

Impiego dell'idrogeno nelle celle a combustibile: termodinamica fondamentale ed efficienza degli impianti

Rodolfo Tacconi
Dipartimento di Energetica
Università di Trieste
e-mail: taccani@univ.trieste.it

1. Introduzione

L'invenzione delle celle a combustibile come dispositivo per la produzione di energia elettrica può essere fatta risalire alla metà del XIX secolo. L'invenzione è attribuita a Sir William Grove, comunque la scoperta del principio di funzionamento è attribuita a Christian Friedrich Schonbein, un professore dell'Università di Basilea dal 1829 al 1868 che era in stretto contatto con Sir William Grove. Le celle a combustibile sono in ogni caso uno dei più antichi fra i dispositivi di produzione di energia elettrica conosciuti dall'uomo. Tuttavia, il loro sviluppo non ha trovato un adeguato stimolo, fino al momento in cui le fonti primarie di energia sono state a buon mercato e non c'è stata la necessità di contenere l'impatto ambientale associato alla produzione di elettricità.

All'inizio del XX secolo l'esigenza di convertire energia chimica in energia elettrica si fece più pressante in quanto l'utilizzo dell'elettricità si stava diffondendo velocemente. I sistemi di conversione dell'energia elettrica furono introdotti inizialmente sotto forma di unità di generazione di taglia limitata ed installate sul luogo di utilizzo dell'energia (generazione distribuita). Ma ben presto la taglia di queste unità aumentò notevolmente fino a raggiungere le potenzialità odierne che possono arrivare a migliaia di MW di potenza elettrica installata (generazione centralizzata). Nell'ultimo decennio, la necessità di migliorare la flessibilità e l'affidabilità dei sistemi di generazione ha portato ad accrescere l'interesse verso un ritorno alla generazione elettrica distribuita in quanto, oltre che ad essere un sistema intrinsecamente più affidabile, sembra poter offrire costi di installazione più contenuti e un'efficienza globale più elevata legata alla possibilità di produrre e distribuire l'energia termica associata alla produzione di energia elettrica (cogenerazione).

Uno dei maggiori impulsi allo sviluppo delle celle a combustibile è derivato dall'esigenza sempre crescente di contenere l'impatto ambientale legato alla produzione di energia elettrica e alla propulsione dei veicoli. Le celle a combustibile possono essere un valido aiuto nel cercare di ridurre la nostra dipendenza dai combustibili fossili e a ridurre le emissioni nocive rilasciate nell'atmosfera, in quanto le celle a combustibile possono avere un'efficienza elettrica superiore a quella dei motori termici. La produzione di energia elettrica con una cella a combustibile alimentata ad idrogeno puro comporta la sola emissione in atmosfera di acqua. Anche se l'utilizzo di fonti di energia rinnovabili quali, per esempio, l'energia solare ed eolica è destinato ad aumentare, è difficile prevedere che queste riescano nel prossimo futuro a coprire l'attuale fabbisogno energetico. Le fonti rinnovabili potranno invece contribuire a fornire l'energia per la produzione di idrogeno destinato all'alimentazione delle celle.

2. Principio di funzionamento delle celle a combustibile

Prima di descrivere il funzionamento delle celle a combustibile cercheremo di evidenziare quali sono i processi termodinamici che sono alla base della conversione dell'energia chimica contenuta nel combustibile ad energia termica e quindi elettrica.

2.1. Energia contenuta nel combustibile

Nei sistemi di conversione basati su motori termici l'energia chimica contenuta nel combustibile, prima di essere disponibile sotto forma di energia elettrica, deve essere convertita in energia termica mediante un processo di combustione [1].

Nelle reazioni di combustione si assiste essenzialmente ad un processo chimico rapido e fortemente esotermico nel quale avviene l'ossidazione tramite un reagente (il comburente, l'ossigeno) di una sostanza detta combustibile.

Provocando la reazione del sistema combustibile+comburente il risultato sarà un insieme di prodotti di combustione: l'energia rilasciata dalle reazioni chimiche di ossidazione si è resa disponibile nella forma di calore dei gas così generati, e il calore massimo disponibile corrisponde, in condizioni adiabatiche, alla differenza di entalpia fra reagenti e prodotti di reazione, riferite a condizioni standard.

Il primo principio stabilisce che le grandezze calore e lavoro meccanico sono dimensionalmente omogenee; per il secondo principio però il calore non è integralmente convertibile in lavoro.

E' opportuno allora riassumere alcune distinzioni fra queste grandezze.

Innanzitutto, la differenza di entalpia prodotti-reagenti (entrambi a T, P ambiente di riferimento), cioè il potere calorifico di un combustibile, non coincide con il lavoro massimo ricavabile dalla reazione.

Le due leggi della termodinamica opportunamente applicate, affermano che il lavoro ottenibile dalla reazione, W_{rev} , anche in condizioni di reversibilità, è uguale al massimo a:

$$W_{rev} = -(\Delta H_{rev} - T\Delta S_{rev}) = -\Delta G_{rev}$$

H: entalpia

T: temperatura

S: entropia

G: energia libera di Gibbs

Il termine $T\Delta S$, coinvolgente la variazione di entropia fra reagenti e prodotti a temperatura e pressione ambiente è, per le reazioni da noi considerate, positivo e quindi:

$$W_{rev} = LHV - T\Delta S_{rev} < LHV$$

LHV: potere calorifico inferiore

In questo senso l'energia chimica non è sempre pregiata come l'energia meccanica o elettrica, al cui flusso energetico o entalpico non è associato alcun flusso entropico.

