

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA GESTIONALE

DIEM

TESI DI LAUREA

in

Impatto Ambientale dei Sistemi Energetici

*ANALISI COMPARATIVA DI SISTEMI ENRGETICI INTEGRATI CON CELLE A
COMBUSTIBILE*

CANDIDATO
Alessandra Camaioni

RELATORE:
Chiar.mo Prof. Antonio Peretto

Anno Accademico 2010/11

Sessione III

pdfMachine

Is a pdf writer that produces quality PDF files with ease!

Produce quality PDF files in seconds and preserve the integrity of your original documents. Compatible across nearly all Windows platforms, if you can print from a windows application you can use pdfMachine.

Get yours now!

pdfMachine

Is a pdf writer that produces quality PDF files with ease!

Produce quality PDF files in seconds and preserve the integrity of your original documents. Compatible across nearly all Windows platforms, if you can print from a windows application you can use pdfMachine.

Get yours now!

INDICE

Introduzione	pag 1
1. Le Celle a Combustibile	pag 3
1.1 Caratteristiche principali	pag 3
1.2 Struttura di una Cella a Combustibile	pag 5
1.3 Efficienza e termodinamica delle FC	pag 6
1.3.1 Polarizzazioni di cella	pag 7
1.3.2 Rendimento di cella	pag 7
1.3.3 Effetto dei diversi parametri operativi sulle prestazioni di cella	pag 9
1.4 Tipologie di Celle a Combustibile	pag 10
2. L'Idrogeno	pag 19
2.1 Caratteristiche principali	pag 19
2.2 La produzione dell'idrogeno	pag 19
2.3 Tipologie di stoccaggio	pag 23
2.4 Distribuzione dell'idrogeno	pag 24
2.5 La questione sicurezza	pag 25
3. Tecnologie Innovative	pag 26
3.1 Fuel Cell applicate alla Microgenerazione civile	pag 26
3.1.1 Sistema di generazione di potenza con FC di tipo PEM	pag 27
3.2 Le Fuel Cell applicate al settore Automotive	pag 31
3.3 Fuel Cell per applicazioni portable-APU Auxiliary Power Unit	pag 36
3.4 Fuel Cell a carbonati fusi per la cattura della CO₂ dai gas combustibili	pag 37
3.5 Fuel Cell integrate con sistemi energetici Tradizionali a combustibile fossile	pag 39

3.5.1 Caratteristiche generali	pag 39
3.5.2 Caratteristiche delle TG e delle FC integrate in un Sistema Ibrido	pag 39
3.5.3 Configurazioni possibili del Sistema Ibrido	pag 42
3.5.4 Sviluppo del Sistema Ibrido FC-TG	pag 43
3.5.5 Simulazione dinamica dei Sistemi Ibridi	pag 44
3.5.6 Esigenze di ricerca e sviluppo per Sistemi Ibridi TG-FC	pag46
3.5.7 Ottimizzazione delle performance di un Sistema Ibrido	pag 50
3.5.8 Strumenti di analisi per il sistema Combinato FC-TG	pag 51
3.5.9 Integrazione ed ottimizzazione dei Sistemi Ibridi ed esigenze del mercato	pag 52
Conclusioni	pag 56

Introduzione

Panorama energetico

La domanda di energia elettrica primaria presenta una crescita preoccupante a livello mondiale a causa della spinta dei Paesi industrializzati che tendono ad assorbire quote sempre maggiori di energia e soprattutto per il crescente fabbisogno connesso all'aumento della popolazione nei paesi in via di sviluppo. Attualmente, circa l'85% del crescente fabbisogno annuo di energia viene soddisfatto mediante la combustione di grandi quantità di risorse fossili (petrolio, carbone, gas naturale), che immettono nell'atmosfera pericolose sostanze inquinanti quali ossidi azotati (NOx), monossido di carbonio (CO) ed idrocarburi incombusti (HC) e contribuiscono per circa i due terzi alle emissioni globali dei gas ad effetto serra, principalmente anidride carbonica (CO₂), metano (CH₄), protossido di azoto (N₂O), i cui livelli di concentrazione media nella troposfera sono tali da destare serie preoccupazioni. Come è noto la comunità scientifica internazionale è concorde nel considerare la riduzione delle emissioni dei gas ad effetto serra necessaria al mantenimento delle attuali condizioni climatiche della Terra.

Quindi, se si vogliono realmente contenere le emissioni di gas serra occorre un forte impegno sulle tecnologie. Senza un'accelerazione tecnologica sarà di fatto impossibile raggiungere risultati concreti in materia di contenimento delle emissioni.

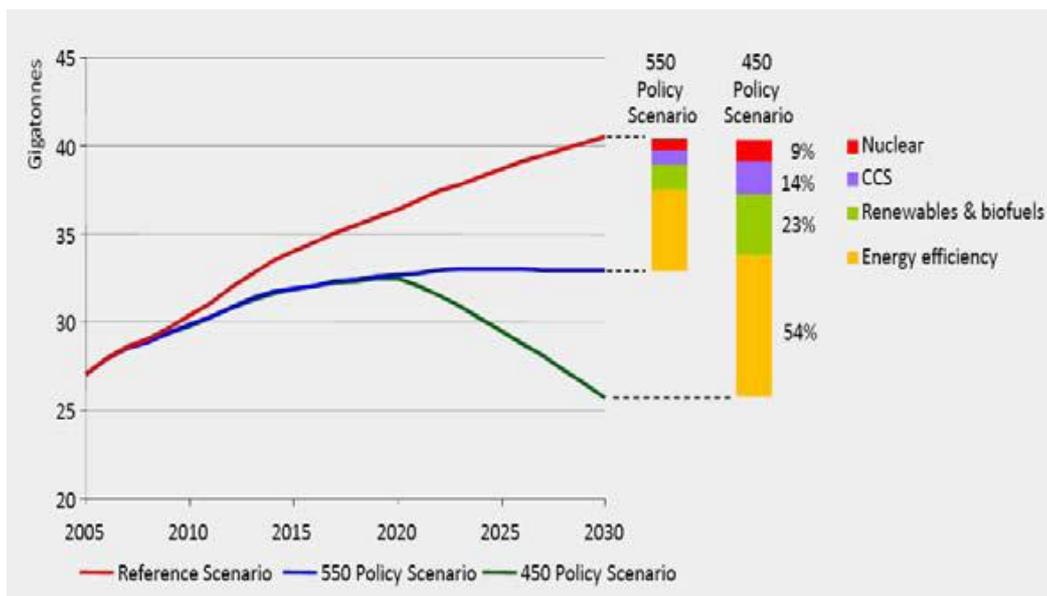


Figura 1: Sviluppo delle tecnologie per la mitigazione dei gas serra

Il grafico conferma che, nel contenimento dei gas serra, la parte maggiore e più realizzabile degli obiettivi dipende dall'impegno sull'efficienza energetica. Seguono rinnovabili, CCS e nucleare.

Le tecnologie che saranno disponibili da qui al 2020 hanno vantaggi differenziati non solo in termini di riduzione delle emissioni, ma anche di sicurezza energetica ed opportunità industriali che offrono. La loro efficacia aumenta quando vengono impiegate per aumentare l'efficienza energetica. Quest'ultima non è solo la risorsa più importante per la riduzione delle emissioni ma anche quella che consente di ridurre la domanda di fossili e di utilizzare tecnologie disponibili o in via di acquisizione a breve termine.

pdfMachine

Is a pdf writer that produces quality PDF files with ease!

Produce quality PDF files in seconds and preserve the integrity of your original documents. Compatible across nearly all Windows platforms, if you can print from a windows application you can use pdfMachine.

Get yours now!

1. LE CELLE A COMBUSTIBILE

1.1 Caratteristiche principali

Le celle a combustibile, per le ragioni sopra elencate, sono considerate dall'intera comunità scientifica una tecnologia di conversione energetica a basso impatto ambientale e ad alto rendimento. Oltre a tali vantaggi, l'impiego di tali sistemi prospetta anche sostanziali benefici economici dovuti all'alta efficienza di conversione. Tali benefici diverranno concreti non appena le tecnologie specifiche raggiungeranno gli obiettivi proposti dal mondo della ricerca e dell'industria in termini di costi di produzione, affidabilità e durata. Le applicazioni possono essere diverse:

- L'impiego per la generazione stazionaria di energia elettrica ed eventualmente termica in cogenerazione;
- L'impiego automobilistico;
- Applicazioni di tipo "portable" per cellulari, PC portatili etc.

Come già enunciato le principali caratteristiche positive delle celle a combustibile si riassumono in due concetti: limitate emissioni inquinanti ed elevata efficienza. Per quanto riguarda le emissioni inquinanti bisogna sottolineare il fatto che la maggior parte delle celle utilizzano l'idrogeno come combustibile primario, ciò porta ad una significativa diminuzione delle emissioni, specialmente quelle di CO₂, in quanto l'unico prodotto delle reazioni interne è l'acqua. Anche nel caso in cui venga impiegato come combustibile primario metanolo, metano, miscele di idrocarburi con idrogeno etc. il fatto che non avviene un processo di combustione all'interno della cella evita l'emissione di sostanze inquinanti allo stato gassoso. Le celle infatti lavorano a temperature relativamente basse (200-1000°C) il che implica basse o nulle emissioni di NO_x. In fine, l'assenza di parti in movimento limita le emissioni sonore e le sollecitazioni meccaniche il che rende possibile l'installazione anche in ambiente urbano e domestico.

