

Le celle a combustibile per la decarbonizzazione nei settori energetico, industriale e della mobilità

La decarbonizzazione della società necessita di una nuova generazione di energia distribuita, flessibile e a basso impatto. Le celle a combustibile sono le candidate ottimali: producono energia elettrica con un'efficienza pari o superiore al 60% per un ampio range di potenze e possono essere alimentate con idrogeno da elettrolisi, biometano o syngas da biomasse, abbattendo drasticamente le emissioni di CO₂. Inoltre, invertendo l'operazione, con alcune celle si può produrre idrogeno da fonti rinnovabili, collocando questa soluzione tecnologica in una posizione cardine per l'integrazione tra rete elettrica e del gas.

DOI 10.12910/EAI2020-050

di **Davide Pumiglia, Viviana Cigolotti, Stephen McPhail, Giulia Monteleone**, Dipartimento Tecnologie Energetiche e Fonti Rinnovabili, ENEA (*)

Dalla loro prima menzione apparsa sulla rivista *The London and Edinburgh philosophical magazine and journal of science* del 1838 ad opera del fisico gallese Sir William Robert Grove, all'applicazione nelle missioni spaziali Gemini, Apollo e sugli Space Shuttle degli anni 60, fino ai primi impianti di produzione di potenza degli anni 90, la storia delle celle a combustibile ha vissuto fasi di grande sviluppo alternate a lunghi periodi di disinteresse. Negli ultimi anni, da quando i cambiamenti climatici sono al centro del dibattito politico e sociale, le celle a combustibile stanno vivendo una fase di rinnovato interesse, di sviluppo scientifico, tecnologico e commerciale e, date le peculiari caratteristiche della tecnologia, che verranno illustrate in seguito, sembrano ora collocarsi in una posizione strategica nel futuro scenario energetico ed industriale, per favorire la decarbonizzazione di settori strategici.

L'ENEA è stata pioniera in Italia sullo sviluppo delle celle a combustibile: tra gli anni Novanta e i primi anni Duemila l'attività ENEA sulle celle a combustibile è stata focalizzata fortemente sulle PEM-FC, funzionanti a bassa temperatura, sviluppando tutte le competenze atte allo sviluppo, costruzione e alla messa in esercizio di moduli di potenza interamente realizzati nei propri laboratori; nell'ultimo decennio invece l'interesse per questa tecnologia si è spostato sulle tecnologie ad alta temperatura, in particolare le celle a carbonati fusi (Molten Carbonate Fuel Cells, MCFC) e le celle ad ossidi solidi (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC).

La tecnologia

Le celle a combustibile (Fuel Cells, FC) sono dispositivi elettrochimici che convertono l'energia chimica direttamente in energia elettrica (e calore) attraverso reazioni di ossido-

riduzione. Data l'assenza di trasformazioni intermedie, tipiche dei processi termo-meccanici tradizionali, raggiungono efficienze di conversione molto elevate, tipicamente tra il 35 e il 60% di efficienza elettrica. Come per le batterie, le celle a combustibile sono essenzialmente costituite da un anodo e un catodo, separati da un elettrolita, la natura del quale ne determina le caratteristiche di operazione, prima fra tutte, la temperatura. **Si distinguono due categorie di celle a combustibile: a bassa temperatura** ($T < 130\text{ °C}$), come le celle ad elettrolita alcalino e le celle a elettrolita polimerico (PEMFC), e **ad alta temperatura** ($600\text{ °C} < T < 900\text{ °C}$), come le celle a carbonati fusi (MCFC) e le celle ad ossidi solidi (SOFC). Per entrambe le categorie, il combustibile di elezione è l'idrogeno, ma possono essere utilizzati anche gli alcoli (PEM), gas naturale, idrocarburi più leggeri, gas provenienti da gassificazione di biomasse o da dige-

stione anaerobica dei rifiuti (SOFC e MCFC). Le FC sono modulari e scalabili e per questo trovano applicazione in tutti i settori.

