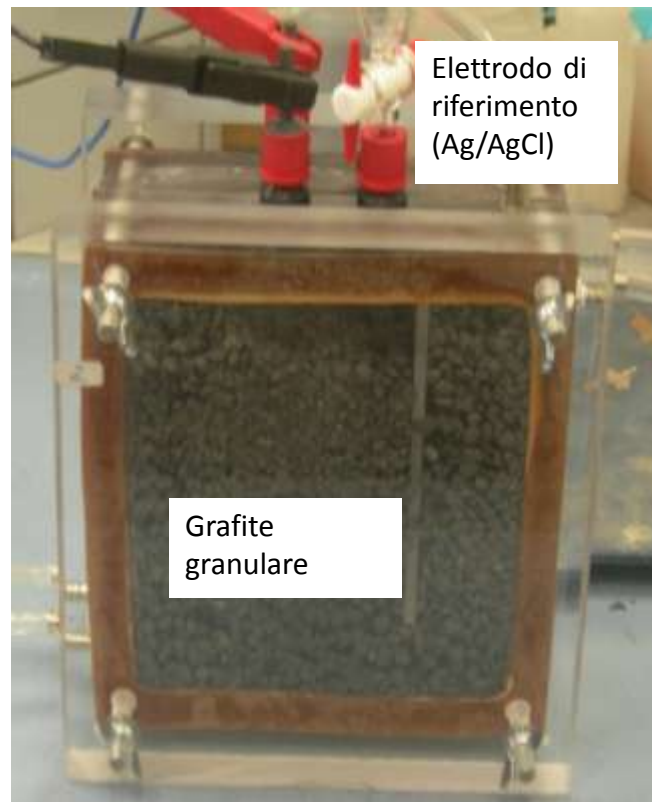
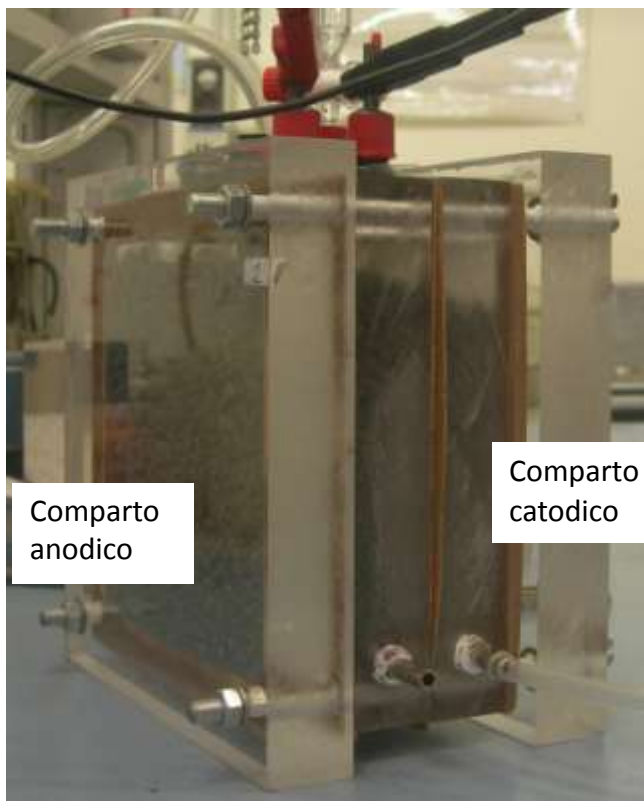


❑ Trasferimento di elettroni **mediato** da H₂



❑ Trasferimento **diretto** di elettroni

Tratto da Villano M., Aulenta F., Ciucci C., Ferri T., Giuliano A., Majone M. (2010) "Bioelectrochemical reduction of CO₂ to CH₄ via direct and indirect extracellular electron transfer by a hydrogenophilic methanogenic culture" *Biores. Technol.* 101: 3085-3090



Riferimenti

- Corso di: MISURE INDUSTRIALI II del prof. Z. Del Prete, Metodologie di misura per sistemi a celle a combustibile, Dispense a cura de l'ing. Pierluigi Schiavetti.
- Tesi di Laurea: L'idrogeno futuro protagonista nel modo dell'automobile, Cavezzali Giampaolo, A.A 2011/12 Univ. di Padova.
- http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/transportation_inuse.html
- Noro M., 2010, Celle a combustibile, tecnologia e possibilità applicative, Dario Flaccovio Editore •
- Rossi Enzo, Italia 2006, Andare ad Idrogeno, MEDIA 3000 •
- Spadoni Arsenio, 2009, "Fuel cell, elettricità dall'idrogeno", Elettronica in oltre l'elettronica, anno XV n.143
- Development of Direct Methanol Fuel Cell and Special Proton Exchange Membranes Impervious to Methanol by Professor Anil Kumar Department of Chemical Engineering Indian Institute of Technology Kanpur, Kanpur – 208016 (India)
- http://www.miniwatt.it/mwarchivio/mwb2011/mw11110_Tecno_Idrogeno%20da%20fanghi.pdf
- **Stato dell'arte sulle celle a combustibile microbiche, risultati delle prove di laboratorio**, Pierangela Cristiani, Michela Tribuzio
- Celle di elettrolisi microbica, **Evidenze a scala di laboratorio e potenziali applicazioni per la depurazione di acque reflue con minima produzione di fanghi e con recupero di energia**, Marianna Villano, Federico Aulenta*, Mauro Majone, Univ. La Sapienza
- Celle a combustibile Stato di sviluppo e prospettive della tecnologia, *Marina Ronchetti*, Report RSE/2009/180, ENEA
- CELLE A COMBUSTIBILE Principi di funzionamento, applicazioni e prospettive Corso di Sistemi Energetici A.A. 2002-2003