A proposito invece delle efficienze elevate è bene evidenziare che le celle presentano mediamente rendimenti elettrici tra il 40 e il 50%, che possono arrivare anche al 70% per alcune tecnologie. Inoltre i rendimenti non dipendono dalle taglie di potenza, il che è dovuto alla modularità cioè la possibilità di riprodurre le stesse prestazioni di sistema su scale diverse, collegando in serie più celle della stessa tipologia. Il funzionamento a carichi parziali poi non porta ad un decadimento delle prestazioni, anzi per un ampio range di funzionamento il rendimento tende a rimanere quasi costante. Questa caratteristica è agli antipodi del tipico funzionamento di un qualunque altro sistema energetico. Come ultimo pregio le celle a combustibile presentano temperature interne e di uscita dei prodotti di reazione superiore alla temperatura ambiente, perciò rendono disponibile una

certa potenza termica impiegabile per applicazioni cogenerative di diversa natura il che implica un ulteriore vantaggio in termini di minor consumo di risorse energetiche.

Di contro però le celle a combustibile presentano diversi limiti che attualmente rappresentano la ragione fondamentale del loro scarso impiego. In primo luogo l'idrogeno non è una fonte primaria di energia ma piuttosto un vettore energetico. Per produrlo da una fonte primaria è necessaria una spesa energetica che nella maggior parte dei casi comporta emissioni inquinanti. Se poi le celle vengono alimentate con combustibili fossili si ha comunque un certo livello di emissioni di CO₂. Il limite più stringente che rende la tecnologia non ancora competitiva è costituita dal problema dei costi che risultano eccessivi se confrontati alle soluzioni tradizionali basate sull'utilizzo di combustibili fossili. Le stime di costo specifico d'investimento al 2007 sono dell'ordine di 2000-3000 euro/kW (per sola cella) per le tecnologie più semplici e più mature già in commercio. Perché le celle a combustibile diventino una tecnologia economicamente competitiva bisogna che questi valori si riducano almeno di un ordine di grandezza. Nel settore automobilistico addirittura la competitività con i MCI ci sarebbe solo con costi dell'ordine di 50 euro/kW. I problemi di costo sono legati più che ai materiali impiegati (catalizzatori, elettroliti, etc.) al processo di lavorazione necessario e quindi possono essere superati solo con un adeguato sviluppo tecnologico. Inoltre, per le tipologie di celle più promettenti per le elevate efficienze esistono ancora dei problemi di affidabilità che rendono le fuel cell una soluzione non del tutto matura. Altro limite non trascurabile che riguarda più o meno tutte le tipologie di celle è dato dalle ridotte densità di potenza che determinano grandi dimensioni d'impianto.

1.2 Struttura di una cella a combustibile

Una cella a combustibile converte l'energia chimica dei reagenti in energia elettrica sotto forma di corrente continua. La struttura fisica di una fuel cell è un elettrolita posto tra un catodo ed un anodo.

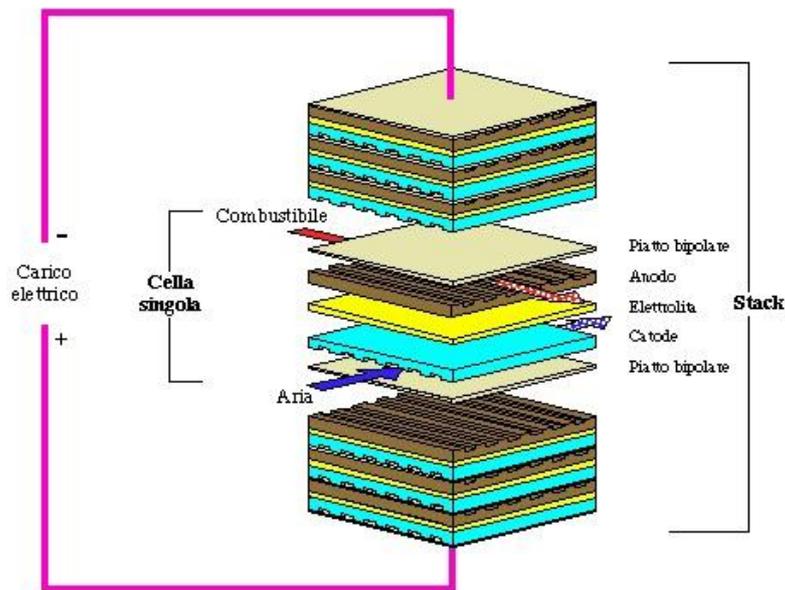


Figura 2: Schema di una fuel cell

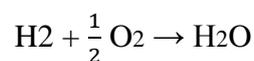
In una tipica applicazione il combustibile viene fatto affluire all'anodo (elettrodo negativo) in modo continuativo e un ossidante, che di solito è l'ossigeno contenuto nell'aria, alimenta il catodo (elettrodo positivo). La reazione elettrochimica agli elettrodi produce una corrente elettrica che attraversa l'elettrolita. Questo processo, di natura elettrochimica, avviene a temperature relativamente basse ed è favorito dalla presenza di un catalizzatore disposto sull'elettrodo. L'ossidazione del combustibile provoca la liberazione di elettroni che possono spostarsi lungo l'anodo che è di fatto un conduttore e permette la migrazione degli elettroni verso un circuito esterno. Dalla parte opposta del circuito c'è il catodo dove avviene la riduzione della specie ossidante, di solito aria, fatta affluire al comparto catodico mediante un opportuno compressore. La liberazione di elettroni genera la creazione di ioni positivi all'anodo del tipo H^+ ; questi ioni, grazie alla presenza dell'elettrolita migrano verso il catodo dove si ricombinano con gli elettroni e le molecole di ossigeno dando luogo a molecole d'acqua. Il processo elettrochimico di ossidazione di un combustibile gassoso che avviene all'interno di una fuel cell costituisce una valida alternativa alla reazione di combustione, processo che è invece indispensabile in tutte le macchine termiche. Se si confrontano i due processi si può notare che il processo elettrochimico relativo alla fuel cell è una

trasformazione diretta dell'energia chimica del combustibile in energia elettrica. A valle della cella è richiesto solo la trasformazione della corrente continua in alternata tramite un convertitore DC/AC. I rendimenti elevati a basse temperature infatti sono proprio dovuti al fatto che la conversione energetica non passa attraverso lo stadio intermedio di trasformazione in calore.

Possiamo dire che il principio di funzionamento di una fuel Cell è molto simile a quello di una batteria anche se ci sono alcune differenze. In una batteria infatti tutta l'energia viene immagazzinata nel dispositivo stesso, quindi essa smetterà di produrre energia elettrica quando i reagenti chimici si saranno consumati. In una fuel cell invece il combustibile e l'ossigeno vengono forniti senza interruzione e quindi l'energia è prodotta fino a quando c'è alimentazione.

1.3 Efficienza e termodinamica della cella a combustibile

In condizioni di equilibrio l'energia massima disponibile in una cella, che opera a temperatura e pressione costante, è data dalla variazione di energia libera di Gibbs connessa alla reazione:



ed è espressa dalla relazione:

$$\Delta G = -n F V_{rev}$$

dove:

n = numero di elettroni che partecipano alla reazione

F = costante di Faraday.

V_{rev} = potenziale reversibile di cella.

In queste condizioni la quantità di calore prodotta è pari a:

$$Q_{rev} = T\Delta S = \Delta H - \Delta G$$

in cui ΔH è la variazione di entalpia connessa con la reazione globale di ossidazione del combustibile. In condizioni standard la tensione massima termodinamicamente ottenibile da una cella a idrogeno e ossigeno che produce acqua in forma liquida è:

$$V_{rev} = \frac{-\Delta G}{nF}$$

La differenza di potenziale tra gli elettrodi è massima (V_{rev}) quando non si ha passaggio di corrente nel circuito esterno, nel momento in cui questa comincia a circolare si ha un allontanamento dall'equilibrio per insorgere di fenomeni di polarizzazione (sovratensioni). Si ha quindi una diminuzione dell'energia elettrica fornita, rispetto a quella teorica, con corrispondente aumento del calore prodotto.