Questo risultato è indipendente dal metodo con cui viene portata avanti la reazione di ossidazione e non è quindi limitato al solo processo di combustione

In secondo luogo interviene una limitazione ben più pesante della precedente. Infatti, se vogliamo trasformare l'energia termica in lavoro passando dall'energia chimica

contenuta nel combustibile ad energia termica e quindi meccanica, il ciclo termodinamico associato deve soggiacere alle limitazioni espresse dal rendimento di Carnot. Il rendimento di Carnot per una macchina ideale che operi tra una sorgente ed un pozzo di calore a temperatura costante vale:

$$\eta = 1 - \frac{T_{\text{MIN}}}{T_{\text{MAX}}}$$

Ad esempio, per un impianto ideale che operi tra delle temperature $T_{\text{MIN}} = 25^\circ\text{C}$ e $T_{\text{MAX}} = 600^\circ\text{C}$, il valore di questo rendimento è 65%. Questo valore cresce se la

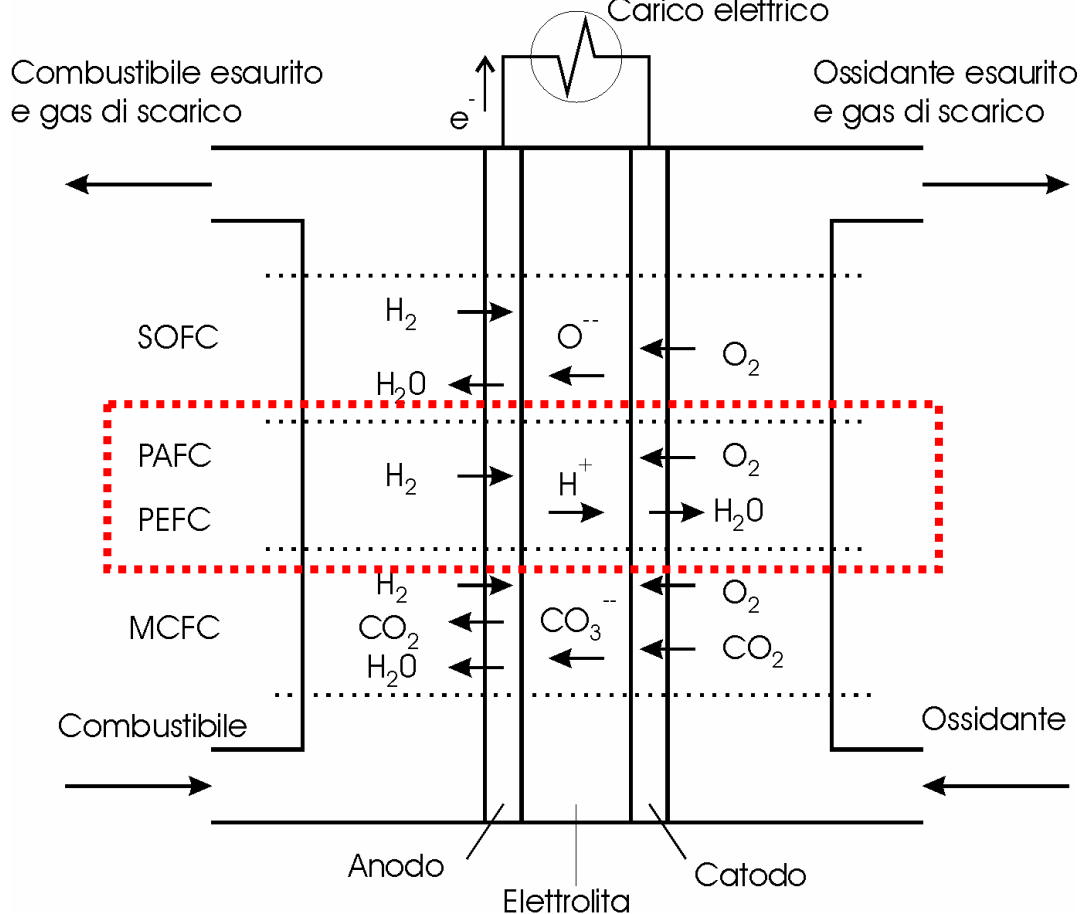


Figura 1. Principio di funzionamento dei principali tipi di celle a combustibile.

temperatura della sorgente calda aumenta, ma è chiaro che ciò comporta dei problemi tecnologici a via a via più importanti.

2.2. Le celle a combustibile: funzionamento ideale

La trasformazione di energia chimica in energia elettrica può invece avvenire direttamente, in modo simile a quanto avviene nelle comuni batterie, mediante reazioni isoterme ed isobare all'interno delle celle a combustibile.

Contrariamente a quanto avviene nelle macchine convenzionali per la produzione di energia elettrica da un combustibile, le celle a combustibile sono basate su reazioni elettrochimiche invece che su processi termofluidodinamici. Questo tipo di reazioni non coinvolgono il passaggio attraverso il calore come fonte intermedia di energia come accade nella conversione energia chimica-calore-lavoro caratteristica dello sfruttamento

della reazione di combustione. Il principio fondamentale delle celle a combustibile è quindi quello delle celle elettrochimiche che siamo normalmente abituati ad utilizzare in molte attività della nostra vita quotidiana, per esempio: telefoni cellulari e torce elettriche, ma la differenza più grande sta nel fatto che, nel caso delle batterie tradizionali, l'energia chimica è immagazzinata in sostanze contenute nella batteria stessa. Quando queste sostanze vengono esaurite la batteria deve essere sostituita o ricaricata. Al contrario, nella cella a combustibile l'energia chimica è fornita agli elettrodi da un combustibile che alimenta la cella in modo continuo ed immagazzinato all'esterno della cella.

La variazione dell'energia libera di Gibbs di una reazione chimica è legata al voltaggio della cella dalla seguente relazione:

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

dove:

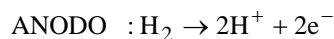
n: numero di elettroni interessati dalla reazione;

F: carica posseduta da una mole di elettroni (96439 Coulomb);

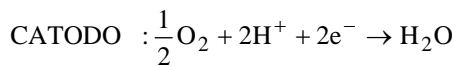
E_{REV} : differenza di potenziale in condizioni di equilibrio termodinamico ed in assenza di flusso di corrente elettrica;

In una cella a combustibile idrogeno/ossigeno, come quella evidenziata in Figura 1, la reazione anodica è l'ossidazione dell'idrogeno, mentre la reazione catodica è la riduzione dell'ossigeno.