Grazie per l'attenzione

www.energialternativa.org

•Celle a bassa e media temperatura

Le celle caratterizzate da temperature di utilizzo basse, minori di 100 °C, data la suddivisione vista sopra, sono le PEM-FC, le A-FC e le DM-FC. Scegliendo una di queste, vengono impiegati materiali costruttivi poco pregiati, quindi più economici, però di contro, proprio a causa delle basse temperature di utilizzo, necessitano di un catalizzatore costituito da metalli nobili molto costosi. Impiegando celle che lavorano a temperature basse, inoltre, i rendimenti sono inferiori soprattutto se consideriamo impianti cogenerativi, poiché il calore che si può sfruttare è decisamente più basso. I rendimenti senza cogenerazione sono del 45% - 55% (il valore più alto si ha nelle AFC). Un ulteriore aspetto negativo nell'impiego di queste celle è che esse hanno bisogno di idrogeno puro e quindi necessitano di un sistema di trattamento del combustibile. Per le loro caratteristiche e per il peso complessivo, questi tipi di cella sono particolarmente adatti per impieghi veicolari.

•Celle ad alta temperatura

In questo elenco mettiamo le rimanenti tre famiglie di fuel cells: le SO-FC, le MC-FC, e le PA-FC (considerate a media temperatura). Le caratteristiche sono opposte rispetto alle fuel cell a bassa temperatura. I rendimenti sono più elevati tra i 50% e i 65% (valore che può arrivare anche al 90% nel caso di impianti a cogenerazione). Non vi sono costi per i catalizzatori, poiché la reazione riesce ad attivarsi con le alte temperature, però, per essere prestazionali gli elettrodi devono essere studiati per resistere agli shock termici. Dati i loro valori di rendimento e le loro caratteristiche tecniche, queste famiglie di fuel cells vengono impiegate per lo più negli impianti stazionari per la produzione di energia elettrica.

ALCALINE. Efficienza fino al 70%, producono acqua come emissione. Nate sul finire degli anni '30 grazie a Francis T. Bacon. Nei confronti di altri tipi di celle (ad esempio celle ad acido fosforico), le AFC presentano una serie di vantaggi:

- ✓ rendimenti elettrici che possono raggiungere il 65%,
- ✓ costi non elevati dei componenti costituenti la cella,
- ✓ tempi di vita lunghi (dimostrate 10.000-15.000 ore) dovuti alla buona compatibilità dei materiali di cella.

La principale limitazione delle AFC è la bassa tolleranza alle impurezze presenti nei gas reagenti.

PEM (Proton Exchange Membrane). Utilizza come elettrolita una membrana plastica. E' molto leggera e lavora a basse temperature (80 C) con un'efficienza del 40-50%. Può utilizzare, con un reformer, metanolo o benzina. E' stata inventata dalla General Electric all'inizio degli anni '60 per le Forze Armate americane. In seguito saranno analizzate più in dettaglio.

ACIDO FOSFORICO. Parte da una efficienza del 40-50% e arriva all'80 con la cogenerazione. In commercio ce ne sono da 200 kW. Operano a temperature prossime a 200 C con un elettrolita costituito da una soluzione concentrata di acido fosforico. I sistemi che utilizzano questo tipo di celle sono caratterizzati da un'efficienza elettrica tra il 37 ed il 42% e consentono di disporre di calore ad una temperatura tale da poter essere sfruttato sia all'interno dell'impianto, che per utenze esterne di cogenerazione. La temperatura di funzionamento della cella è abbastanza elevata da non richiedere gas di alimentazione estremamente puri, ma non così alta da creare problemi legati ai materiali.

CARBONATO FUSO. Le celle a carbonati fusi (MCFC, Molten Carbonate Fuel Cell) impiegano un elettrolita costituito da una soluzione di carbonati alcalini, liquidi alla temperatura di funzionamento della cella (650 °C), contenuti in una matrice ceramica porosa ed elettrodi a base di nichel (nichel cromo all'anodo, ossido di nichel litiato al catodo). Rispetto alle celle che operano a bassa temperatura presentano alcuni vantaggi:

- ✓ cinetiche di reazioni più veloci che eliminano il bisogno di metalli preziosi come catalizzatori;
- ✓ maggiore flessibilità nell'uso di combustibili, con possibilità di alimentare la cella direttamente con gas naturale o distillati leggeri senza stadio di riforma esterna del combustibile;
- ✓ possibilità di cogenerare a temperature d'interesse industriale.