1.3.1 Polarizzazioni di cella

- **Polarizzazione di attivazione** è connessa alla velocità delle reazioni elettrodeiche. La polarizzazione di attivazione è collegata allo stadio lento della reazione, contribuiscono a questo tipo di polarizzazione i processi che implicano l'assorbimento di reagenti, il trasferimento di elettroni attraverso il doppio strato, il desorbimento dei prodotti e la natura della superficie elettronica.
- **Polarizzazione ohmica** è causata dalla resistenza al flusso di ioni nell'elettrolita e al flusso di elettroni attraverso i materiali di elettrodo: $\eta(ohm) = iR$
in cui R è la resistenza totale di cella. La perdita più significativa è quella che si verifica nell'elettrolita e può venire ridotta diminuendo la distanza tra gli elettrodi e utilizzando elettroliti ad elevata conducibilità ionica.
- **Polarizzazione di concentrazione** è dovuta a fenomeni di trasporto di massa che ostacolano le reazioni agli elettrodi (diffusione dei gas attraverso l'elettrodo, soluzione e dissoluzione dei reagenti e dei prodotti in e fuori l'elettrolita).
- **Polarizzazioni di cella** agiscono sempre nel senso di elevare il potenziale dell'elettrodo al quale decorre la reazione di ossidazione (anodo) e di abbassare il potenziale dell'elettrodo al quale decorre la reazione di riduzione (catodo). Abbiamo:

$$V_a = E_a + |\eta_a| \text{ all' Anodo}$$

$$V_c = E_c - |\eta_c| \text{ al Catodo}$$

il potenziale di cella quando circola corrente può esprimersi come:

$$V_{cella} = E_{rev} - \eta_c - \eta_a - iR$$

1.3.2 Rendimento di cella

Rendimento termodinamico

Il rendimento energetico di una cella è definito come:

$$\varepsilon(T) = \frac{\text{lavoro utile}}{H}$$

e può essere espresso come il rapporto tra il massimo lavoro elettrico ottenibile e l'energia totale disponibile. Il valore di questo rapporto dipende dalla natura delle reazioni che avvengono in cella e dalla temperatura e pressioni a cui si opera. In condizioni standard (25 °C e 1 atm) il rendimento di una cella ideale che opera con idrogeno e ossigeno puri è pari all'83% o al 94,5%, a seconda se l'acqua prodotta si consideri allo stato liquido o gassoso.

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 (V_{rev}). Si definisce rendimento di tensione il rapporto tra tensione sotto carico e tensione teorica:

$$\varepsilon(V) = \frac{V}{V_{rev}}$$

Rendimento di corrente -Utilizzazione del combustibile

La corrente elettrica prodotta da una reazione può essere definita dalla legge di Faraday:

$$IF = I_{max} = \frac{n F df}{2adt}$$

In cui $\frac{df}{dt}$ è la velocità con cui si consumano le specie reagenti (numero di moli di reagente consumate al secondo). La corrente effettivamente erogata dalla cella è minore della I_{max} ed è collegata alla quantità di combustibile realmente consumato:

$$I = n F \left(\frac{df}{dt}\right)_{cons.}$$

Si definisce rendimento di corrente il rapporto:

$$\varepsilon(I) = \frac{I}{I_{max}} = U$$

normalmente riportato come utilizzazione del combustibile.

1.3.3 Effetto dei diversi parametri operativi sulle prestazioni di cella

Le prestazioni di una cella a combustibile sono influenzate da parametri operativi quali temperatura, pressione, composizione dei gas, nonché da fattori come la presenza di impurezze, che modificano il potenziale reversibile di cella e le polarizzazioni.

L'effetto della temperatura e della pressione sul potenziale reversibile V_{rev} di una cella a combustibile può essere analizzato sulla base delle variazioni di energia libera di Gibbs con la temperatura e la pressione. Dal momento che la variazione di entropia nella reazione dell'idrogeno con ossigeno è negativa, il potenziale di cella diminuisce con il crescere della temperatura. Per la stessa reazione, la variazione di volume è negativa e quindi il potenziale reversibile aumenta con l'aumentare della pressione. In pratica un aumento di temperatura:

- riduce la polarizzazione ohmica, in quanto aumenta la conducibilità ionica dell'elettrolita;
- migliora i fenomeni di trasporto, riducendo la polarizzazione di concentrazione;
- migliora la cinetica di reazione, riducendo la polarizzazione di attivazione;
- migliora in genere la tolleranza alle impurezze presenti nel gas di alimentazione.

Inoltre più è alta la temperatura, più efficiente è il recupero energetico del calore prodotto dalla cella. La temperatura massima nei vari tipi di cella è assegnata di volta in volta sulla base della stabilità dei materiali utilizzati. Problemi pratici limitano la temperatura massima di esercizio di una cella, poiché i fenomeni di corrosione, i problemi di sinterizzazione e cristallizzazione dei catalizzatori, la degradazione dell'elettrolita sono tutti accelerati da un aumento di temperatura.

Un aumento della pressione di esercizio della cella ha effetti positivi sulle prestazioni, in quanto produce più alte pressioni parziali dei reagenti in prossimità degli elettrodi, migliora i fenomeni di trasporto e la solubilità dei gas nell'elettrolita, tutti fenomeni che attenuano la polarizzazione di cella, ed inoltre contribuisce a ridurre le perdite di elettrolita (se liquido) che sono particolarmente evidenti nelle celle ad alta temperatura. Pressioni più alte creano però maggiori problemi ai materiali di cella e richiedono un più stringente controllo delle pressioni differenziali.

1.4 Tipologie di celle a combustibile

Le fuel cell si caratterizzano in primo luogo per la tipologia di elettrolita impiegato. L'elettrolita è un conduttore ionico che può essere un solido, un sale fuso, una soluzione acida o alcalina. Un'altra classificazione è possibile anche in base alla temperatura di funzionamento, tipicamente si distingue tra celle a bassa temperatura (AFC, PEMFC, PAFC) e celle ad alta temperatura (MCFC, SOFC).

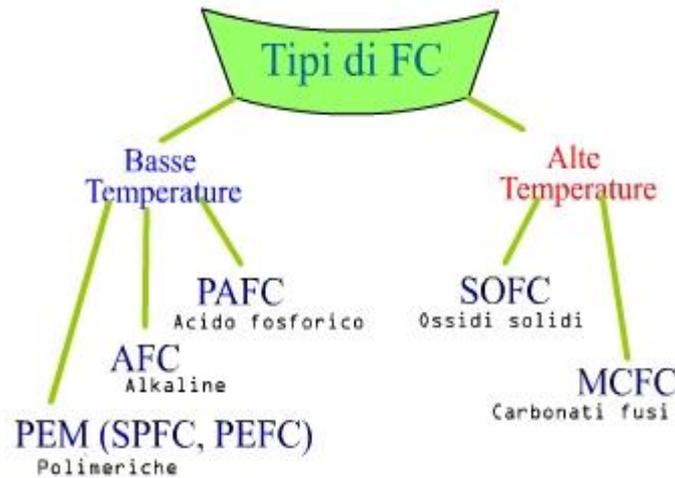


Figura 3: Tipologie di Celle a Combustibile

Schematizzando:

	Tipo di elettrolita	Temperatura [°C]
AFC	Soluzione: Sali(KOH, NaOH) disciolti in acqua	70-250
PEMFC	Membrana polimerica	60-110
PAFC	Acido fosforico concentrato	190-200
MCFC	Sali fusi	600-700
SOFC	Materiale ceramico solido	650-900

Tab 1: Classificazione delle diverse tipologie di FC

AFC-Alkaline Fuel Cell

La cella AFC impiega come elettrolita una soluzione di KOH(idrossido di potassio) o NaOH(idrossido do sodio) in acqua. La temperatura di funzionamento rientra in una range tra 70°C e 250°C. le reazioni di ossido riduzione fondamentali sono:

- $H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$
- Catodo: $\frac{1}{2}O_2 + 2e^- + H_2O \rightarrow 2OH^-$

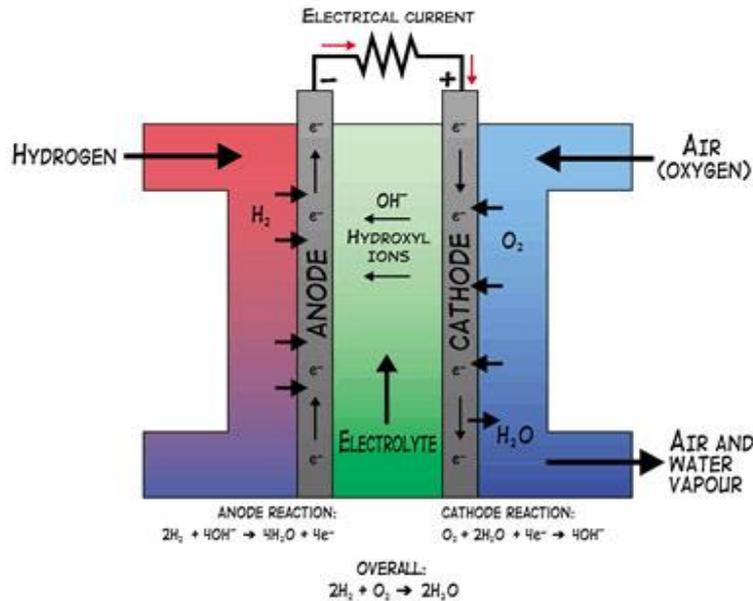


Figura 4: Schema di un'Alkaline Fuel Cell

Lo ione OH è trasportato in soluzione dal catodo all'anodo. L'acqua si forma al comparto anodico, ma una frazione deve essere fatta ricircolare al catodo. Questa tipologia di cella a combustibile presenta notevoli limitazioni, la principale è che l'elettrolita liquido perde efficacia se contaminato dalla CO₂, quindi la cella può funzionare solo se alimentata direttamente ad ossigeno puro. Questo fatto impedisce l'impiego di aria prelevata dall'ambiente e determina costi inaccettabili per un impiego in grande scala della AFC. Questa tecnologia, impiegata in passato per applicazioni militari o aerospaziali, non è considerata promettente anche se le densità di potenza ottenibili sono superiori rispetto alle tecnologie FC.