Le reazioni sono:



$$\Delta G = -237 \text{ kJ/mol}$$

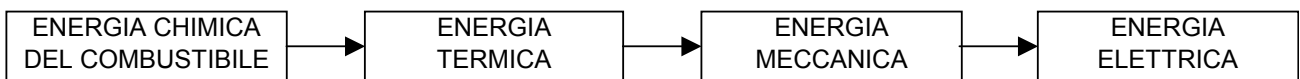


con una tensione all'equilibrio E_{REV} in condizioni standard a 25° C:

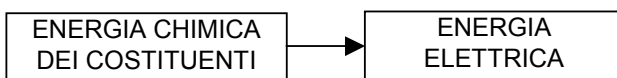
$$E_{REV} = -\Delta G / nF = 1,23\text{V}$$

Nella realtà numerosi tipi di perdite, come si analizzerà successivamente, impediscono di raggiungere il livello di tensione teorico.

MOTORE TERMICO



CONVERSIONE DIRETTA (BATTERIE)



CONVERSIONE DIRETTA (CELLE A COMBUSTIBILE)

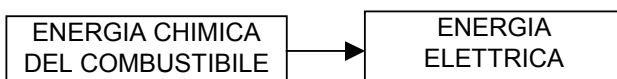


Figura 2. Diversi metodi per la produzione di energia elettrica

Anche tutti gli altri tipi di celle a combustibile sono essenzialmente composti dai seguenti componenti: due elettrodi separati da un elettrolita e collegati attraverso un circuito elettrico esterno.

Gli elettrodi, esposti alle correnti gassose dei reagenti (idrogeno ed ossigeno) devono essere realizzati con un materiale che sia permeabile al gas o al liquido e che quindi deve avere una struttura porosa. L'elettrolita deve avere una permeabilità al gas molto limitata, per evitare il contatto diretto dei reagenti.

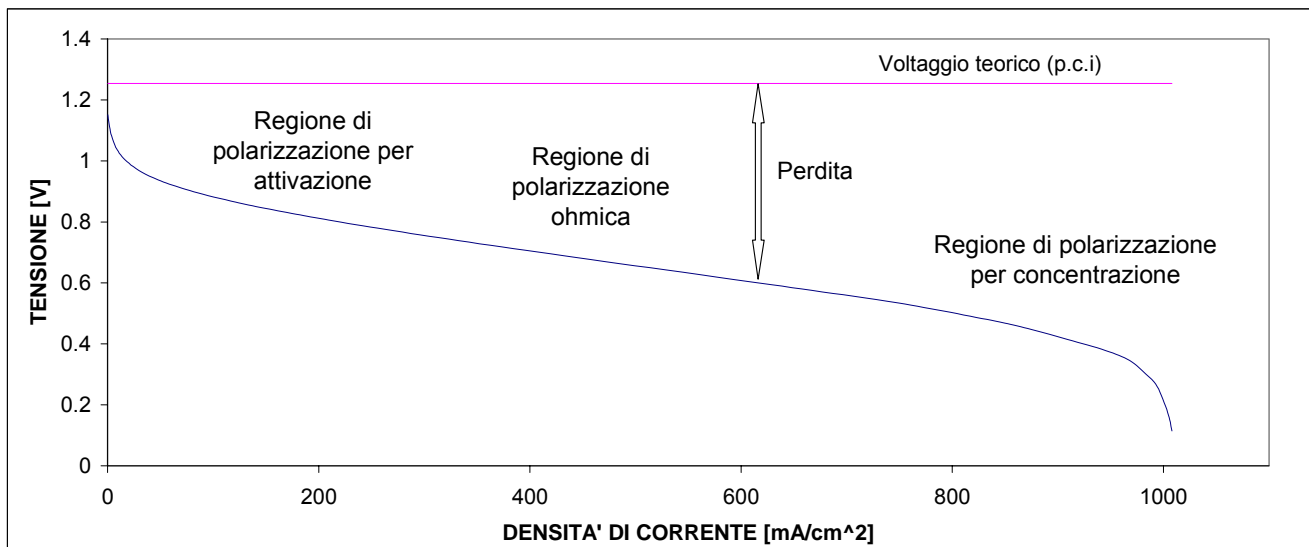


Figura 3. Curva di polarizzazione di una cella a combustibile.

2.3. Le celle a combustibile: funzionamento reale

La differenza di potenziale tra gli elettrodi è massima quando non si ha il passaggio di corrente attraverso il circuito esterno. Nel momento in cui viene applicato il carico elettrico si provoca un allontanamento dalle condizioni di equilibrio in seguito all'insorgere di fenomeni di polarizzazione (sovratensioni). Come conseguenza la tensione disponibile diminuisce rispetto a quella teorica e si ha una diminuzione del rendimento e quindi un aumento del calore prodotto.

Nella Figura 3 è riportata una tipica curva di polarizzazione per una cella a combustibile. Sono state evidenziate le regioni in cui i principali tipi di polarizzazione, analizzati successivamente, hanno l'effetto maggiore.

I principali tipi di polarizzazione in una cella a combustibile sono:

Polarizzazione di attivazione ΔV_A : è legata alle fasi più lente della sequenza di reazione (assorbimento dei reagenti sulla superficie elettrodica, trasferimento degli elettroni). Dipende dalle caratteristiche dell'elettrodo e del catalizzatore. L'ossidazione elettrochimica di un combustibile richiede la rottura dei legami molecolari dei reagenti e dei legami che si formano tra gli atomi dei reagenti e quelli catalizzatori: per rompere tali legami è richiesta una certa quantità di energia che costituisce l'energia di attivazione della reazione di combustione. La dipendenza di questa polarizzazione con la densità di corrente è di tipo logaritmico e si attenua rapidamente all'aumentare della densità di corrente. Questa perdita può essere espressa dall'equazione di Tafel.

Polarizzazione ohmica ΔV_O : è dovuta alla resistenza interna della cella, ionica nell'elettrolita ed elettronica negli elettrodi. La sua dipendenza dalla densità di corrente è lineare (Legge di Ohm).