Con esse è possibile, in prospettiva, realizzare impianti con efficienze più elevate (ottenute efficienze > 45%, possibilità di arrivare al 60-70% in cicli combinati con turbina) di quelle che si registrano con celle a bassa temperatura. Le alte temperature di funzionamento e l'elevata corrosività dell'elettrolita pongono tuttavia problemi di stabilità strutturale ai componenti di cella e questi fanno sì che la tecnologia stia incontrando ancora difficoltà ad affermarsi.

SOFC (Solid Oxide Fuel Cell). Sono considerate le più ricercate tra le pile che usano carburanti basati su idrocarburi. Infatti risultano semplici, altamente efficienti, tolleranti alle impurità e possono fare il reforming internamente alla cella. L' elettrolita e' formato da ossido di zirconio stabilizzato con ossido di ittrio; il catodo e' costituito da manganito di lantanio opportunamente trattato, l'anodo da un cermet a base di nichel-ossido di zirconio (temperatura media di esercizio: 800-1000 °C). Con una temperatura di funzionamento dell'ordine dei 1000 °C il calore di scarto che le celle ad ossidi solidi mettono a disposizione può essere utilizzato nell'ambito di cicli in combinazione con turbine a gas. I problemi che restano ancora da risolvere per questa tecnologia sono essenzialmente legati al degrado dei materiali ed al loro assemblaggio.

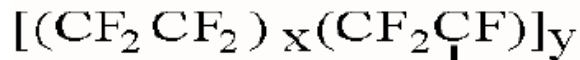
Membrana elettrolitica

(elettrolita polimerico solido)

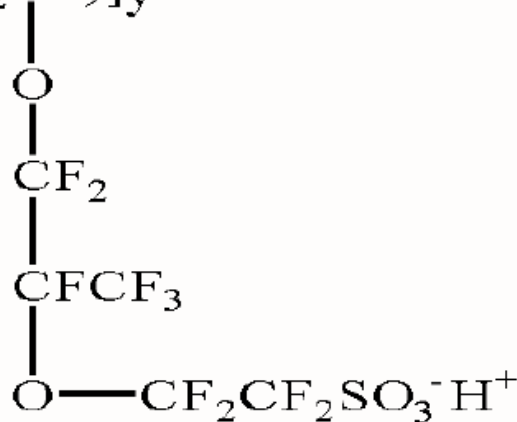
- Funzioni:
- barriera fisica per separare le due semireazioni
- conduttore di protoni (H^+)
- isolante per le cariche libere elettroniche (e^-)
- impermeabile ai liquidi

Nafion

(membrana di acido perfluorosolfonico)

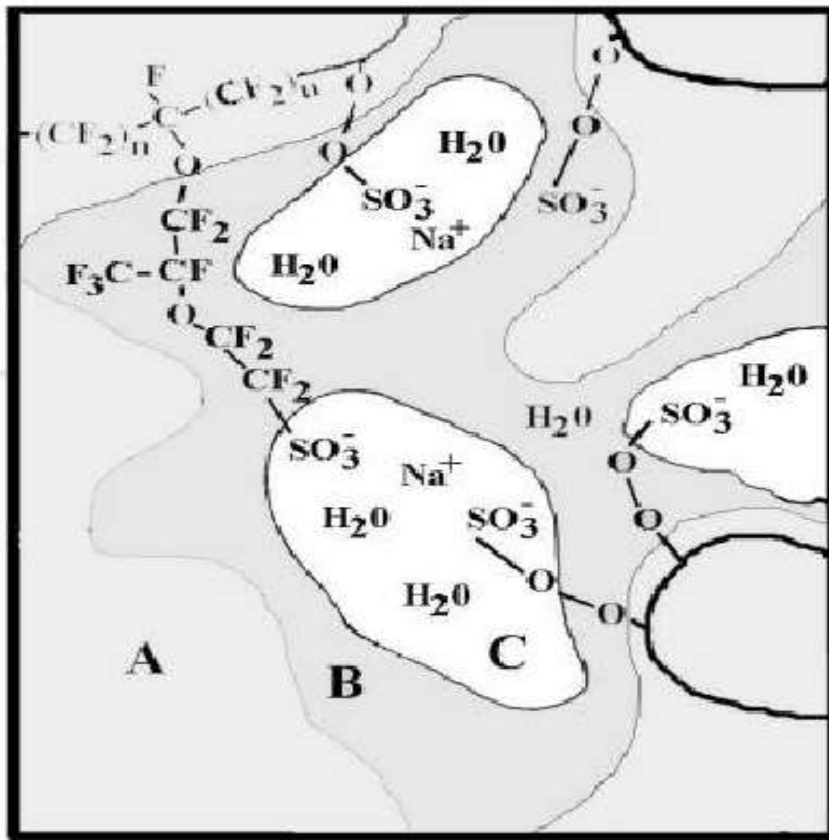


Nafion



- Caratteristiche:
- resistenza meccanica
- insolubile in acqua
- isolante rispetto agli e⁻
- stabilità chimica
- stabilità termica
- conduzione protonica
- > molto costoso