PEMFC-Polymer Electrolyte Membrane

Tra le celle a combustibile a bassa temperatura su cui la ricerca punta per uno sviluppo commerciale in grande scala troviamo la Polymer Electrolyte Membrane, anche indicata come PEM. Il suo campo di funzionamento ottimale si colloca tra i 60 e i 110 °C. I rendimenti sono dell'ordine del 35-40%. Il range di potenze elettriche prodotte con le PEMFC esistenti è di circa 1-3000 kW per applicazioni stazionarie.

L'elettrolita è costituito da una membrana isolante nei confronti degli elettroni, ma è in grado di produrre protoni. Infatti il materiale, noto commercialmente come Nafion, è un polimero con struttura a catena; a questa catena sono legati gruppi acido sulfonato i cui ioni sono in grado di migrare. Le reazioni di ossidazione sono:

- Anodo: $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H} + 2\text{e}^-$
- Catodo: $2\text{H} + \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

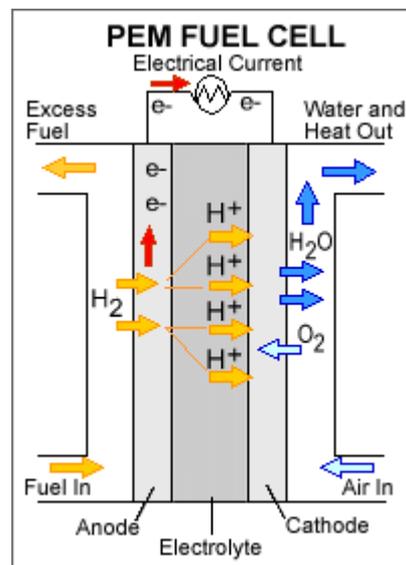


Figura 5: Struttura di una Polimer Electrolyte Membrane Fuel Cell

si nota che l'ossidazione del combustibile dà luogo a produzione di acqua, che viene prodotta al comparto catodico. Affinché la cella possa funzionare come generatore è necessario che sugli elettrodi siano disposte opportune quantità di catalizzatore, il quale accelera le reazioni di ossido riduzione, altrimenti non significative alle temperature sopra indicate. Il catalizzatore è tipicamente platino, più costoso delle altre tipologie di catalizzatori impiegabili solo per le celle funzionanti a

temperature maggiori. Il platino impregna gli elettrodi che sono costituiti da fogli di carbonio poroso, in grado di farsi attraversare dai gas reagenti.

L'insieme anodo-membrana-catodo presenta uno spessore decisamente ridotto, inferiore al millimetro. Questo è il vantaggio principale delle fuel cell di tipo PEM, e cioè la possibilità di ottenere densità di corrente elevate a fronte di un ridotto ingombro. Le densità di potenza raggiungono valori dell'ordine del W/cm^2 .

Il flusso ossidante può essere costituito da aria: l'elettrolita infatti non è sensibile alla CO_2 . Il CO invece è dannoso perché porta ad un rapido avvelenamento del catalizzatore. Il tenore di CO ammesso nei gas affluenti è di circa 10 ppm. Questo limite non è sufficiente, per esempio, per i gas provenienti da reforming di metano, contenenti percentuali di monossido di carbonio fino all' 1%. Le PEM richiedono dunque alimentazione ad idrogeno pressoché puro.

Il regolare funzionamento della cella è possibile solo se viene assicurato un corretto bilancio dei flussi di acqua internamente alla cella stessa. In particolare la membrana deve essere sufficientemente idratata per condurre gli ioni, mentre gli elettrodi non devono essere eccessivamente imbevuti di acqua, poiché altrimenti si ostacolerebbe il flusso dei gas verso l'interno. Dunque le correnti di gas entrante devono essere opportunamente idratate e l'acqua in eccesso, formata dalla reazione e accumulata nella cella, deve essere evacuata. Ne consegue un funzionamento della cella stabile ed affidabile solo se costantemente monitorato. Le problematiche di gestione dei flussi d'acqua sono tipiche solo di questa tipologia di fuel cell.

Dal punto di vista costruttivo la cella si compone di una serie di unità anodo-membrana-catodo: tra il catodo di una unità e l'anodo della successiva è disposto un piatto bipolare conduttore; su di esso sono realizzati opportuni canali che consentono ai gas di giungere a contatto con gli elettrodi. La pila di diversi elementi disposti in serie prende il nome di stack (Figura 6).

La ragione per cui si utilizzano più celle elementari in serie è che la singola unità non è in grado di erogare una tensione superiore a circa 1,25 Volt, mentre dal punto di vista degli utilizzatori le tensioni richieste sono più elevate. Per ottenere potenze dell'ordine di 5-10 kW con superfici di cella contenute si utilizzano anche 50 unità-cella, ciascuna con spessore di pochi millimetri.

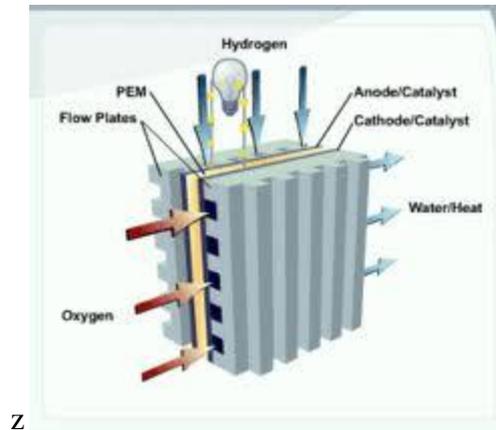


Figura 6: Unità anodo-membrana-catodo di una PEMFC

Le PEM, rispetto alle altre tecnologie, presenta il vantaggio di assenza di vere e proprie soluzioni acide e corrosive al suo interno. Le densità di potenza ottenibili sono più alte di tutte le altre tipologie, se si escludono le celle ACF. Questa proprietà le rende molto appetibili specialmente per l'industria automobilistica. Un altro vantaggio che rende le PEM per l'industria automobilistica è il ridotto tempo di avviamento e la possibilità di variare il carico erogato con rapidità. Le basse temperature inoltre determinano una ridotta sollecitazione termica dei materiali. Le temperature interne, bassissime rispetto ad un sistema energetico con combustione ed anche rispetto ad altre tipologie di FC, portano ad assenza di emissioni di NOx. Se si esclude il processo di produzione del H₂ che sta a monte, la PEM genera in uscita solo acqua, e non è dunque sorgente di alcun inquinante.

Il limite principale delle PEM è costituito dal fatto che richiedono idrogeno puro (privo di CO) all'anodo. Pertanto per un funzionamento con continuità sul lungo periodo, si deve attualmente prevedere una stazione di reforming di combustibili a monte, con successiva purificazione dei gas da CO. Soluzioni alimentate direttamente con una miscela di metanolo ed acqua sono in fase di ricerca. Altro limite alla penetrazione sul mercato risiede nei costi ancora attualmente elevati: si parla di valori non inferiori ai 2000/5000 euro/kW. Il costo deriva fondamentalmente dall'impiego del catalizzatore pregiato(platino) necessario date le basse temperature di funzionamento. Le PEM necessitano poi di un corretto bilanciamento dei flussi interni d'acqua, altrimenti la membrana può seccarsi o al contrario gli elettrodi possono allagarsi, compromettendo così la funzionalità del sistema. Questa problematica è assente in celle con elettrolita differente. Il funzionamento della cella risulterebbe più efficiente a pressioni più elevate, ma la potenza spesa per comprimere l'aria all'interno del comparto catodico riduce il beneficio: in base ad un bilancio di sistema le pressioni ottimali si collocano al di sotto dei 3 bar. Infine per installazioni stazionarie le applicazioni

cogenerative sono limitate ai livelli di temperatura: si può però pensare di usare il calore scaricato per produrre acqua calda.