Polarizzazione di concentrazione ΔV_C : è dovuta alla limitazione della velocità di trasporto di massa che si manifesta nella lentezza della diffusione dei gas negli elettrodi e degli ioni nell'elettrolita. Il procedere nella reazione crea infatti una disomogeneità di concentrazione causata dal consumarsi dei reagenti e degli ioni in prossimità dell'elettrodo. Il suo effetto è trascurabile purchè non si operi nella zona di densità di corrente massima. La velocità di trasporto di massa può essere in molti casi espressa dalla legge di Fick.

Pertanto possiamo scrivere:

$$V = E_{REV} - \Delta V_A - \Delta V_O - \Delta V_C$$

2.4. Efficienza delle celle a combustibile

Il rendimento di una cella a combustibile è definito come rapporto tra la potenza elettrica da questa erogata, e la potenza ad essa fornita; queste sono uguali, rispettivamente, al prodotto della tensione per la corrente in uscita, ed a quello del potere calorifico per la portata di combustibile.

Il rendimento della cella può essere espresso come segue [2], [3]:

$$\eta = \frac{V * I}{m_c * LHV} = \left(\frac{nFE_{rev}}{LHV} \right) \left(\frac{V}{E_{rev}} \right) \left(\frac{I}{nF\gamma} \right) \left(\frac{\gamma}{m_c} \right)$$

dove:

- E_{rev} : differenza di potenziale teorica della cella
- F : carica posseduta da una mole di elettroni; vale circa *96439 coulomb*;
- n : numero di elettroni interessati dalla reazione di ossidoriduzione;
- LHV : potere calorifico inferiore molare del combustibile;
- m_c : portata molare del combustibile;
- V : tensione in uscita dalla cella;
- I : intensità di corrente in uscita dalla cella;
- γ : moli al secondo di combustibile consumate;
- U_f : fattore di utilizzazione. E' il rapporto tra la quantità di combustibile consumata e quella entrante: $U_f = \gamma/m_c$.

Analizziamo ora significato dei termini presenti nell'espressione del rendimento:

1- (nFE_{rev}/LHV) . Rappresenta l'efficienza ideale della cella; il numeratore indica il lavoro ottenibile dal dispositivo nell'ipotesi di reversibilità.

2- (V/E_{rev}) . È il rapporto tra la tensione in uscita dalla cella e la forza elettromotrice, e quantifica, perciò, le perdite per attivazione, resistenza e diffusione.

3- $(I/nF\gamma)$. E' il rapporto tra l'intensità di corrente, effettivamente circolante, e quella che dovrebbe circolare in base alla portata di combustibile consumata. Quantifica l'effetto

causato dalle reazioni parassite e dalla cortocircuitazione degli elettrodi da parte dei reagenti.

4- (γ/m_c). E' il fattore di utilizzazione.

Un'espressione semplificata del rendimento considera come effetto utile, fornito dalla cella, la sola tensione; più precisamente, al numeratore viene posto il lavoro elettrico offerto dal dispositivo per una mole di sostanza reagente, ed al denominatore il potere calorifico inferiore del combustibile adoperato. Il tutto senza prendere in considerazione né trafiletti, né cortocircuitazioni e reazioni parassite, né l'utilizzazione del combustibile.

Il numeratore può scriversi come:

$$W_{el} = nFV,$$

mentre nel dividendo si può definire *l'equivalente elettrico del potere calorifico inferiore* (E_{LHV}), secondo il metodo già proposto precedentemente:

$$E_{LHV} = LHV / nF$$

pertanto:

$$\eta'' = \frac{V}{E_{LHV}}.$$

Possiamo riscrivere, dunque, il rendimento di cella in una nuova forma:

$$\eta = \left(\frac{V}{E_{LHV}} \right) \left(\frac{i}{nF\gamma} \right) (U_f)$$

e riconoscere, nel primo termine, proprio η'' .

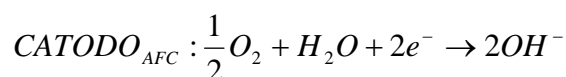
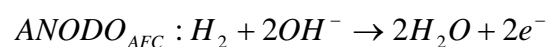
3. Tipi di celle a combustibile

Il metodo di cui ci si avvale consuetamente per classificare le celle a combustibile è quello che le distingue in base all'elettrolita adoperato.

Segue una descrizione sintetica sui principali tipi di celle; al suo interno descriviamo il tipo di elettrolita, le peculiarità, le applicazioni e le reazioni chimiche fondamentali grazie alle quali il dispositivo è in grado di fornire energia elettrica in uscita.

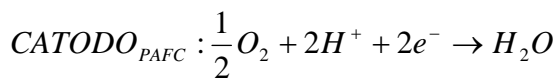
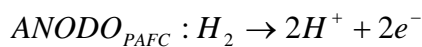
- **Celle a combustibile alcaline (Alkaline Fuel cell: AFC):** l'elettrolita, che trasporta ioni OH , è una soluzione alcalina ricca di KOH . Le AFC richiedono di essere alimentate con idrogeno puro, e non tollerano la CO_2 ; quest'ultima, infatti, reagisce con l'elettrolita, degradandolo.

Le possiamo trovare sia in ambito spaziale (per esempio: Apollo e Space Shuttle) che in quello veicolistico.

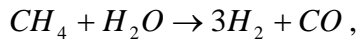


Naturalmente, le forti restrizioni, relative sia il combustibile che il comburente, rappresentano un serio vincolo per la produzione e vendita di queste celle su larga scala. Anche se, in virtù della presenza dell'elettrolita alcalino, la cinetica di reazione al catodo è ben più rapida rispetto alle altre celle a combustibile; questa peculiarità conferisce alle AFC ottime prestazioni e le svincola dall'uso di materiali preziosi quali catalizzatori.

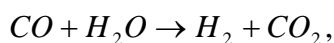
- **Celle a combustibile ad acido fosforico** (Phosphoric Acid Fuel cell: **PAFC**): l'elettrolita è una soluzione ricca di acido fosforico (H_3PO_4), ritenuta in una matrice al carburo di silicio, ed è conduttore di protoni idrogeno (H^+). Queste celle operano attorno ai $200^\circ C$, e richiedono un combustibile depurato da *monossido di carbonio* e *zolfo*, nonché l'uso di platino quale catalizzatore. Sono destinate prevalentemente alla cogenerazione.