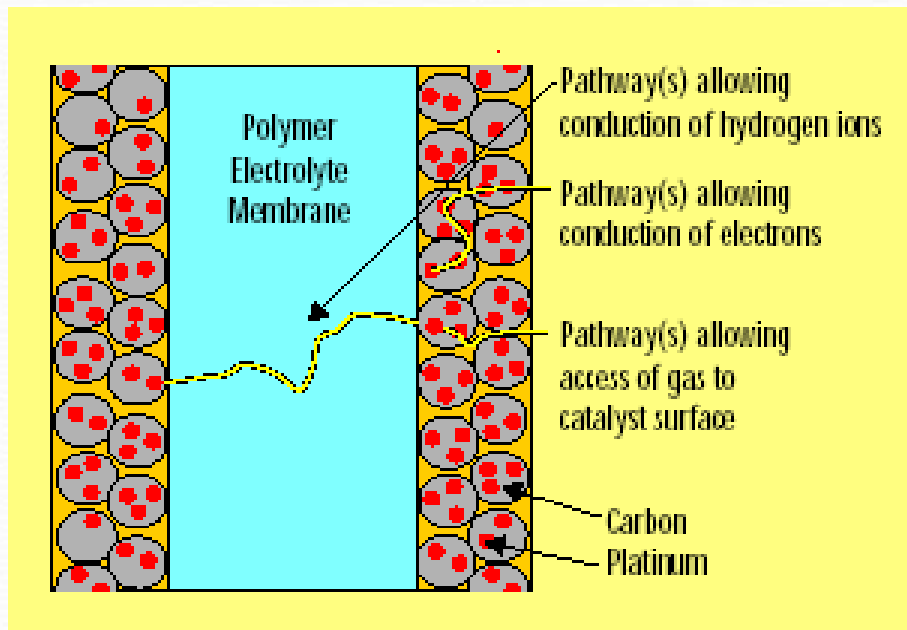
Microstruttura del Nafion



- A) spina dorsale fluorocarbonica, centinaia di unità ripetitive $-CF_2-CF-CF_2-$
- B) gruppi solfonati non clusterizzati e catene laterali, che connettono la spina dorsale molecolare con la terza regione
- C) clusters ionici sferici, che consistono di ioni dell'acido solfonico SO_3^-/Na^+ ; conferiscono elevata idrofilia

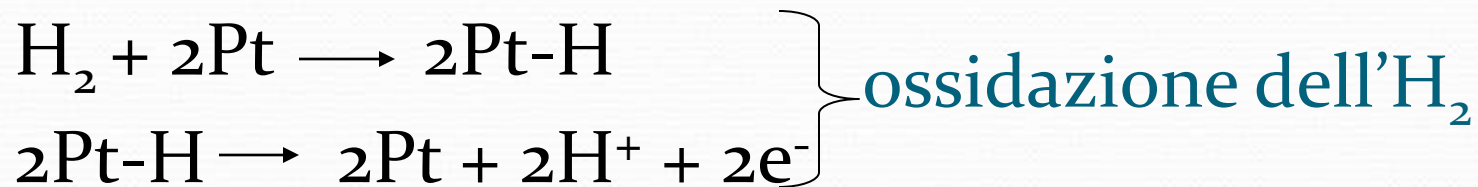
Elettrodi catalizzatori (10÷50 mm)

substrato di grafite con nanoparticelle di Pt disperse



- Diffusione omogenea dei gas reagenti
- Buona conducibilità
- Alta area superficiale del catalizzatore metallico
- Capacità del metallo di attivare l'idrogeno e l'ossigeno

✓ Elettro-catalizzatori anodici



Avvelenamento da CO:

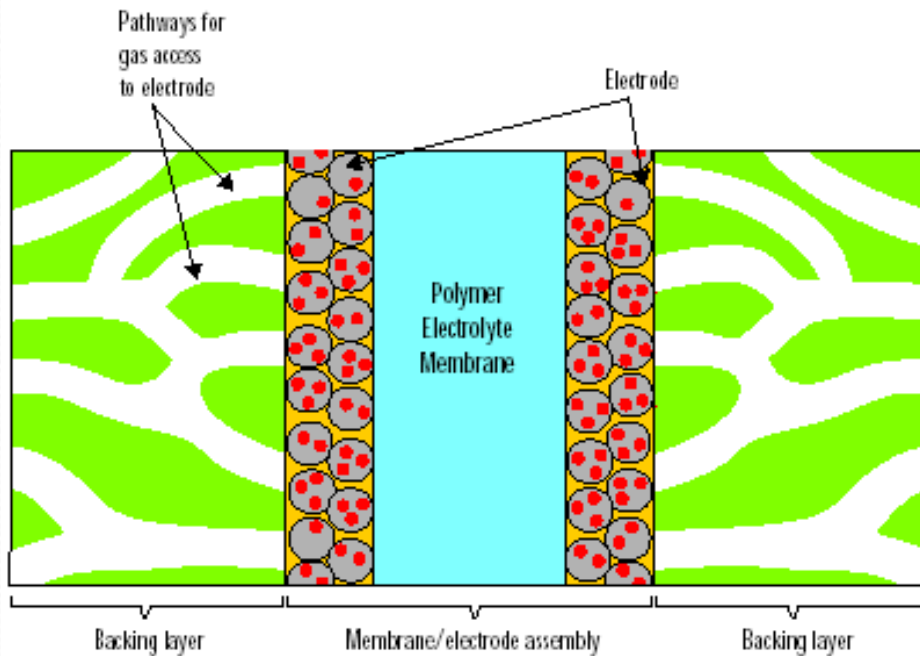
- 1) forte adsorbimento del monossido sui siti metallici
- 2) riduzione dell'attività catalitica per $[\text{CO}] < 100 \text{ ppm}$
- 3) diminuzione della resa di ossidazione dell' H_2
- 4) drastica riduzione della corrente erogata