PAFC-Phosphoric Acid Fuel Cell

Le PAFC costituiscono la tecnologia più sviluppata tra le diverse disponibili. Il funzionamento avviene a partire da 150°C fino a 200°C. tipiche unità già disponibili sul mercato hanno taglie attorno ai 200 kW. I rendimenti di sistema indicati dai costruttori si collocano in un range di 38-45%. L'elettrolita è costituito da acido fosforico(H₃PO₄) concentrato. Le reazioni elettrochimiche sono:

- Anodo: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$
- Catodo: $2H^+ + \frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow H_2O$

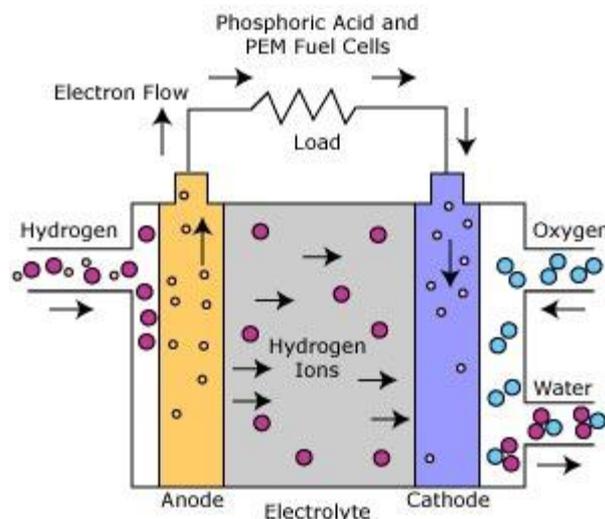


Figura 7: Schema di una Phosphoric Acid Fuel Cell

Le caratteristiche principali di questo tipo di cella sono:

La cella viene alimentata ad aria, dunque non è necessario l'ossigeno puro. L'anidride carbonica non è dannosa per il catalizzatore come il monossido di carbonio. I limiti di accettabilità sono valutati attorno allo 0,5% di CO. Anche lo zolfo è dannoso e il contenuto massimo tollerabile per questa sostanza è di 50 ppm. È perciò necessario un filtro purificatore se si impiega un reformer esterno per la produzione di idrogeno. L'affidabilità è invece una proprietà che distingue queste celle dalle altre, essa infatti è la tecnologia di celle a combustibile più matura e l'unica che ha raggiunto la fase di commercializzazione. I costi attuali(attorno ai 3000 euro/kW) rappresentano un limite anche se tra tutte le tecnologie disponibili questa è la meno costosa. Un altro problema da non

sottovalutare è che queste celle utilizzano un acido, fortemente corrosivo e potenzialmente pericoloso. Inoltre se le temperature diventano troppo alte l'acido si destabilizza compromettendo il funzionamento della cella. Non ci sono in questo caso, diversamente a quanto accade per altri tipi di celle, problemi di gestione di flussi interni d'acqua; le temperature raggiungono valori dell'ordine dei 100°C e l'acqua che si produce internamente viene rimossa facilmente sotto forma di vapore. La PAFC è molto adatta a soluzioni cogenerative e viene usata per la produzione di acqua calda a partire da 45°C o vapore a temperature attorno ai 140°C.

MCFC-Molten Carbonate Fuel Cell

La MCFC usa come elettrolita una miscela di Sali fusi come il carbonato di litio, di sodio o di potassio. Si tratta di una prima tipologia di fuel cell ad alta temperatura, infatti per avere il sale fuso occorre che la temperatura raggiunga i 600-700°C. i rendimenti sono valutati attorno al 45-50% e le reazioni agli elettrodi sono:

- Anodo: $\text{H}_2 + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- + \text{CO}_2$
- Catodo: $\text{CO}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-}$

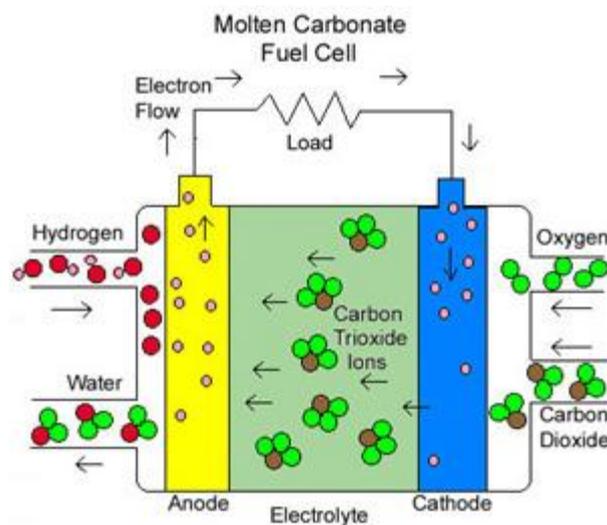


Figura 8: Struttura di una Molten Carbonate Fuel Cell

Lo ione carbonato CO_3^{2-} viene trasportato dal catodo all'anodo. In questo caso la CO_2 non costituisce un veleno, anzi è richiesta al catodo per dar luogo al flusso ionico. Poiché all'anodo si riforma la stessa sostanza, si può pensare di farla ricircolare verso il catodo, dato che l'anidride

carbonica presente nell'aria entrante dall'esterno non è sufficiente. In queste celle l'alta temperatura permette di impiegare catalizzatori meno costosi (Nichel invece che Platino). La temperatura elevata permette di operare con combustibili diversi dal solo idrogeno, ad esempio la cella può essere alimentata con metano. Il catalizzatore non è sensibile alla CO, anzi questo può essere utilizzato come combustibile nel caso di reforming interno. Si evitano così apparati come il reforming esterno e purificatori da CO. La presenza di CO₂ al catodo però comporta maggiore complessità, inoltre la cella è sensibile allo zolfo che deve essere inferiore alle 0,5 ppm. Questa tecnologia promette rendimenti più elevati rispetto alle celle a bassa temperatura: fino al 50% in configurazioni semplici, oltre il 60-65% se si considera la possibilità di inserire la cella in un ciclo termico più complesso. La cella è sensibile ai cali di temperatura che determinano una riduzione di tensione e di efficienza. Le alte temperature generano poi problemi di instabilità dei materiali e aggressività degli elettroliti. Altri problemi si hanno poi nel controllo degli equilibri all'interfaccia dell'elettrolita con gli elettrodi. Per questa tipologia di cella sono impiegate pressioni di funzionamento fino a 10 bar, si è visto infatti che la pressione maggiore incrementa le prestazioni, ma ne aumenta i problemi di corrosione. L'affidabilità sul lungo periodo non è ancora garantita. Tutti questi limiti rendono ancora non matura questa tecnologia che sembra essere molto promettente.

SOFC-Solid Oxid Fuel Cell

Le SOFC impiegano un elettrolita solido, costituito in genere da ossido di zirconio drogato con piccole quantità di ittrio, per ottenere proprietà di conduzione ionica. Le temperature di conduzione sono elevate, da 650 fino a 900°C.

Le taglie di potenza rientrano in un range di 1kW-1MW, con ipotesi di estensione sopra i 10MW. I rendimenti di sistema potenzialmente raggiungibili sono valutati attorno al 50-55%. Le reazioni sono:

- Anodo $H_2 + O_2 \rightarrow H_2O + 2e^-$
- Catodo $\frac{1}{2} O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$

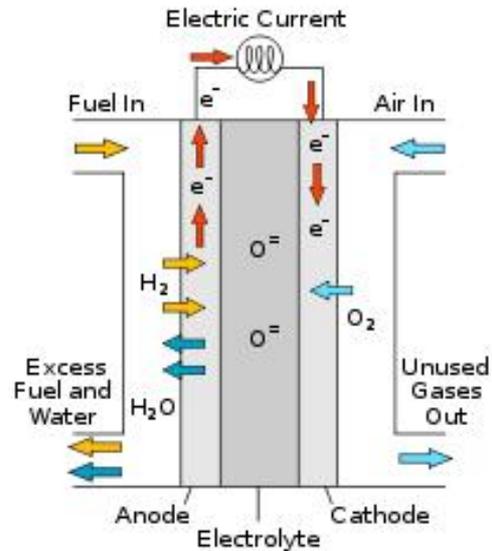


Figura 9: Struttura di una Solid Oxid Fuel Cell

Lo ione trasportato è dunque O_2 . Costruttivamente esistono due diverse tipologie di celle SOFC: una di forma planare, più semplice (meno costosa), è ottenuta stratificando i diversi componenti su più piani. Questa forma consente di avere una maggiore densità di potenza. Una seconda conformazione è di tipo tubolare, con il vantaggio di poter realizzare più semplicemente due regioni, interna ed esterna al cilindro, separando così i flussi di combustibile ed ossidante.

Esiste, dunque, una certa flessibilità di forme geometriche in cui si possono realizzare le celle, grazie al fatto che l'elettrolita si trova in fase solida. L'elettrolita solido elimina anche i problemi di contenimento di sostanze liquide e pericolose. I materiali impiegati e i processi di produzione sono costosi, limitando per ora la diffusione di tale tecnologia. Inoltre le più alte temperature esercitano una sollecitazione notevole sui materiali, da cui seguono problemi di durata. Un altro svantaggio è legato ai tempi di avviamento dell'impianto. Potenzialmente però si tratta di un tipo di fuel cell ad alto rendimento. Inoltre si possono concepire configurazioni complesse di sistemi energetici in cui inserire la SOFC sfruttandone le alte temperature per recuperare ulteriore potenza utile. Si tratta dei così detti cicli ibridi con rendimenti previsti fino al 70%. Le alte temperature, come per la MCFC, consentono di realizzare reforming sul posto, utilizzando direttamente idrocarburi come combustibile. Le SOFC presentano pressioni ottimali di funzionamento superiori a quelle caratteristiche delle celle a bassa temperatura. Una SOFC può essere alimentata con pressioni fino a 10-15 bar. Rispetto alle MCFC non necessitano di un'alimentazione di CO_2 al catodo.

