



Celle a combustibile prodotte da SOFCpower (copyright H. Munoz)

Dario Montinaro, Massimo Bertoldi  
SOFCPOWER SpA  
Mezzolombardo (TN)  
dario.montinaro@sofcpower.com

## SOFCPOWER: UNA REALTÀ ITALIANA NEL CAMPO DELL'ENERGIA DISTRIBUITA

SOFCpower SpA è una giovane industria italiana che sviluppa e produce sistemi di micro-cogenerazione ad alta efficienza per applicazioni stazionarie. La tecnologia SOFCpower si basa sullo sviluppo di moduli e sistemi per la cogenerazione di calore ed energia elettrica (CHP) mediante celle a combustibile ad ossidi solidi (SOFC). L'azienda è presente nel mercato dei sistemi stazionari con diversi prodotti tra i quali un modulo cogenerativo da 1 kW elettrico di tipo murale, l'ENGEN™-1000, e uno a basamento da 2,5 kW elettrici in grado di offrire un'efficienza elettrica pari al 50% e un complessivo superiore al 90%.

SOFCpower SpA è una giovane industria italiana che sviluppa e produce sistemi di micro-cogenerazione (produzione combinata di calore ed energia elettrica) per applicazioni stazionarie e di remote power. La società, che ha sede a Mezzolombardo, in provincia di Trento, è stata fondata nel 2006 sulla base di attività di sviluppo avviate negli anni precedenti dal gruppo industriale Eurocoating-Turbocoating. Nel 2007, SOFCpower ha acquisito la tecnologia della società svizzera HTceramix SA (HTc), spin-off dell'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Grazie alla pluriennale esperienza nel campo delle SOFC, il gruppo di System Engineering EPLF-LENI è tuttora un partner strategico per attività di testing, validazione e simulazione a livello di stack e di sistemi. La società, che conta attualmente circa 40 dipendenti, è distribuita su due sedi operative, una sita presso il Business Innovation Centre di Mezzolombardo, in provincia di Trento, e l'altra in Svizzera presso Losanna. Nel 2008, grazie ad un progetto cofinanziato dalla Provincia Autonoma di Trento, SOFCpower ha costruito, in Mezzolombardo, un impianto pilota per la produzio-

ne di celle, stack e sistemi di cogenerazione di piccola taglia. La capacità produttiva dell'impianto è attualmente di 2 MW/anno, corrispondente a circa 2.000 celle per settimana. Si tratta di una capacità sufficiente per lo sviluppo di prodotto, per le campagne di field test e la validazione dei processi produttivi prima dello scale-up a livello industriale.

SOFCpower ha fatto numerosi investimenti per garantire il controllo qualità in produzione, per assicurare la completa catena di distribuzione, dalle singole celle utilizzate per gli stack fino all'assemblaggio di piccoli sistemi. Le attrezzature per la produzione di celle, installate in laboratori ad ambiente controllato, includono linee produttive di tape casting, screen

printing, spray coating, forni ad alta temperatura e strumentazione per il controllo qualità.

Un cospicuo lavoro è stato, inoltre, condotto nella progettazione e realizzazione di banchi prova per la caratterizzazione elettrochimica, sia di singoli componenti, che di sistemi di cogenerazione. Questo ha permesso a SOFCpower di rafforzare internamente un prezioso bagaglio di competenze che è stato fondamentale per lo



Fig. 1 - Banchi testing per la caratterizzazione di pile SOFC all'interno dell'impianto pilota di Mezzolombardo (copyright H. Munoz)