- Leghe del Pt supportato da grafite con prestazioni ottimali in presenza di CO
- Binarie: Pt-Ru, Pt-Mo
- Ternarie: Pt-Ru-W, Pt-Ru-Mo

Materiali catodici

- Particelle di Pt (3-10nm) disperse su substrato di carbon black (30-50nm)
- Compositi polimerici per substrati
- Addizione di un polimero proton-conduttore (Nafion) all'interno dell'elettrodo
- Deposizione a spruzzo

GDLS (gas diffusion layers)



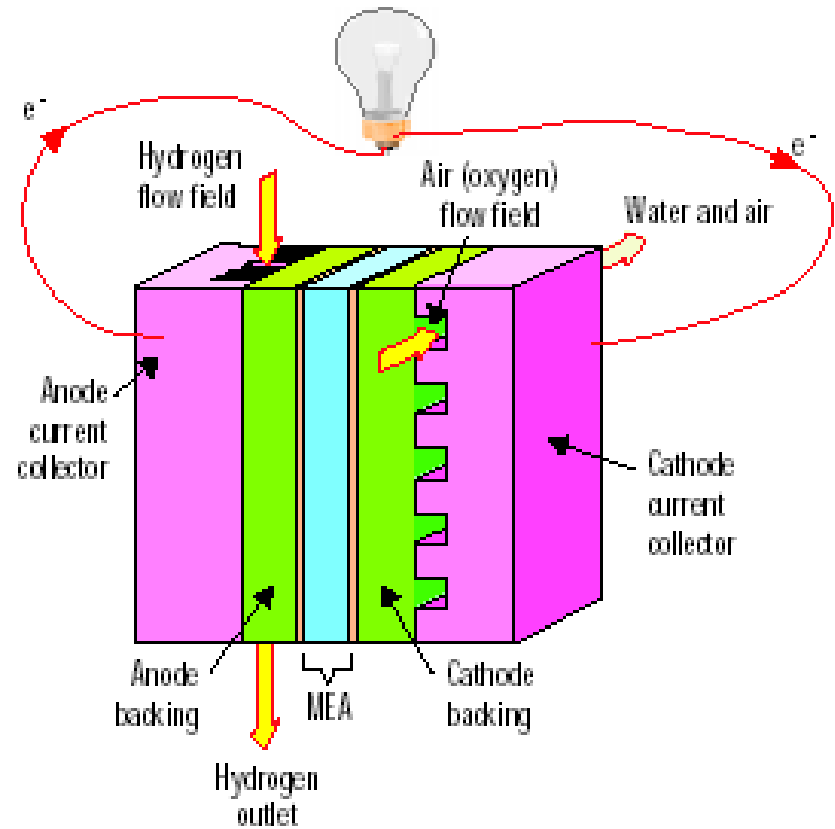
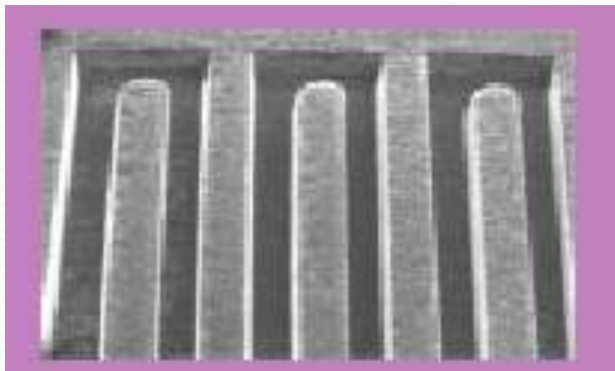
- Funzioni:
- garantire un flusso costante ed uniforme di carburante (H_2) e comburente (O_2)
- Eliminazione dell'acqua prodotta e umidificazione membrana

Materiali per GDLs

- Carbonio condducibilità elettrica
porosità → diffusione efficace
- Fogli di fibre di carbonio (CFP)
- Tessuti di fibre di carbonio: miglior gestione acqua prodotta e diffusività/dispersità gas
- Teflon (PTFE) impermeabilizzazione
→

Bipolar Plates

- Ruoli:
- canali di flusso (altezza, profondità e larghezza ~ 800 mm)
- collettori elettrici