Rispetto alle precedenti filiere, le PAFC tollerano l'anidride carbonica, ma lo stesso non può dirsi per i composti dello zolfo ed il monossido di carbonio. Di conseguenza, se il combustibile disponibile è gas naturale, questo va anzitutto sottoposto ad un trattamento di desolforazione; quindi, entro un dispositivo di conversione, detto *reformer*, grazie all'aggiunta di acqua ed al mantenimento di una temperatura superiore ai $750^\circ C$, il metano reagisce come segue

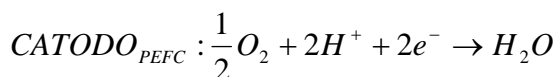
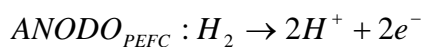


e produce, così, il vero combustibile della cella, ovverosia l'idrogeno; il gas prodotto dalla reazione va quindi raffreddato sino alla temperatura di funzionamento del dispositivo, tuttavia non viene immesso nel medesimo se non dopo essere stato sottoposto alla cosiddetta reazione di **shift**



mediante la quale il suo contenuto di CO viene portato ad un tenore tollerabile dagli elettrodi ($< 0,5\%$). Tale sostanza, infatti, è in grado di intaccare il platino e, di conseguenza, compromette le prestazioni della PAFC.

- **Celle a combustibile ad elettrolita polimerico** (Polimer Electrolyte Fuel cell: **PEFC**): l'elettrolita è costituito da una membrana polimerica, in grado di condurre ottimamente i protoni idrogeno. Le PEFC funzionano tra gli 80 e i $120^\circ C$ e necessitano di platino, quale catalizzatore, sia all'anodo che al catodo. Si punta soprattutto alla loro utilizzazione come sistemi propulsivi, visto il buon rapporto tra potenza e peso di cui sono dotate; negli ultimi dieci anni sono stati fatti notevoli progressi in questo senso.

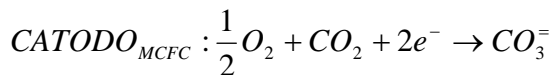
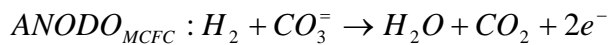


La presenza di un elettrolita solido costituisce una validissima barriera contro il trafileamento dei gas reagenti, e quindi minimizza, come si vedrà anche per le SOFC, le perdite per reazioni parassite.

La bassa temperatura di funzionamento consente un rapido avviamento, ma non permette un vantaggioso assetto cogenerativo.

- **Celle a combustibile a carbonati fusi** (Molten Carbonate Fuel cell: **MCFC**): l'elettrolita, è una miscela di sali fusi, che si rivelano buoni conduttori ionici attorno ai 650°C. A tale temperatura, migliora notevolmente la tolleranza, da parte della cella, nei confronti del CO (il quale, anzi, diventa vero e proprio combustibile) e, inoltre, la cella stessa non richiede materiali preziosi quali catalizzatori delle reazioni chimiche (è sufficiente l'impiego di nichel).

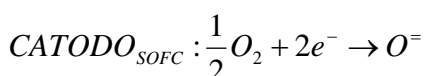
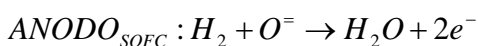
L'applicazione più interessante per le MCFC è indubbiamente rappresentata dai cicli integrati con turbine, che sfruttano l'energia residua dei gas uscenti dalla cella; in tal modo, si raggiungono rendimenti elettrici (complessivi di tutto l'impianto) superiori al 60%, mantenendo un ottimo comportamento anche a carico parzializzato.



Sottolineiamo che la temperatura di funzionamento di queste celle consente di alimentarle direttamente con gas naturale (o altro combustibile idoneo) desolfurato, in quanto la sua conversione endotermica a gas ricco di idrogeno può avvenire entro la cella ("*internal reform*") o in prossimità di essa, sfruttandone il calore di scarto. Il rendimento dell'impianto ne trae notevole vantaggio, ed il suo valore può essere ulteriormente ritoccato se, in assetto pressurizzato, i gas di scarico vengono fatti espandere attraverso una turbina.

I principali problemi delle MCFC sono indubbiamente la gestione dell'anidride carbonica, che va movimentata dall'anodo (in cui è prodotto di reazione) al catodo (in cui è reagente), e la degradazione degli elettrodi, causata sia dall'elevata temperatura che dall'azione corrosiva dell'elettrolita.

- **Celle a combustibile ad ossidi solidi** (Solid Oxide Fuel Cell: **SOFC**): l'elettrolita è un ossido metallico non poroso, tipicamente un ossido di zirconio stabilizzato con ittrio. Gli elettrodi sono costituiti tipicamente da ossidi di zirconio al cobalto o nichel (anodo) e da manganite di lantanio drogata con stronzio (catodo). Allo scopo di garantire un'ottimale conducibilità ionica la temperatura di funzionamento si aggira attorno ai 1000°C. Come nel caso delle MCFC ciò consente di utilizzare un ciclo sottoposto per recuperare l'energia dei gas di scarico. La cella può essere alimentata direttamente a metano desolfurato e tollera sia la CO che la CO₂.



	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Elettrolita	Membrana polimerica	Iidrossido di potassio	Acido fosforico	Carbonati fusi	Ossido di zirconio
Temp. (°C)	70-80	80-100	200-220	600-650	800-1000
Potenza [mW/cm ²]	300-900	300-500	150-300	150	150-270
Reformer	Esterno	Esterno	Esterno	Est/Int	Est/Int
Toll. CO ₂	Si	No	Si	Si	Si
Toll. CO	No	No	No	Si	Si
Applicazioni	Veic. Spaz. Trasporto Portatili	Veic. Spaz. Trasporto Portatili	Generaz. distribuita-MW	Generaz. MW	Generaz. distribuita.-MW
Efficienza LHV H ₂	40-55%	50-55%	45-50%	45-55%	45-60%
PEMFC: Proton Exchange Membrane Fuel Cell AFC: Alkaline Fuel Cell PAFC: Phosforic Acid Fuel Cell			MCFC: Molten Carbonate Fuel Cell SOFC: Solid Oxide Fuel Cell		

Tabella 1 Principali caratteristiche di alcuni tipi di celle a combustibile.