Nella mobilità elettrica a zero emissioni (su terra, trasporto aereo o marittimo) le FC consentono di allungare l'autonomia dei veicoli grazie alla maggiore densità energetica dell'idrogeno rispetto alle batterie, consentendo tempi di rifornimento equivalenti a quelli per i veicoli a combustibile tradizionale. Nella generazione stazionaria (residenziale, commerciale o industriale) le FC riducono il consumo di energia primaria grazie alle altissime efficienze di conversione (in elettricità e calore) e consentono un'indipendenza dalla rete elettrica, per cui offrono alto valore nella generazione "prime power", per impianti sensibili quali data center ed ospedali e nella generazione remota e "off-grid", specialmente in connessione con sistemi di generazione da fonti rinnovabili (fotovoltaico,

microeolico ecc.), per l'alimentazione di utenze isolate.

Efficienza, tempi di vita e rendimento dipendono dal tipo di applicazione. Per quanto riguarda i sistemi mobili, sono costituiti da celle PEM e suddivisi in: 1) Autotrazione (80 kW_e): rendimento elettrico attuale intorno al 60%, tempo di vita circa 100.000 km (2500h equivalenti), con previsione di incremento a circa 5000h. 2) Portabile (micro < 2 W_e, mini 10-50 W_e, medio 100-250 W_e): rendimento elettrico intorno al 40%, tempo di vita circa 1500-2000h equivalenti, con previsione di incremento a 5000h. 3) Portabile large (1-10 kW_e): rendimento 25% (target 40%), tempo di vita 3000h equivalenti (target 20.000h).

Per quanto riguarda sistemi stazionari di produzione di energia in loco, solitamente si tratta di sistemi SOFC o MCFC: 1) Cogenerazione elettrica scala residenziale (1-10 kW_e): rendimento elettrico 30-60% (target 45-65%), rendimento termico 80-90%

(target > 90%), tempo di vita 12.000h equivalenti (target 60.000h). 2) Cogenerazione elettrica scala industriale (> 0,1 MW_e): rendimento elettrico 42-47% (target > 50%), rendimento termico 70-90% (target > 90%), tempo di vita 40.000-80.000h equivalenti (target 80.000h). Il rendimento complessivo del sistema supera già attualmente il 95% [1].

Celle a combustibile: cardine per la decarbonizzazione

In che modo le celle a combustibile possono contribuire alla decarbonizzazione dei principali settori produttivi? Il modo più semplice per farsi un'idea è attraverso qualche esempio numerico, dai quali si evince come le numerose proprietà peculiari delle celle a combustibile ne delineino un ruolo da protagoniste nella futura transizione energetica. In Tabella 1 è riportato un confronto delle emissioni di CO₂ e SO₂ basato su dati presenti in letteratura (si

Tab. 1 Confronto delle emissioni di CO₂ e SO₂ di diverse tecnologie

Settore Automobilistico			
Tecnologia	Emissioni CO ₂ (g/km)	Emissioni SO ₂ (mg/km)	± % (rispetto benzina)
MCI Benzina	209	200	-
MCI Diesel	154	130	-26 %
MCI Idrogeno (da gas naturale)	220	30	+5 %
FC gas naturale (reformer a bordo)	83	6.3	-60%
FC idrogeno (da reformer)	87-100	380	-55%
FC idrogeno (da FER)	15-20	30	-90%
Settore Stazionario (cogenerazione commerciale)			
Tecnologia	Emissioni CO ₂ (kg/MWh tot)	Emissioni SO ₂ (g/MWh tot)	± % (rispetto convenzionale)
Convenzionale	270	7	-
Motore diesel	315	680	+16 %
MCI Gas Naturale	218	6	-19 %
FC SOFC Gas Naturale	145	0	-46 %
FC SOFC idrogeno (FER)	28		-89%