Funzioni:

- alimentazione combustibile e comburente
- separazione fisica celle adiacenti
- estrazione corrente elettrica generata
- smaltimento acqua prodotta
- umidificazione gas reagenti
- raffreddamento sistema

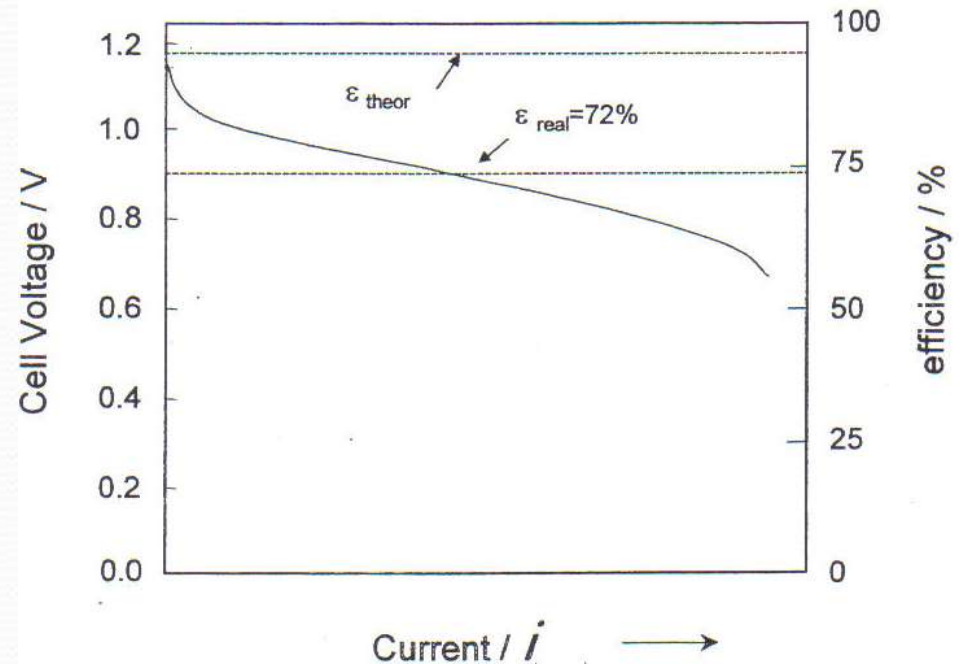
Materiali per bipolar plates

- Grafiti non porose: stabilità chimica e termica
- Metalli (Al, Ti, Ni, acciaio inox)
 - Coatings protettivi per operatività ad HT e pH 2-3
 - Base carbonio: grafiti, polimeri conduttivi, diamanti
 - Base metallo: metalli nobili, nitruri e carburi metallici
- Materiali compositi:
 - Base metallo: grafite porosa + acciaio inox + policarbonati
 - Base carbonio: resine termoplastiche (PP, PE) + fibre rinf.
resine termoindurenti (esteri vinilici, resine fenoliche ed epossidiche) + fibre rinforzanti