4. Applicazioni

Le celle a combustibile trovano oggi impiego in numerosi campi applicativi, anche se pochi sono i prodotti che hanno raggiunto un livello di maturità tecnologica che abbia permesso una fase di commercializzazione estesa. Esistono invece numerosi impianti dimostrativi e applicazioni sperimentali, per i quali sarebbe impossibile fare un elenco completo. Va comunque ricordato che probabilmente il primo importante investimento in termini di ricerca e sviluppo riguardate le celle a combustibile è associabile alle missioni spaziali e quindi può essere datato attorno agli anni 50-60.

Di seguito riporteremo soltanto alcune fra le applicazioni che probabilmente hanno suscitato maggiore interesse.

Nella Figura 4 è riportato un esempio in cui una cella a combustibile viene utilizzato nel campo automobilistico ed in particolare per la propulsione di una Mercedes Classe A. La cella a combustibile, alimentata ad idrogeno, viene utilizzata per produrre energia elettrica e la propulsione è assicurata da un motore elettrico. Nella Figura 5 è invece riportata la fotografia di un autobus Mercedes-Benz Citaro, a celle a combustibile prodotte dalla Ballard. L'autobus entrerà in funzione in alcune città europee a partire dalla metà del 2003. Nella Figura 6 è riportato un esempio di un prototipo di generatore portatile da 1 kW, prodotto sempre dalla Ballard, basato su celle polimeriche ed alimentato ad idrogeno.

Ad oggi l'azione più importante condotta nel campo delle celle ad acido fosforico in Italia, ha portato alla realizzazione di un impianto dimostrativo da 1,3 MW installato a Milano (Figura 7). Nel 1988 l'ENEA, l'Azienda Energetica Municipale (AEM) di Milano ed Ansaldo hanno avviato la progettazione di un impianto PAFC. Le celle sono state fornite dalla International Fuel Cells (oggi UTC), il sistema di reforming del metano da Haldor Topsøe, mentre l'integrazione del sistema è stata condotta da Ansaldo. L'impianto è entrato in servizio con successo nel 1995 ed ha operato fino al 1998. Nella filiera delle PAFC va anche ricordato il PC 25 della UTC Fuel Cells. Questo impianto, il solo ad aver raggiunto una vera e propria commercializzazione, ha una potenza elettrica di 200 kW ed una termica di 260 kW. Il combustibile utilizzato è metano.



Figura 4. Mercedes Classe A a celle a combustibile [Fonte: Ballard].



Figura 5. Autobus a celle a combustibile [Fonte: Ballard].

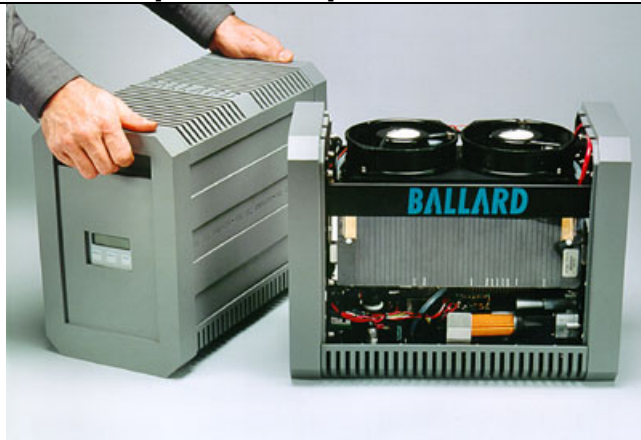


Figura 6. Generatore elettrico a celle a combustibile da 1 kW [Fonte: Ballard].



Figura 6. Impianto a celle a combustibile della AEM (Milano).

Per quanto riguarda le MCFC, il progetto italiano più importante è sviluppato dalla Ansaldo Fuel Cells e riguarda lo sviluppo di moduli da 250 kW per la generazione distribuita.

5. Efficienza degli impianti di conversione

Il contenimento dell'impatto ambientale in termini di produzione di emissioni gassose nocive e di riduzione dello sfruttamento delle risorse primarie di energia comporta in prima istanza la ricerca di sistemi di conversione globalmente più efficienti.

Ci proponiamo ora di confrontare l'efficienza degli impianti a celle a combustibile con quelli basati sulle tecnologie convenzionali. La Figura 8 riporta l'andamento dell'efficienza di conversione in funzione della taglia dell'impianto per alcune delle tecnologie convenzionali e per le celle a combustibile. La tecnologia più diffusa per la produzione di energia elettrica, gli impianti a vapore, consente di ottenere rendimenti fra il 35 e il 40%. Per conseguire questi rendimenti e raggiungere un costo di installazione specifico competitivo, gli impianti devono essere realizzati in taglie superiori almeno alle decine di MW. Per potenze più limitate si può ricorrere ai motori alternativi a combustione interna. Più interessante è l'utilizzo, sempre più diffuso, dei cicli combinati, ossia dei cicli che integrano la tecnologia dei turbogas con quella dei cicli a vapore.

Con questa tecnologia è possibile raggiungere dei rendimenti superiori al 55% con dei costi di installazione molto interessanti. Nella stessa Figura 8 è anche riportato il valore