2. L'IDROGENO

2.1 Caratteristiche principali

L'idrogeno è l'elemento più leggero ed abbondante dell'universo, è molto difficile trovarlo sulla Terra allo stato elementare a causa della sua estrema volatilità, ma viceversa è molto diffuso sotto forma di composti e può quindi essere prodotto a partire da diverse fonti. L'interesse per il suo impiego come combustibile deriva dal fatto che l'inquinamento prodotto è quasi nullo. Infatti se impiegato in sistemi a combustione produce vapor d'acqua e tracce di ossidi di azoto, o solo vapor d'acqua se utilizzato con sistemi elettrochimici come appunto le celle a combustibile. Rispetto agli altri combustibili, l'idrogeno è un gas incolore, inodore, non velenoso, estremamente volatile e leggero: presenta un ridotto contenuto energetico per unità di volume, mentre ha il più alto contenuto di energia per unità di massa. A fronte però di queste qualità energetiche ed ambientali, l'introduzione dell'idrogeno come combustibile e più in genere come vettore energetico richiede che siano messe a punto le tecnologie necessarie per agevolare la produzione, il trasporto, l'accumulo e l'utilizzo.

2.2 La produzione dell'idrogeno

Come detto, l'idrogeno libero non è presente in natura; per la sua produzione è necessario disporre di una sorgente chimica che lo contiene e una certa quantità di energia. Per quanto riguarda la sostanza che lo contiene essa può essere acqua, idrocarburi o altre sostanze organiche. L'energia primaria invece serve a rompere i legami esistenti nella sostanza al fine di poter estrarre l'idrogeno.

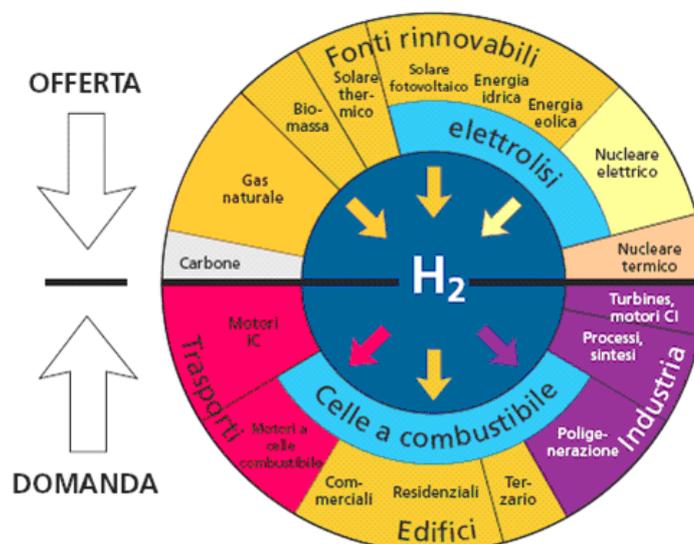


Figura 10: Tecniche di produzione dell'idrogeno

pdfMachine

Is a pdf writer that produces quality PDF files with ease!

Produce quality PDF files in seconds and preserve the integrity of your original documents. Compatible across nearly all Windows platforms, if you can print from a windows application you can use pdfMachine.

Get yours now!

Qualsiasi sia la tecnica di produzione adottata, questa comporta un certo costo energetico quantificabile con un rendimento di produzione η_{H_2} definito come il rapporto fra l'energia posseduta da 1kg di idrogeno prodotto (riferita al suo LHV) e l'energia primaria spesa per produrre 1kg di H_2 , $E_{\text{fonte primaria}}$. Le fonti primarie di partenza per la produzione di idrogeno, come si vede dalla figura 10, possono essere:

- Produzione diretta da combustibili fossili;
- Produzione diretta da biomassa;
- Produzione da energia elettrica;

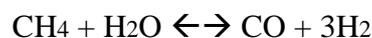
mentre i combustibili fossili e le biomasse fanno parte delle fonti energetiche primaria, l'energia elettrica è invece già il prodotto di una prima conversione da energia primaria, in quest'ultimo caso quindi, il rendimento di produzione dell'idrogeno deve tener conto anche del rendimento di conversione da fonte primaria a fonte secondaria.

Produzione da fonti fossili

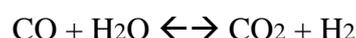
Attualmente le tecnologie più utilizzate per la produzione di idrogeno sono basate sull'impiego di combustibili fossili. L'industria chimica e di processo, infatti, lo richiede per produrre ammoniaca, la raffinazione del greggio e la produzione di metanolo. L'idrogeno viene prodotto a partire da gas naturale o da altri idrocarburi liquidi.

Produzione da gas naturale

Il processo più diffuso è quello dello Steam Reforming del gas naturale, che permette di ottenere idrogeno con il minor costo di produzione. Negli impianti di steam reforming il metano viene fatto reagire con il vapore secondo la reazione:



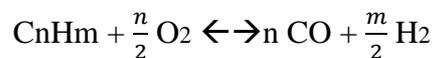
Che oltre all'idrogeno produce monossido di carbonio, il quale deve essere ossidato con la reazione di shift:



Con la quale si ottiene idrogeno. Queste reazioni richiedono apporto di energia dall'esterno ad alte temperature (800-850°C) e sono favorite dalla presenza di catalizzatori. Il processo di steam reforming richiede che nel combustibile di partenza non vi sia un quantitativo elevato di zolfo che

causa l'avvelenamento dei catalizzatori. Complessivamente, quindi, per la produzione di idrogeno sono necessari vapore, metano ed energia elettrica per gli ausiliari. Si può perciò dedurre che un tale sistema di produzione non è privo di effetti sull'ambiente, in primo luogo in termini di produzione di CO₂. Tra i prodotti della reazione di shift c'è biossido di carbonio ed inoltre ci sono apparati di combustione per generare il vapore. Lo steam reforming è adottato anche per idrocarburi più complessi del metano, ma al crescere della complessità della molecola il processo richiede quantità crescenti di energia termica e temperature più alte per cui diviene sempre meno conveniente.

L'ossidazione parziale invece è una reazione fortemente esotermica che coinvolge gli idrocarburi ed una quantità di ossigeno insufficiente per la combustione completa; tale reazione avviene a temperature tra i 1350-1600°C ad una pressione che può raggiungere i 15MPa, è un processo continuo e si basa su reazioni del tipo:



Il monossido di carbonio e l'idrogeno sono i principali prodotti di tale processo, ma sono presenti anche la CO₂, CH₄, acqua e acido solfidrico. Le proporzioni dei vari componenti nella miscela dei prodotti dipende dalla posizione di equilibrio del processo, che contempla anche la presenza di acqua: per evitare che la temperatura aumenti troppo viene aggiunto vapore acqueo che reagisce endotermicamente con l'idrocarburo, il che porta a formare una quantità di idrogeno maggiore. Poiché l'energia termica da fornire inizialmente al processo è limitata nel caso dell'ossidazione parziale, tale sistema si presta per quelle applicazioni che richiedono tempi brevi di avviamento, come nel caso dei veicoli. Lo svantaggio di questo processo, che lo rende più complesso e costoso, è la necessità di impiegare ossigeno puro per l'ossidazione parziale; inoltre le efficienze di conversione sono più limitate rispetto allo steam reforming da metano.

Per limitare l'apporto esterno di energia, infine, un processo che si impiega è l'autothermal reforming, in cui si combinano le reazioni endotermiche dello steam reforming con quelle esotermiche di ossidazione parziale.

Un'altra strada per la produzione d'idrogeno è quella del metanolo, il che implica impiegare processi di reforming caratterizzati da temperature più basse, anche inferiori ai 350°C. l'impiego dei combustibili liquidi riduce i volumi dei serbatoi e comporta una maggiore facilità di trattamento. Di contro c'è un decremento dell'efficienza totale che è intorno al 50%.

L'idrogeno, infine, si può produrre anche a partire da combustibili fossili meno pregiati e ricchi di impurità, come gli oli combustibili e i carboni attraverso processi di gassificazione. I prodotti di tali reazioni sono CO₂, H₂ e CO.