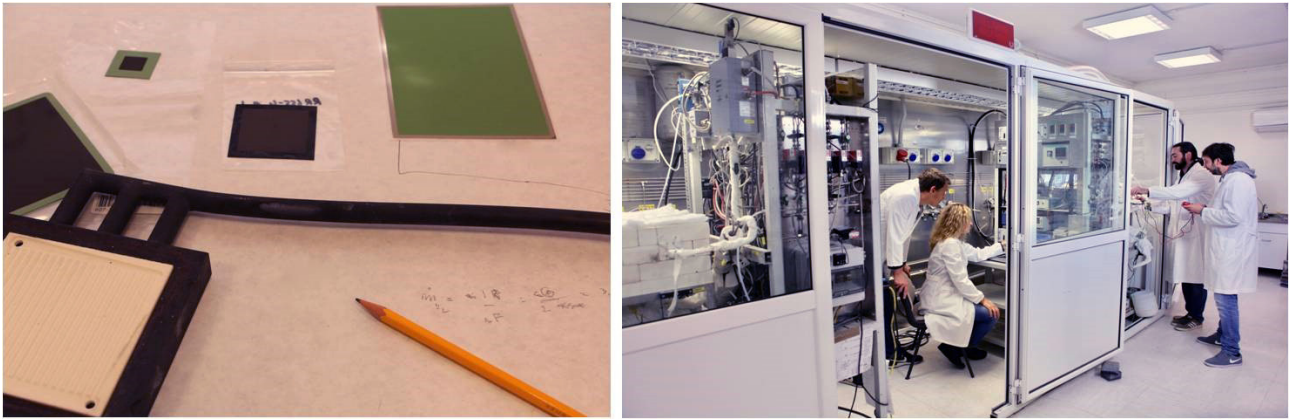


Fig. 1 A sinistra, celle a combustibile ad ossidi solidi (SOFC) di diversa dimensione; a destra, impianti sperimentali nei laboratori ENEA

tiene conto dell'intero ciclo di produzione del combustibile) [2,3,4,5].

Risulta evidente che, se l'idrogeno prodotto da fonti di energia rinnovabili (FER) è il vettore d'elezione per la transizione energetica, è altrettanto vero che le celle a combustibile sono la tecnologia chiave per esprimerne al massimo le sue potenzialità ed i suoi benefici. Ma non solo. Gli elettrolizzatori – sistemi che producono idrogeno a partire dalla molecola d'acqua, alimentati solo con energia elettrica – sono sostanzialmente delle celle a combustibile ottimizzate per lavorare in modalità inversa: la stessa tecnologia è quindi contemporaneamente alla base sia della produzione che dell'utilizzo efficiente del vettore energetico "green" per eccellenza. E se questo non fosse abbastanza convincente, le celle a combustibile ad ossidi solidi (SOFC) possono addirittura lavorare in maniera reversibile: questo significa che uno stesso impianto può produrre idrogeno (da eccesso di energia da FER) e utilizzarlo per produrre energia quando necessario. Su quest'ultima intrigante possibilità delle SOFC che negli ultimi anni ha acceso un forte interesse nella comunità scientifica, l'ENEA ha preso parte a tre progetti europei, riguardanti sia l'ottimizzazione di dispositivi reversibili SOC (progetto BALANCE [6]), sia la standardizzazione delle procedure di con-

trollo dei futuri dispositivi (progetto SOCTESQA [7] e AD ASTRA [9]).

Sostenibilità, sicurezza, circolarità e ostacoli allo sviluppo

La sostenibilità delle celle a combustibile si misura soprattutto nel loro periodo di utilizzo, grazie all'elevata efficienza di conversione del combustibile che porta a una significativa riduzione delle emissioni di gas serra e di altri fattori impattanti legati al consumo di combustibile. Così, pure la sicurezza delle FC è principalmente legata allo stoccaggio di combustibile utilizzato per alimentare: il loro funzionamento fa sì che combustibile e comburente debbano essere fisicamente separati, rendendo le celle stesse intrinsecamente sicure. Nel ciclo produttivo, l'utilizzo di materiali preziosi è ristretto ad alcune decine di milligrammi di platino o iridio per ogni kW di potenza (in linea con i catalizzatori nei tubi di scappamento dei veicoli a motore). Le FC ad alta temperatura utilizzano cobalto e alcune "terre rare", ma il loro contenuto è molto inferiore che nelle batterie di eguale capacità di potenza. Tuttavia sono in corso progetti per la progressiva ulteriore riduzione di questi materiali, e – con l'aumento della commercializzazione di FC – di processi per il loro recupero dai prodotti a fine vita.