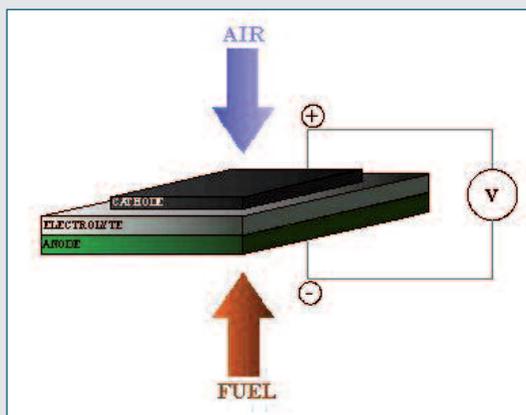


Fig. 2 - Struttura tipica di una cella a combustibile

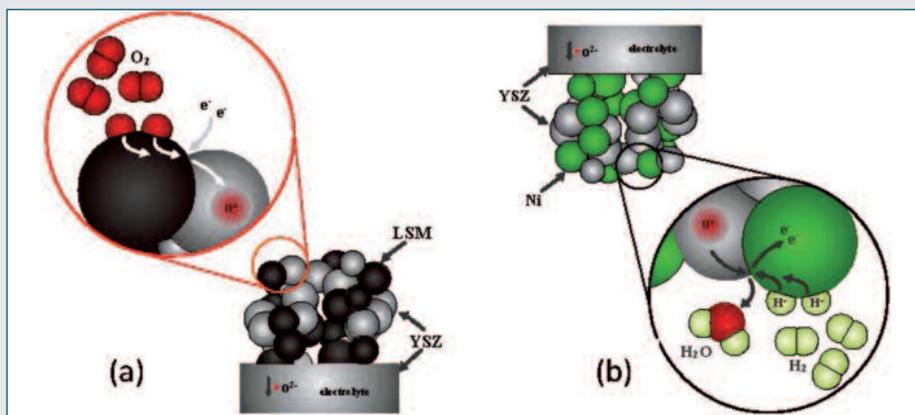


Fig. 3 - Meccanismo delle due semireazioni (a) al catodo e (b) all'anodo.

sviluppo dei sistemi integrati. Negli ultimi due anni, nell'impianto pilota di Mezzolombardo, sono stati prodotti oltre 10.000 celle, 800 pile e 50 cogeneratori (Fig. 1). Grazie al controllo completo della catena di distribuzione, SOFCpower ha potuto confermare la competitività dei propri prodotti, con costi inferiori a 1000 €/kW<sub>e</sub>, per volumi di produzione a partire da 50 MW/anno.

## Celle a combustibile ad ossidi solidi

Le celle a combustibile sono dispositivi elettrochimici che convertono direttamente l'energia chimica di una reazione di ossidazione in energia elettrica. La struttura di base di una cella a combustibile consiste in due elettrodi porosi dove avvengono le reazioni di ossidazione del combustibile e riduzione dell'ossigeno (Fig. 2). I due elettrodi sono separati da uno strato di elettrolita, che è un conduttore ionico. Nel caso più generale di una cella alimentata con idrogeno, la comune reazione di ossidazione del combustibile:



può essere scomposta nelle due semireazioni agli elettrodi:



Il potenziale di cella è governato dalla ben nota equazione di Nernst. L'elettrolita è il trasportatore di carica e la sua conducibilità determina l'intervallo di temperatura di funzionamento della cella. Esistono quindi molti tipi di celle a combustibile, che si differenziano per materiali e per il meccanismo di trasporto attraverso l'elettrolita. Nelle celle a membrana polimerica (PEFC), per esempio, l'elettrolita è un polimero conduttore di ioni idrogeno, mentre nelle celle a carbonati fusi (MCFC) la reazione avviene grazie al trasporto di ioni carbonato.

Nel caso specifico delle celle a combustibile ad ossidi solidi (SOFC), l'elettrolita è un conduttore di ioni ossigeno, tipicamente a base di ossido di zirconio in fase cubica, e le tipiche temperature di esercizio sono superiori a 600 °C. Il catodo è costituito da un ossido a conducibilità elettronica o a conducibilità mista ionica-elettronica, che catalizza la riduzione dell'ossigeno e favorisce il trasferimento di ioni ossigeno all'elettrolita (Fig. 3a). A circuito chiuso, l'ossigeno migra attraverso l'elettrolita per raggiungere l'anodo, dove reagisce con gli ioni idrogeno adsorbiti sul catalizzatore, per liberare una molecola di acqua. Dato che entrambe le reazioni agli elettrodi richiedono la presenza di *punti tripli*, cioè di siti dove le spe-