Produzione da biomasse

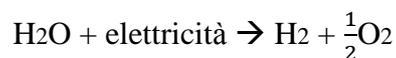
Per quanto riguarda i sistemi basati sull'impiego diretto delle biomasse bisogna sottolineare che si tratta di processi che non sono ancora impiegati industrialmente, ma sono per lo più oggetto di studio. Partendo dalle biomasse, si potrebbe produrre idrogeno evitando la combustione ed il consumo di risorse fossili, impiegando una risorsa rinnovabile. I processi allo studio sono:

- Gassificazione con vapore, prodotto sfruttando il calore generato dalla combustione di parte della biomassa;
- Pirolisi della biomassa, in assenza di ossigeno e ad alta temperatura, adatta per biomasse secche;
- Fermentazione delle biomasse, con produzione di biogas contenente essenzialmente metano e CO. Tale processo è adatto con biomasse con elevato tenore di acqua e sostanze organiche e sostanze organiche;
- Processi biochimici di produzione di idrogeno, attivati dalla fotosintesi o presenti anche in assenza di luce, dovuti a specifici microrganismi;

Per quanto riguarda la produzione di idrogeno da fonti rinnovabili i processi possono essere distinti in:

Produzione dall'acqua

L'idrogeno poi può essere prodotto dall'acqua scindendo la stessa nei suoi componenti (idrogeno e ossigeno) attraverso diversi processi, tra i quali quello più consolidato è l'elettrolisi. Schematicamente il processo è rappresentato dalla seguente reazione:



Si può notare che la reazione è inversa rispetto a quella che avviene in una cella a combustibile. Per questa ragione l'intero processo di produzione e consumo è ambientalmente sostenibile purché sia disponibile una corrispondente quantità di energia elettrica pulita in grado di alimentare il processo di elettrolisi. È immediato pensare al sole come sorgente di questa energia, sfruttabile attraverso l'utilizzo di impianti di conversione fotovoltaica. Infatti, mediante l'uso di energia solare fotovoltaica si può produrre idrogeno elettrolitico ed ossigeno che poi possono essere fatti ricombinare nelle celle a combustibile per produrre energia elettrica. Come prodotto finale di scarto si genera una quantità di acqua pura pressappoco uguale a quella di partenza, chiudendo in questo modo il ciclo senza emissioni inquinanti. Il problema fondamentale per lo sviluppo di questa

soluzione è il costo. Con l'elettrolisi dell'acqua infatti si può ottenere idrogeno puro, ma solo ad un prezzo che può diventare economicamente accettabile solo quando le innovazioni tecnologiche potranno consentire un costo estremamente basso dell'energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili o da nucleare. Perciò tale scelta non appare economicamente ed energeticamente perseguibile, se non per applicazioni particolari. La dissociazione dell'acqua può essere effettuata anche facendo uso di processi termochimici che utilizzano calore ad alta temperatura (800-1000°C) ottenuto da fonti diverse.

2.3 Tipologie di stoccaggio dell'idrogeno

L'immagazzinamento dell'idrogeno costituisce uno dei principali problemi che ostacolano la diffusione di applicazioni basate su celle a combustibile e, più in generale, l'avvento della cosiddetta "Hydrogen Economy". Da una parte, i classici sistemi di compressione e liquefazione del gas forniscono un approccio relativamente efficiente e consolidato, ma comportano enormi problemi di sicurezza, e i costi di compressione e refrigerazione sono elevati. D'altra parte, ci sono numerosi approcci alternativi allo stoccaggio dell'idrogeno, basati essenzialmente su processi di accumulo dell'idrogeno su vari materiali di supporto. Fanno parte di questa categoria i vari idruri metallici, i nanotubi di carbonio e, più recentemente, i clatrati idrati. Infine, vanno considerati i vettori di idrogeno, quali ammoniaca, metanolo ed etanolo, che si basano sul "reforming" catalitico del vettore stesso per ottenere idrogeno. Ogni forma presenta aspetti favorevoli e svantaggi e tutte, se pur in gran parte utilizzate, richiedono significativi sforzi di ricerca e sviluppo per un impiego su larga scala affidabile ed economicamente competitivo.

Compressione

Il modo più semplice ed economico per accumulare idrogeno è di utilizzarlo sotto forma di gas compresso a pressioni di 200-250 bar. Questa tecnologia non è facilmente proponibile per l'uso a bordo di auto tradizionali, a causa del peso e dell'ingombro dei serbatoi attualmente utilizzati, che rappresentano un limite all'autonomia e capacità di carico del veicolo.

Liquefazione

L'idrogeno può essere immagazzinato anche in forma liquida ad una temperatura di -253°C. L'accumulo in forma liquida sarebbe la migliore se non comportasse un aumento della complessità del sistema con conseguente aumento dei costi. Anche il costo energetico della liquefazione è considerevole, corrispondendo a circa il 30% del contenuto energetico del combustibile, contro un valore compreso tra il 4% e il 7% per l'idrogeno compresso.

Accumulo chimico

L'idrogeno può legarsi chimicamente con diversi metalli e leghe metalliche formando idruri, composti in grado di intrappolare idrogeno a pressioni relativamente basse. Il gas penetra all'interno del reticolo cristallino del metallo, andando ad occupare i siti interstiziali. Tale tecnologia consente di raggiungere densità energetiche potenzialmente maggiori dell'idrogeno compresso e paragonabili con quelle dell'idrogeno liquido. Il volume di stoccaggio si potrebbe ridurre di 3-4 volte, mentre l'energia specifica dipende dal peso specifico del metallo di base.

Esistono comunque ancora numerosi problemi da superare per la realizzazione di sistemi di accumulo veramente competitivi. Ad esempio, è necessario migliorare la stabilità strutturale e termica del materiale, per depurarlo dalle impurità presenti nell'idrogeno, per rendere compatibili temperatura e pressione con le applicazioni previste. Allo stato attuale, i materiali disponibili portano a sistemi di accumulo troppo pesanti, la ricerca per questo si sta orientando verso l'utilizzo di nano strutture di carbonio, che mostrano buone capacità di assorbimento dell'idrogeno.

2.4 Distribuzione dell'idrogeno

Per il trasporto dell'idrogeno gassoso si può pensare ad idrogenodotti. Il trasporto dell'idrogeno liquido all'interno di bombole, utilizzando autocarri, presenta problematiche complesse e sembra conveniente solo per quantità limitate e percorrenze elevate. L'esperienza accumulata nel settore della distribuzione del gas può quindi essere utilizzata in maniera molto diretta anche per la realizzazione e l'esercizio di reti di distribuzione dell'idrogeno; le maggiori differenze potrebbero risiedere nei materiali utilizzati e nei criteri di progettazione delle stazioni di pompaggio. Sebbene l'idrogeno abbia una densità energetica volumetrica minore di quella del gas naturale, esso è meno viscoso, per cui, con un'adatta progettazione, l'energia necessaria per il suo pompaggio diventa paragonabile a quella richiesta per la stessa quantità di energia trasportata con il gas naturale. Reti di distribuzione per l'idrogeno liquido, invece, risultano particolarmente costose e difficili da gestire, sono state realizzate solo per applicazioni particolarmente specializzate, come il rifornimento di veicoli spaziali.

Sono necessarie, quindi, analisi tecnico-economiche delle singole applicazioni per poter determinare quale sia di volta in volta la soluzione migliore. I metodi di stoccaggio dipendono dalle applicazioni considerate e sono critici soprattutto per l'impiego a bordo di veicoli, richiedendo un'elevata densità di energia.

2.5 La questione sicurezza

Come detto l'idrogeno non è percepibile dai sensi umani in quanto è un gas inodore, incolore, insapore, ne consegue che è difficile individuare eventuali fughe. Se disperso in ambienti chiusi può dare origine ad atmosfere sotto-ossigenate con rischio di asfissia per le persone. Inoltre esso viene classificato come "estremamente infiammabile" dalla normativa sulle sostanze e i preparati pericolosi, l'idrogeno è un elemento altamente infiammabile che può dare origine ad incendi. Il rischio di esplosioni si può verificare solo in ambienti chiusi, non adeguatamente ventilati. Purtroppo, l'idrogeno è molto più leggero dell'aria e in caso di fughe tenderà a stratificarsi nelle zone alte di un locale dove possono essere presenti pericolose sorgenti di innesco come lampade ad incandescenza. L'idrogeno è molto reattivo. Reagisce facilmente con l'ossigeno formando acqua e liberando energia ma, nella mobilità, non comporta un maggior rischio rispetto ai derivati del petrolio (benzina, diesel, GPL) e al metano. L'impiego del gas nei motori per autotrazione non rappresenta particolari pericoli. Di conseguenza, non esistono particolari norme di sicurezza se non quelle che valgono per tutti i gas infiammabili. È dimostrato, infatti, che, nel caso di incidenti, i combustibili liquidi, come la benzina, determinano spesso una rapida espansione dell'incendio sul luogo dell'incidente con il rischio di causare la perdita di molte vite umane. Al contrario, l'idrogeno tende a disperdersi rapidamente verso alto limitando i rischi. Quando, però, l'idrogeno si libera in ambienti chiusi, come autorimesse e tunnel, esiste un serio pericolo di esplosione. E in questi casi che si deve provvedere ad una adeguata ventilazione e all'impiego di efficaci dispositivi di sicurezza. Le molte perplessità per gli aspetti di sicurezza sono dovute alla poca familiarità con questo vettore, il che porta ad applicare condizioni particolarmente restrittive per la sua utilizzazione. Un'analisi attenta ridimensiona il concetto di pericolosità dell'idrogeno. Infatti, questo gas è meno infiammabile della benzina, la sua temperatura di autoaccensione è di circa 550°C, contro i 230-500°C della benzina. L'idrogeno è il più leggero degli elementi e perciò si diluisce molto rapidamente in spazia aperti. È praticamente impossibile farlo detonare, se non in spazi confinati. Quando brucia si consuma molto rapidamente, sempre con fiamme dirette verso l'alto e caratterizzate da una radiazione termica e lunghezza d'onda molto basse, quindi facilmente assorbibile dall'atmosfera. La bassa radiazione termica, fa sì che esistano poche possibilità, a meno dell'esposizione diretta alla fiamma, che materiali vicini possano essere a loro volta incendiati, riducendo così, oltre alla durata dell'incendio, anche il pericolo di emissioni tossiche. L'idrogeno, al contrario dei combustibili fossili, non è tossico, non è corrosivo ed eventuali perdite dai serbatoi non causano problemi di inquinamento del terreno o di falde idriche sotterranee.