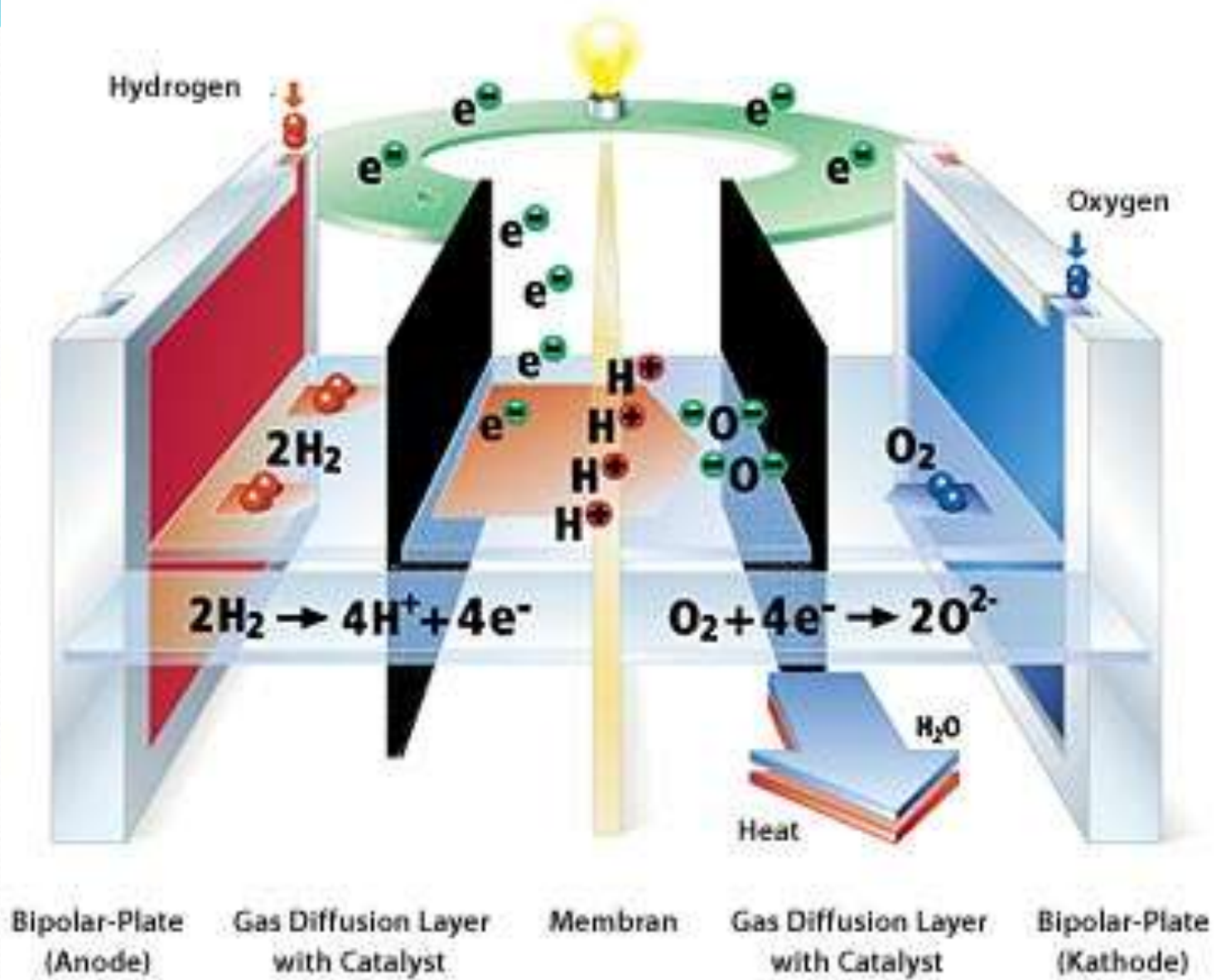
Efficienza di cella

En. chimica = En. elettrica + En. termica

- Voltaggio teorico max 1.16 V, $DE = [-DG/nF]$
- 0.7 V \rightarrow 60% energia presente nel carburante
- 0.9 V 72%
- Rispettivamente 40% e 28 % dispersa in calore



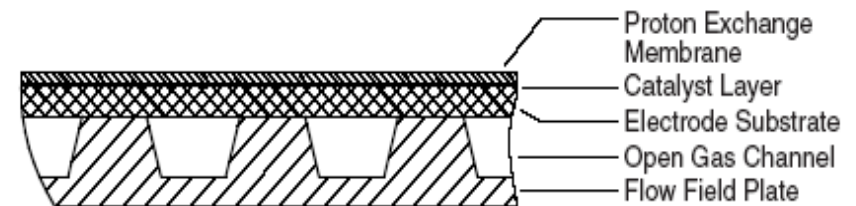
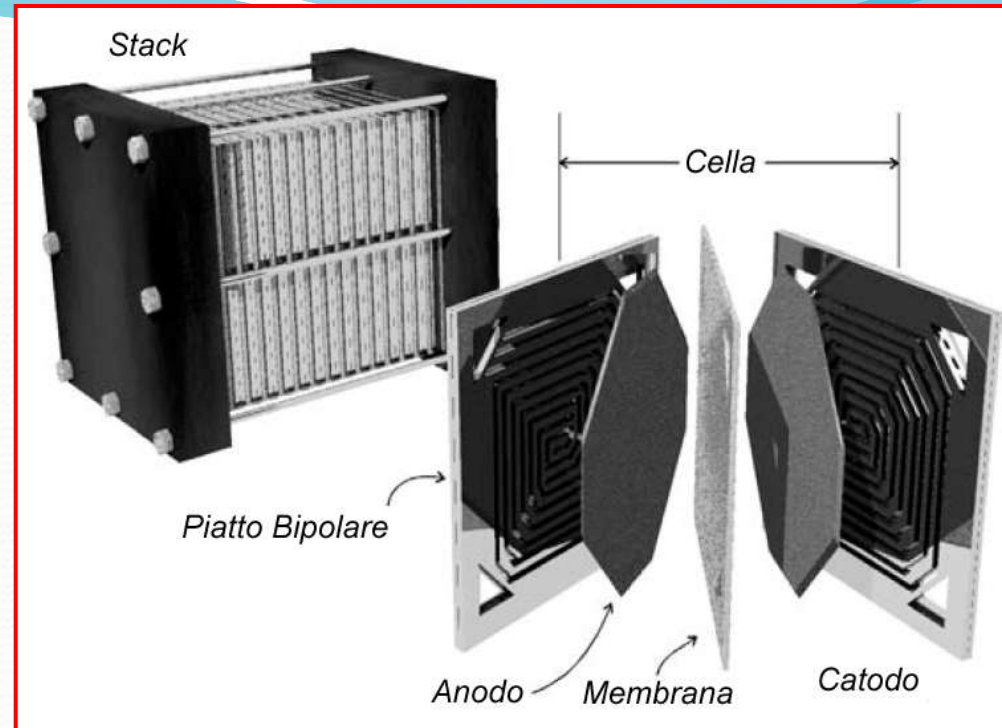
- Produzione di idrogeno elementare e puro
- Stoccaggio (compresso, liquido, solido)
- Infrastrutture per la produzione e la distribuzione di massa
- Costi delle celle (membrane, catalizzatori, tecnologie produttive)



Perché non si permette ai reagenti di passare direttamente attraverso lo strato catalitico? Perché è necessario il substrato elettrodico?