cie gassose siano in prossimità dell'interfaccia tra catalizzatore e conduttore ionico, molto spesso entrambi gli elettrodi contengono anche una determinata percentuale del materiale di cui è composto l'elettrolita. Rispetto ad altre tipologie di cella, nelle quali l'elettrolita è in forma liquida, le celle ad ossidi solidi presentano il vantaggio di essere interamente costituite da componenti solidi, prevenendo così eventuali spostamenti del liquido e riducendo i problemi di corrosione. Data l'elevata temperatura di funzionamento, inoltre, le SOFC presentano una maggiore versatilità nella scelta del combustibile e possono essere alimentate anche con idrocarburi superiori e con miscele di gas contenenti monossido di carbonio. Lo sviluppo delle SOFC inizia già negli anni Cinquanta. Storicamente, la prima generazione di celle era costituita da elettrodi sottili applicati su uno strato di elettrolita molto spesso, che costituiva anche il supporto meccanico della cella.

Data l'elevata resistenza ohmica dell'ossido di zirconio e l'elevato spessore dell'elettrolita, per ottenere buone prestazioni erano necessarie temperature di esercizio prossime a 1.000 °C. In tempi recenti, grazie ai progressi nello sviluppo dei materiali e delle tecnologie di produzione, si è sempre più affermata una moderna architettura di cella, dove il supporto meccanico è costituito dall'anodo, mentre l'elettrolita è uno strato molto sottile (ca. 10-20 micron). Proprio grazie allo spessore ridotto dell'elettrolita, questa configurazione permette di ridurre la temperatura di esercizio nell'intervallo 700-800 °C, pur mantenendo una bassa resistenza ohmica. La riduzione della temperatura di funzionamento permette, ovviamente, di orientare la scelta dei materiali verso prodotti generalmente meno costosi e più stabili nel tempo, con ovvi benefici dal punto di vista della produzione su larga scala e dell'affidabilità dei sistemi di cogenerazione. I vantaggi appena citati, uniti ad una serie di altre caratteristiche, hanno spinto SOFCpower ad investire sullo sviluppo di celle supportate da anodo con geometria planare.

L'anodo è tipicamente un composito metallico/ceramico (cermet) costituito da nichel e ossido di zirconio. A livello produttivo, l'anodo viene fabbricato a partire da ossido di nichel, che sarà successivamente ridotto a nichel nella fase di primo avviamento della cella. Il catodo, catalizzatore per la reazione di riduzione dell'ossigeno, è generalmente un ossido semiconduttore di struttura tipo perovskite, di composizione generalmente abbastanza complessa. La scelta della composizione del catodo è relativamente flessibile e determina alcune delle principali proprietà elettrochimiche delle SOFC. I materiali catodici attualmente considerati come stato dell'arte sono di tipo (La,Sr)MnO<sub>3</sub> per impiego ad alta temperatura (T= 800-900 °C) e (La,Sr)(Co,Fe)O<sub>3</sub> per applicazioni a temperature intermedie (T= 700-800 °C).

## Progetti di ricerca

Per supportare lo sviluppo di prodotto, a medio e a lungo termine, SOFCpower ha preso parte a diversi progetti europei del Sesto Programma Quadro (FP6), tra cui Real-SOFC, FlameSOFC e SOFC600, ed è attualmente coinvolta in 8 progetti del Settimo Programma Quadro (FP7), in cui collabora con diversi partner industriali ed accademici, su temi di ricerca rivolti allo sviluppo di nuove tecnologie. Obiettivo del progetto ASSENT, è l'aumento dell'efficienza del sistema tramite il ricircolo dei gas anodici. Il lavoro è centrato sul design del sistema, sistemi di controllo e sviluppo di componenti critici.