Quali sono, allora, i limiti allo sviluppo completo di una tecnologia tanto

promettente? In primo luogo, le celle a combustibile hanno costi elevati. Si stima che il costo per kW generato da celle a combustibile deve abbattersi di un fattore 10 affinché la tecnologia abbia una diffusione su larga scala ed entrare nel mercato. Gli alti costi sono dovuti ai materiali e alle tecniche di produzione utilizzati (terre rare e processi ceramici per SOFC, platino per PEM), al tempo di vita medio ancora non sufficientemente esteso e all'attuale basso effetto di scala. Indagini di mercato dimostrano che in un regime di produzione di oltre 100.000 sistemi l'anno, i costi di approvvigionamento di materiale vengono abbattuti oltre il 70% rispetto alla produzione di 100 pezzi l'anno.

Su queste tematiche l'ENEA ha concentrato le proprie risorse contribuendo, nell'ambito di diversi progetti europei, a studiare soluzioni per limitare i fenomeni di degrado che inficiano la durata degli elementi costituenti [8,9], l'ottimizzazione dei processi produttivi e del controllo qualità [10,11] e l'integrazione dei sistemi [12], anche con impianti di produzione di gas da biomasse [13,14]. Altro fattore fondamentale è che la normativa tecnica per l'impiego di tecnologie innovative quali quelle dell'uso/distribuzione/produzione dell'idrogeno o la cogenerazione residenziale è limitata e spesso carente. Ulteriori fattori che limitano

la diffusione della tecnologia sono la mancanza di una reale infrastruttura di produzione e distribuzione (eventualmente di stoccaggio) dell'idrogeno e la necessità di nuove e adeguate professionalità, sia nel campo della formazione universitaria e post-universitaria, che nella filiera di installazione e manutenzione tecnica.

Prospettive future

L'idrogeno sarà un attore principale nel panorama del nuovo Green New Deal europeo, in quanto fattore abi-

litante per la decarbonizzazione di settori produttivi quali l'industria chimica, dell'acciaio e dei trasporti.

A dimostrazione della sua importanza, a luglio 2020 è stata pubblicata la Strategia Europea sull'idrogeno, che prevede la realizzazione di interventi al fine di sviluppare un'economia di mercato basata sull'idrogeno. È quindi lecito pensare che, grazie alla loro reversibilità, le celle a combustibile, per quanto illustrato finora, vivranno una forte fase di sviluppo, soprattutto su scala industriale, sia come utilizzatori finali ad altissima efficienza del

vettore idrogeno, che come produttori di idrogeno verde (sfruttando il concomitante sviluppo delle FER), rendendo possibile l'integrazione tra la rete elettrica e la rete gas.

() Davide Pumiglia, Stephen McPhail, Viviana Cigolotti, Laboratorio Accumulo di Energia, Batterie e tecnologie per la produzione e l'uso dell'Idrogeno; Giulia Monteleone, Responsabile Laboratorio Accumulo di Energia, Batterie e tecnologie per la produzione e l'uso dell'Idrogeno*

BIBLIOGRAFIA

1. O.Z. Sharaf, M.F. Orhan, , Renew. Sustain. Energy Rev. 32 (2014) 810–853
2. M.Pehnt, Environmental Science & Policy, 11, 1, (2008), s 25-37
3. B. K. Sovacool, Energy Policy, 36, 8, 2008, 2950-2963
4. M. Pehnt, International Journal of Life Cycle Assessment, 8, 6, 2016, 365-378
5. G. Arab et al., Mechanics & Industry 15, 113-121 (2014)
6. Horizon 2020 RIA Programme, Grant Agreement n° 731224, BALANCE, <https://www.balance-project.org>
7. Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, Grant agreement n° 621245, <http://www.soctesqa.eu>
8. Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, Grant Agreement n° 325331, SCORED 2.0
9. Fuel Cells and Hydrogen2 Joint Undertaking, Grant Agreement n° 825027, AD ASTRA, <https://www.ad-astra.eu>
10. Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking, Grant Agreement n° 735160, qSOFC, <http://www.qsofc.eu>
11. Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, Grant Agreement n° 621227, NELLHI, <http://www.nellhi.eu>
12. Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, Grant agreement n° 671403, INNOSOFc, <http://www.innosofc.eu>
13. Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, Grant Agreement n° 826234, WASTE2WATTS, <https://waste2watts-project.net/>
14. Horizon 2020 RIA Programme, Grant Agreement n° 815284, BLAZE, <https://www.blazeproject.eu>