Il substrato, essendo di materiale poroso, permette l'accesso dei gas reagenti anche sotto la struttura dei piatti bipolari. Al contempo esso fornisce un percorso conduttivo all'area campita dei piatti bipolari.

I piatti bipolari devono operare un bilanciamento fra l'alimentazione dei gas e la conduzione di elettroni. Il migliore conduttore, un foglio solido pieno, non permetterebbe nessun accesso ai gas mentre una struttura completamente aperta non consentirebbe alla corrente di scorrere.



RICHIAMI DI TERMODINAMICA DELLA CELLA

L'energia disponibile in condizioni di equilibrio (pressione e temperatura costanti) in una cella è data dalla variazione di energia libera:

$$\Delta G = -nFE_{rev} \quad \left\{ \begin{array}{l} H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^- \\ \frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O \end{array} \right.$$

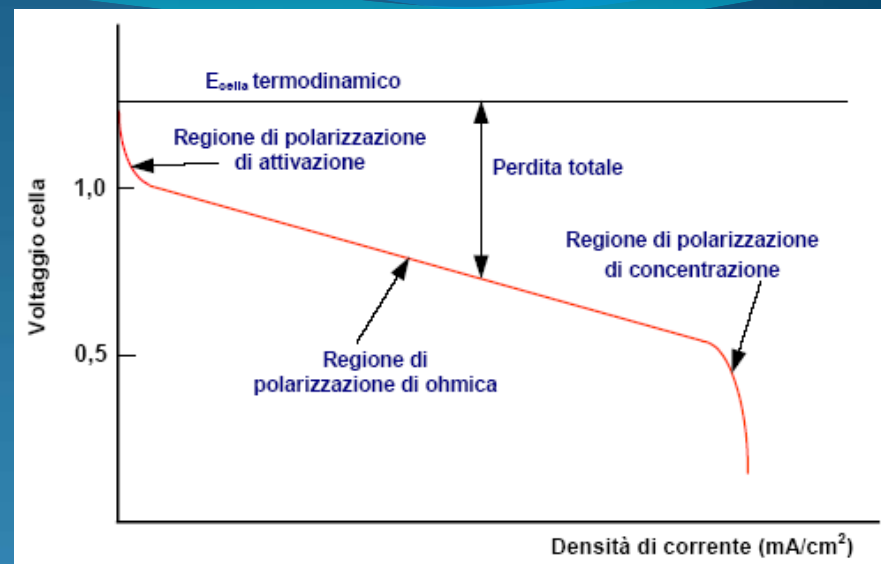
dove:

n numero di elettroni che partecipano alla reazione = 2
 F costante di Faraday = 96484 C/mol
 E_{rev} potenziale reversibile della cella

L'equazione di Nerst consente di determinare il potenziale termodinamico della reazione completa di ossidoriduzione;
questo potenziale rappresenta la f.e.m. della cella in condizioni di circuito aperto:

$$E = \frac{-\Delta G_E^0}{2 \cdot F} + \frac{R \cdot T}{2 \cdot F} \cdot \ln \frac{p_{H_2} \cdot (p_{O_2})^{1/2}}{p_{H_2O}}$$

Una cella a combustibile, operante in condizioni standard, che utilizzi elettrodi ad idrogeno ed ossigeno a circuito aperto è in grado di fornire una tensione E_{rev} pari a 1,229V. Quando si ha erogazione di corrente da parte della cella insorgono fenomeni di polarizzazione che inducono sovratensioni con conseguente abbassamento della tensione misurabile agli elettrodi.



La tensione misurabile assume allora la seguente espressione:

$$V_{FC} = E_{rev} - (V_{ohm} + V_{att} + V_{con})$$

Dove V_{FC} è la tensione ai morsetti della cella e i tre termini mentre V_{ohm} , V_{att} , V_{con} riassumono gli effetti di polarizzazione della cella.

Rendimento termodinamico

Il rendimento energetico di una cella è definito come:

$$\eta_t = \frac{\text{Lavoro utile}}{n_{H_2} \Delta H}$$

In termini di potenza si scrive:

$$\eta_t = \frac{P_e}{F_{H_2} \Delta H}$$

{	P_e	potenza erogata [W]
	n_{H_2}	numero di moli di idrogeno [mol]
	F_{H_2}	numero di moli al secondo consumate di idrogeno [mol/s]
	ΔH	entalpia di reazione pari a 284.000 [J/mol]

Rendimento di tensione

Nel caso in cui la cella eroga corrente elettrica, la tensione di cella (V) è minore della tensione che si avrebbe a circuito aperto (E_{rev}). Si definisce rendimento di tensione il rapporto tra tensione sotto carico e tensione teorica:

$$\eta_v = \frac{V}{E_{rev}}$$