Entrambi i progetti: GENIUS e DESIGN, sono rivolti ad incrementare l'affidabilità dei sistemi di controllo. L'obiettivo è di raggiungere una conoscenza basilare del comportamento dello stack e del sistema per creare un appropriato strumento diagnostico in grado di prevenire il danneggiamento e permettere di estendere la vita dello stack. Questi strumenti diagnostici sono ideati per essere integrati nei primi sistemi SOFC, che saranno impiegati nelle prime campagne dimostrative di field testing.

I progetti LOTUS, RAMSES e ADEL si avvalgono dei dati ottenuti nel FP6 tramite il progetto SOFC600. Il progetto LOTUS ha l'obiettivo di sviluppare ed integrare un sistema funzionante a 600-700 °C. Il progetto RAMSES è rivolto alla produzione di celle SOFC supportate da metallo, che saranno destinate alla realizzazione di stack di futura generazione. Il progetto ADEL, è rivolto allo sviluppo di sistemi di elettrolisi per temperature intermedie (700 °C), sfruttando energia e calore da fonti rinnovabili.

Nel 2012 l'azienda ha avviato due nuovi progetti: il T-CELL, che si rivolge allo sviluppo di celle funzionanti in modalità "triodo", in cui l'attività catalitica dell'anodo è incrementata tramite l'applicazione di un potenziale attraverso un circuito ausiliario e il progetto dimostrativo ENE.FIELD che prevede l'installazione di circa 1.000 sistemi sul campo e che coinvolge, oltre alla SOFCpower, altri 8 produttori di cogeneratori di tipo SOFC e PEM. A livello nazionale, la società ha preso parte ad un progetto di 3 anni, denominato EFESO, indirizzato allo sviluppo di sistemi micro-CHP per applicazioni residenziali. Il progetto, iniziato nel 2009, coinvolge 15 partner, tra cui ENEA, STMicroelectronics e diverse università italiane. Il progetto è coordinato dal gruppo Ariston Thermo.

## Tecnologia e ricerca

La tecnologia SOFCpower si basa sullo sviluppo di moduli e sistemi per la cogenerazione di calore ed energia elettrica mediante celle a combustibile ad ossidi solidi (SOFC).

L'architettura delle celle SOFC prodotte da SOFCpower si basa su celle supportate da anodo. Questi dispositivi, di spessore complessivo di circa



Fig. 4 - Linea di Tape Casting e forno per sinterizzazione installati nell'impianto pilota di Mezzolombardo

0,3 mm, hanno un elettrolita a base di ossido di zirconio dello spessore di 10 micron. L'anodo è invece un composito a base di nichel e ossido di zirconio. Sia anodo che elettrolita vengono prodotti per tape casting, una tecnica di formatura molto utilizzata nel campo dei materiali ceramici avanzati, che consente di ottenere film di spessore tipicamente compreso tra pochi micron ed un millimetro. Questa tecnologia, consiste nel disperdere la materia prima, una polvere ceramica, in una sospensione formata da uno o più solventi e da un legante polimerico. La sospensione, ottimizzata per garantire ben definite proprietà dal punto di vista della stabilità e della reologia, viene colata su un nastro e "tagliata" ad uno spessore predefinito, mediante un sistema di due lame regolate con un sofisticato sistema di controllo micrometrico. Il nastro ottenuto, in seguito all'evaporazione del solvente, è perfettamente flessibile e può essere facilmente tagliato nella geometria desiderata, da cui si otterrà una semicella (anodo/elettrolita), pronta per la sinterizzazione ad alta temperatura (Fig. 4).