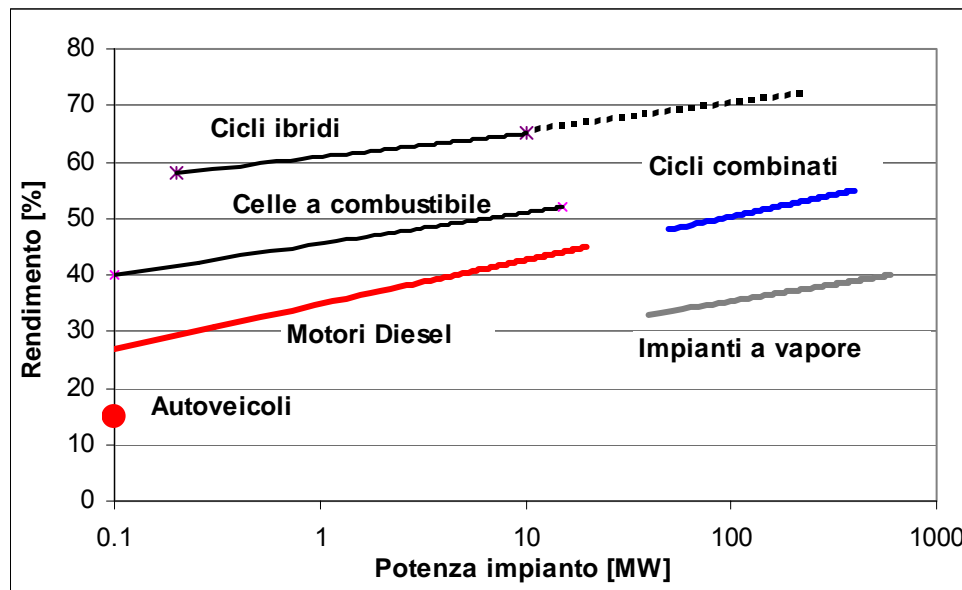


Figura 8. Efficienza degli impianti di conversione.

medio del rendimento di un motore a combustione interna per autotrazione. Questo valore, che dipende dal ciclo di guida considerato, è indicativamente valutabile attorno al 12-15%. Infatti, nonostante il valore dell'efficienza di conversione di progetto dell'energia chimica in energia meccanica di un motore a combustione interna sia sensibilmente più elevato, nel caso dei motori per autotrazione bisogna considerare anche dei periodi di funzionamento a carico parziale (efficienza ridotta) e dei periodi nei quali il motore è in funzione ma il veicolo è fermo.

Consideriamo ora l'efficienza di conversione delle celle a combustibile. L'efficienza va da circa il 40% per impianti di piccola taglia e può superare il 50% per impianti di dimensioni più elevate. In termini assoluti questi rendimenti sono confrontabili, nel caso delle piccole taglie, con quelli dei motori a combustione interna, mentre per le taglie più grosse sono addirittura inferiori a quelli dei cicli combinati.

Nel caso la cella a combustibile venga utilizzata per l'autotrazione, il confronto con il motore a combustione interna è a netto vantaggio della cella a combustibile. Infatti, nei periodi in cui il veicolo è fermo, la cella consuma una quantità di combustibile molto inferiore a quella del motore a combustione interna, mentre durante il funzionamento a carico parziale il rendimento della cella non subisce sensibili variazioni.

Nel grafico è anche riportato l'andamento dell'efficienza dei cicli ibridi, ovvero dei cicli che integrano la tecnologia delle celle a combustibile con quella delle turbine a gas. Questi cicli, di cui ci occuperemo nel prossimo paragrafo, consentono di ottenere delle efficienze di conversione sensibilmente superiori a quelle degli impianti fino a qui considerati.

5.1. Cicli Ibridi

Gli impianti che consentono di ottenere il rendimento più elevato sono quelli basati sui cicli ibridi ovvero dei cicli che integrano la tecnologia delle celle a combustibile con quella delle turbine a gas [4].

Utilizzando delle celle a combustibile ad alta temperatura (carbonati fusi 650°C, ossidi solidi 1000°C) e funzionanti in un ambiente pressurizzato, è possibile espandere il gas caldo uscente dalla sezione elettrochimica in un turbina opportunamente collegata ad un generatore di corrente e quindi raggiungere un rendimento elettrico più elevato rispetto ad un impianto operante a pressione atmosferica.

Nella Figura 9 è riportato lo schema di funzionamento di un impianto ibrido pressurizzato basato su SOFC. Si nota come il comburente (aria) venga compresso e preriscaldato prima di entrare nello stack (l'insieme delle celle a combustibile). La corrente continua prodotta dalle celle viene trasformata in corrente alternata in un inverter. Se viene scelta una configurazione, come quella rappresentata, in cui la turbina è accoppiata sia al compressore che al generatore, è preferibile raddrizzare la corrente in uscita dal generatore per poi portarla ai valori di tensione e frequenza richiesti dalla rete. È stato dimostrato che in tali impianti i rendimenti elettrici possono superare il 60%, mentre in unità cogenerative il rendimento di primo principio è superiore all'80%.

Il primo sistema ibrido SOFC/GT è stato portato a termine dalla Siemens Westinghouse Power Corporation per conto della Southern California Edison che l'ha testato presso il National Fuel Cell Research Center dell'Università di California (Irvine, CA). L'impianto ha una potenza di 200 kW, mentre l'efficienza elettrica è del 55%. Il combustibile utilizzato in questi impianti è metano, parzialmente trasformato in idrogeno (reforming) prima di entrare nel comparto anodico.

I cicli ibridi, oltre che permettere di contenere sensibilmente le emissioni inquinanti, in quanto l'ossidazione del combustibile avviene per via elettrochimica, presentano l'interessante caratteristica di avere rendimenti molto elevati anche per impianti di taglia ridotta (centinaia di kW), e quindi si pongono in una posizione di netto vantaggio rispetto ai più diretti concorrenti, ovvero i cicli combinati.

6. Prospettive di sviluppo

Si è visto quindi che con i cicli combinati ed in particolare con i cicli ibridi, è possibile aumentare considerevolmente l'efficienza di conversione e portarla verso un valore che, termodinamicamente, consente margini di miglioramento molto limitati.

Un ulteriore miglioramento dell'efficienza globale di conversione può essere ottenuto mediante l'applicazione del concetto di Generazione Distribuita (GD).