Fin dall'inizio della sua esperienza nel campo delle SOFC, SOFCpower ha puntato su processi di tape casting basati su sospensioni acquose. L'impiego di acqua, in luogo dei più comunemente utilizzati solventi organici, pone un grosso limite nella formulazione delle sospensioni, ma fornisce innumerevoli vantaggi dal punto di vista della sicurezza, impatto ambientale e manipolazione, oltre a ridurre significativamente i costi di produzione. Dopo la prima sinterizzazione, la cella è pronta per un nuovo stadio produttivo, che consiste nella stampa del catodo mediante serigrafia ed un nuovo ciclo di sinterizzazione, questa volta a temperatura intermedia. Lo sviluppo nel campo delle tecnologie ceramiche, per la produzione di stack, non si limita tuttavia alla fabbricazione delle celle, anche se queste costituiscono il cuore del sistema. Le buone prestazioni elettrochimiche dimostrate dalle celle non sono, infatti, sufficienti per garantire la durabilità di un sistema di cogenerazione, dove intervengono molteplici effetti, molti dei quali ancora parzialmente sconosciuti. Per questo motivo, le problematiche relative al degrado rappresentano alcuni argomenti di primaria importanza nelle attività di ricerca e sviluppo condotte da SOFCpower. Proprio lo studio dei fenomeni di degrado e lo sviluppo di modelli, che permettano di valutare e prevedere la durabilità di sistemi SOFC operativi in condizioni reali, sono gli obiettivi del progetto SOFC-life, in cui la società è coinvolta tramite HTceramix. L'applicazione dei modelli sviluppati in questo progetto, su sistemi SOFC basati su materiali convenzionali, permetterà quindi di ridurre notevolmente la durata dei test necessari per valutare il degrado dei sistemi, con benefici in termini di costi di R&D e tempi di entrata sul mercato. Tra i problemi di degrado, quello di maggiore impatto è sicuramente l'avvelenamento del catodo ad opera di com-

posti volatili di cromo, rilasciati dagli acciai ferritici di cui è composto lo stack. SOFCpower ha sviluppato un processo di deposizione di un coating protettivo, che limita la corrosione dell'acciaio e previene l'evaporazione del cromo, pur mantenendo l'elevata conducibilità elettrica richiesta nei collettori di corrente.

Per concludere la panoramica sui principali materiali sviluppati per la produzione di sistemi SOFC, occorre citare i materiali sigillanti. Un'efficiente separazione dell'ambiente anodico (combustibile) dall'ambiente catodico (aria) è indispensabile per garantire il corretto funzionamento di uno stack. Il sigillante, oltre ad essere perfettamente impermeabile ai gas, deve anche essere chimicamente inerte rispetto ai materiali con cui è a contatto, deve essere un isolante elettrico e deve avere delle soddisfacenti proprietà meccaniche oltre ad una buona resistenza ai cicli termici. I materiali sigillanti più impiegati nel settore SOFC sono normalmente paste ceramiche o vetro-ceramiche, ma esistono anche alternative rappresentate da brasanti e sistemi di tenuta in compressione. La ricerca nel campo dei sigillanti, è attualmente uno dei settori di maggior interesse per gli sviluppatori di pile SOFC planari. La robustezza e la durabilità delle celle ad ossidi solidi non dipende solo da fattori interni, come il degrado intrinseco dei materiali, ma principalmente da fattori esterni, come la presenza di impurezze nel gas combustibile. Un esempio tipico è rappresentato dai composti solforati normalmente impiegati come odoranti nella fornitura di gas naturale per uso civile. Lo zolfo, contenuto in questi composti, è una delle principali fonti di avvelenamento per l'anodo, pochi ppm di H<sub>2</sub>S sono già sufficienti per degradare irreversibilmente le prestazioni elettrochimiche della cella. Nonostante i sistemi di cogenerazione attualmente sviluppati prevedano un'unità di desulfurizzazione a monte dello stack, eventuali oscillazioni della concentrazione di H<sub>2</sub>S nel combustibile, dovute a

condizioni transitorie o di malfunzionamento del filtro, richiedono un determinato livello di tolleranza allo zolfo. In questo ambito, SOFCpower, in collaborazione con il CNR-ITAE di Messina, conduce delle attività rivolte allo sviluppo di anodi tolleranti a brevi escursioni della concentrazione di H<sub>2</sub>S, permettendo la reversibilità dell'avvelenamento per esposizione a basse concentrazioni di zolfo, fino ad alcune decine di ppm.

## Prodotti

L'azienda produce e commercializza diversi prodotti, tra i quali celle e pile di celle planari nonché moduli cogenerativi funzionanti a gas naturale o GPL a vari livelli di integrazione. Il focus dell'azienda è attualmente rivolto al mercato della micro-cogenerazione di tipo on-grid, con sistemi di piccola taglia da 1 e 2,5 kW elettrici. Un prodotto è costituito dal modulo denominato HoTbox™ (Fig. 5a). Si tratta di un modulo cogenerativo che integra una pila di taglia 1 kW e comprende il preriscaldatore catodico, un'unità di reforming di tipo CPOx, un post-combustore, oltre all'isolamento termico, alle resistenze elettriche per l'avviamento, e all'interfaccia di collegamento fluidi ed elettrici.

Per gli integratori, l'HoTbox™ rappresenta una piattaforma ideale proprio perché permette di concentrare le proprie competenze nell'integrazione e sviluppo del sistema, senza preoccuparsi delle problematiche connesse con i componenti ad alta temperatura che costituiscono il generatore con celle SOFC (Fig. 5).

Oltre all'HoTbox™ SOFCpower ha sviluppato un prototipo di sistema micro-CHP murale per installazioni domestiche denominato ENGEN™-1000 (Fig. 5b). Questo prodotto è realizzato in due taglie di potenza elettrica: 500 W e 1000 W. In maniera del tutto simile ad una normale caldaia a condensazione, le principali connessioni tra l'ENGEN™-1000 e il sistema di riscaldamento domestico sono la linea di alimentazione del gas naturale alla normale pressione di rete, l'uscita di acqua calda e il ritorno di acqua fredda, un camino a tubi coassiali per lo scarico di gas, lo scarico dell'acqua di condensa aria oltre ovviamente alle connessioni alla rete elettrica. L'unità lavora con gas naturale fornito dalla rete di distribuzione (metano o GPL). La produzione di energia elettrica di questo sistema ha un'efficienza compresa tra il 30-32% e la co-generazione raggiunge gli stessi valori di efficienza delle più innovative caldaie a condensazione. Il sistema ENGEN® può fornire fino a 8.750 kWh/a di energia elettrica e, combinato con una caldaia standard da parete, attiva solo pochi momenti della giornata per rispondere ai picchi di richiesta energetica, può fornire tutta l'energia termica per l'impianto di riscaldamento domestico con un risparmio di gas naturale ed un ritorno economico dell'investimento in pochi anni.

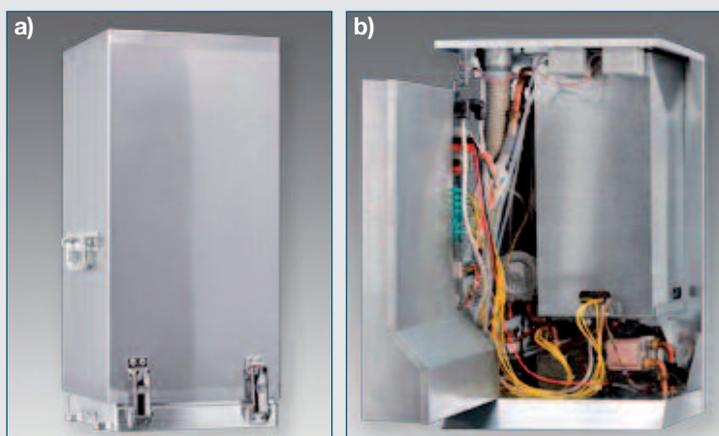


Fig. 5 - Prototipi di HotBox™ (sinistra) ed ENGEN® (destra) (copyright H. Munoz)

# ABSTRACT

## **SOFCpower: an Italian Reality in the Distributed Power Generation**

SOFCpower is an Italian company that develops and manufactures high efficiency power modules in close collaboration with European heat appliance OEMs and utilities for domestic cogeneration and distributed power generation. SOFCpower high temperature electroceramic devices are based on planar Solid Oxide Fuel Cells (SOFC) technology. SOFCpower focusses on the small size stationary market with two distinct products: a 1 kW wall-hung appliance and a 2.5 kW floor-standing appliance able to provide 50% electric and 90% overall efficiency.