Per Generazione Distribuita si intende l'installazione di unità di generazione elettrica, eventualmente combinate con generazione di calore, con taglie di potenza da qualche kW

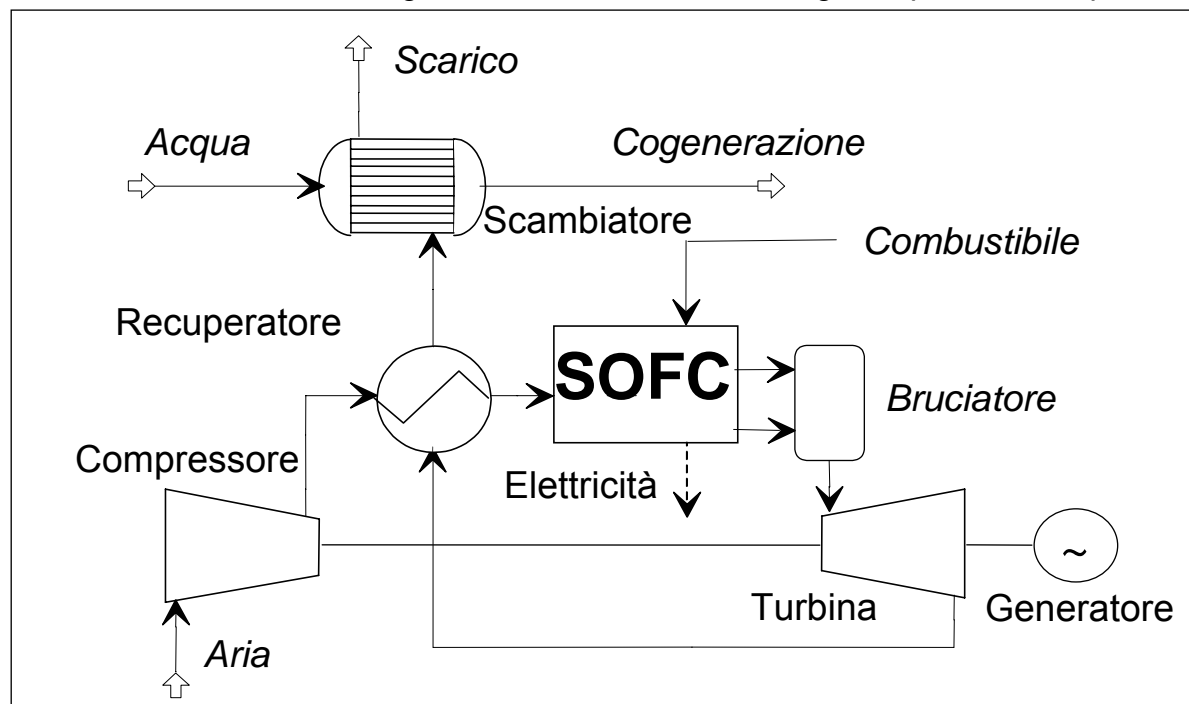


Figura 9. Rappresentazione schematica di un ciclo ibrido basato su una SOFC.

fino a qualche MW e localizzate vicino ai consumatori, all'interno di impianti industriali o di edifici per attività commerciale o residenziale. I potenziali vantaggi derivanti da questo tipo di generazione sono molteplici:

- flessibilità nella scelta dei siti e rapidi tempi di installazione
- maggiore affidabilità e qualità dell'energia elettrica fornita ai clienti
- risparmi sui costi di trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica
- flessibilità nel bilanciamento dei picchi di carico elettrico

inoltre esiste la reale possibilità di produrre assieme all'elettricità anche il calore per usi ambientali, sanitari e industriali.

Fra le tecnologie utilizzabili nel campo della GD la più matura è quella dei motori a combustione interna alternativi, mentre fra le più innovative troviamo le microturbine a gas ed ovviamente le celle a combustibile. Queste ultime consentono, nel caso di alimentazione diretta con idrogeno anche di annullare l'impatto ambientale in termini di emissioni gassose nocive.

Pertanto, in un futuro che potrebbe anche essere non molto lontano, i "centri di produzione" elettrica e termica saranno installati direttamente sul luogo di utilizzo e quindi anche nelle nostre abitazioni.

7. Conclusioni

Le tecnologia delle celle a combustibile consente la conversione dell'idrogeno in energia elettrica con un'efficienza, in alcuni casi, superiore ed un impatto ambientale inferiore rispetto agli altri sistemi di conversione oggi disponibili.

La loro modularità le rende estremamente flessibili dal momento che la potenza necessaria può essere ottenuta semplicemente cambiando il numero di moduli.

Venti anni fa la ricerca sulle celle a combustibile era condotta essenzialmente dalle università e da un numero molto limitato di aziende. Oggi numerose aziende sono impegnate nello sviluppo della tecnologia legata alle celle a combustibile, partendo dal miglioramento degli elettrodi ed arrivando fino allo sviluppo di sofisticati algoritmi per l'ottimizzazione del sistema di controllo dell'impianto.

Le celle a combustibile sono già un prodotto commerciale in alcune aree come, ad esempio, la generazione distribuita di piccola taglia o gli impianti di cogenerazione come nel caso del modulo PC 25 da 200 kWe.

Non è stato ancora però raggiunto il grado di maturità tecnologico che consenta una competizione, in termini economici, fra le celle a combustibile e le tecnologie convenzionali. L'imminente commercializzazione delle celle in aree ad elevato turn over, come l'industria automobilistica ha, in questo senso, un ruolo importante in quanto ha determinato una brusca accelerazione nella ricerca di un prodotto sempre più affidabile ed economico. D'altra parte sarà fondamentale l'azione di sensibilizzazione sulle problematiche ambientali che contribuirà a far accettare ai consumatori dei costi connessi alla disponibilità di energia sempre più elevati.

Bibliografia

- [1] Campanari S., Consonni S., Lozza G., Macchi E., (1998): Libro bianco sulla cogenerazione, Volume IV: La microcogenerazione: le tecnologie del futuro, Associazione Termotecnica Italiana del Gas, Milano.
- [2] Appleby, A.J Foulkes, F.R., (1989): Fuel Cell Handbook, Van Nostrand Reinhold, New York, NY,1989.
- [3] Kordesh K., Simader G., (1996): Fuel Cells and their applications, VCH, Weinheim (Germania), 1996.
- [4] Veyo S. E., Shockling L. A., Dederer J. T., Gillet J. E., Lundberg W. L. (2000), "Tubular Solide Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid Cycle Power System – Status", ASME paper 2000-GT-550.