3. TECNOLOGIE INNOVATIVE

3.1 Le fuel cell applicate alla microgenerazione civile

I fabbisogni energetici delle unità residenziali, condominiali e dei piccoli esercizi commerciali, essenzialmente elettricità, calore e freddo, sono tradizionalmente soddisfatti mediante la fornitura separata dell'energia elettrica e termica (ivi incluso il freddo). Il modello tradizionale per il soddisfacimento di tali fabbisogni prevede la generazione di energia elettrica in grandi centrali termoelettriche, distanti dal bacino di utenza metropolitano, ed il successivo trasferimento mediante la rete di trasmissione e distribuzione alle singole utenze. L'energia termica, d'altra parte, viene generata presso la singola utenza (sia essa monofamiliare o condominiale) mediante sistemi a combustione per il riscaldamento degli ambienti. L'energia frigorifera, infine, si genera mediante sistemi a compressione alimentati dalla stessa rete elettrica. Tale modello è sì collaudato ma è affetto da molteplici svantaggi, primo fra tutti un rendimento termodinamico complessivamente basso, nonché emissioni inquinanti non trascurabili e la necessità di una efficiente rete elettrica di distribuzione, che si rivela onerosa in termini di costi di investimento e di esercizio. Per l'utente finale, il tutto si traduce in ultima analisi in un costo dell'energia acquistata piuttosto elevato.

L'alternativa classica al modello sopra delineato propone grandi reti di teleriscaldamento (o teleraffreddamento) alimentate da centrali cogenerative di taglia relativamente grande, che abbinano alla produzione di elettricità la generazione di calore e/o freddo in modo centralizzato. In questo modo si eliminano parte dei problemi sopraccennati, ma permane comunque l'inefficienza nei riguardi del contenimento delle emissioni, nonché la necessità di una doppia rete, con i relativi costi, di distribuzione dell'energia termica ed elettrica.

Lo scenario tecnologico che si sta prospettando negli ultimi anni induce, di fatto, ad assegnare sempre maggiore importanza alla cosiddetta "generazione distribuita" di elettricità, calore e freddo (trigenerazione) sul territorio, modificando profondamente sia il ruolo dell'attuale rete elettrica sia quello dei sistemi a combustione/compressione per la produzione del calore/freddo. Secondo il modello di generazione distribuita si immagina l'inserimento nelle aeree metropolitane di un gran numero di micro-centrali di cogenerazione ad alta efficienza, che soddisfino una porzione significativa dei consumi energetici (elettrici, termici e di climatizzazione) delle utenze domestiche, commerciali e terziarie. Coniugando infatti i meriti termodinamici ben noti della cogenerazione con le prestazioni, in prospettiva elevate, dei più promettenti sistemi di microgenerazione, questo scenario è convenientemente associato ad un utilizzo più razionale delle risorse energetiche, oltre che alla drastica semplificazione delle infrastrutture richieste per il vettoriamento dell'energia.

Tra le tecnologie di micogenerazione i sistemi basati sull'impiego delle celle a combustibile sono i più promettenti per gli impieghi residenziali, in quanto rispondono perfettamente agli obiettivi legati ad un utilizzo più razionale delle fonti energetiche, in particolare con il miglioramento dell'efficienza di conversione delle fonti primarie, con la riduzione delle emissioni inquinanti in atmosfera e della rumorosità. Un impianto a celle a combustibile presenta un'efficienza energetica sensibilmente superiore a quella dei sistemi convenzionali, anche nelle loro configurazioni più avanzate.

Da ciò e dal loro diverso principio di funzionamento deriva una significativa riduzione della quantità di anidride carbonica (CO₂) emessa, a parità di energia elettrica e calore prodotti. Le ridotte emissioni di inquinanti atmosferici locali sono abbinate ad un livello di rumorosità estremamente basso (inferiore ai 60 dBA a 10 metri), non essendo presenti grossi organi alternativi in movimento come compressori e motori a combustione interna. Oltre alla riduzione dell'anidride carbonica, va detto che anche i livelli di emissioni degli altri inquinanti si riducono del 90% rispetto a quelli di un equivalente impianto a gas convenzionale. Il contenuto in ossidi di azoto (NO_x) e monossido di carbonio (CO) è praticamente trascurabile, essendo il funzionamento delle celle svincolato per buona parte dai tradizionali processi di combustione. Anche composti come il particolato e l'anidride solforosa (SO_x) sono trascurabili.

Come già detto poi tra le caratteristiche dei sistemi a celle a combustibile c'è anche la 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. Pure la manutenibilità nel tempo risulta da questo punto di vista vantaggiosa, proprio grazie alla modularità insita nel sistema, che oltretutto ne facilita l'ispezione e lo smontaggio in caso di malfunzionamento.

3.1 Sistema di generazione di potenza con celle a combustibile di tipo PEM

Un sistema di questo genere necessita di mettere a punto un'architettura bilanciata e completa, con tutto il necessario per la purificazione del combustibile, la relativa alimentazione, l'eventuale trattamento finalizzato alla trasformazione in idrogeno (reforming), il sistema di gestione dell'unità durante i transitori di avvio/fermata e le variazioni di carico, la conversione dell'energia elettrica generata in corrente continua nel tipo richiesto dall'utenza collegata, lo smaltimento del calore e del vapore prodotto, etc.

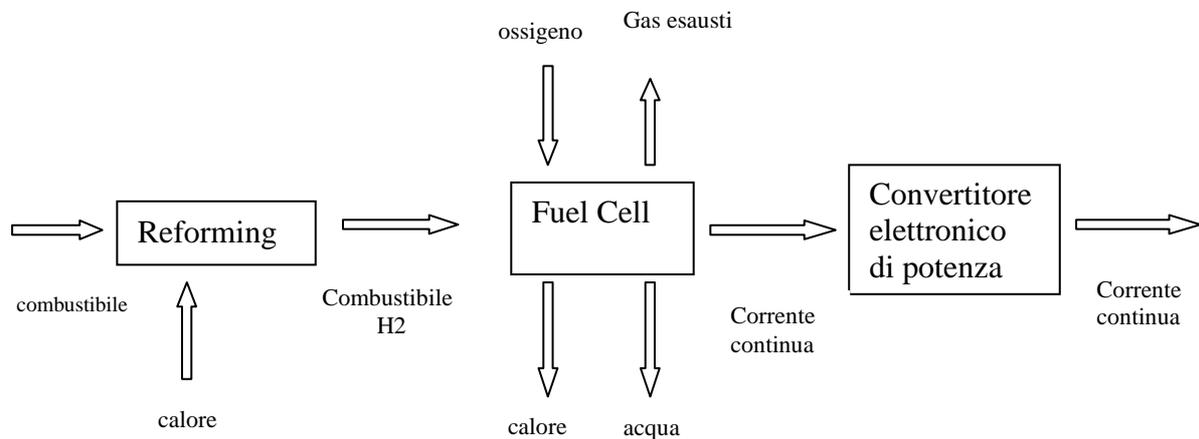


Figura 11: schema di un sistema di generazione di potenza con una PEMFC

I sottosistemi sono quindi molteplici. Il primo è quello relativo al trattamento del combustibile. In tale sottosistema il gas naturale, prima di iniziare il selezionato processo di reforming, viene desolfurato facendolo passare attraverso un composto che assorbe lo zolfo che altrimenti avvelenerebbe i catalizzatori del fuel processor e delle celle. Successivamente viene miscelato con vapore acqueo proveniente da un vaporizzatore, in maniera e in quantità opportune, e inviato nella prima vera fase del reforming, nella quale ha luogo la reazione chimica fortemente endotermica detta di “steam reforming” che trasforma l’idrocarburo e il vapore d’acqua in idrogeno e ossido di carbonio. Il processo consiste nel far passare la miscela di gas e vapor acqueo attraverso un letto di catalizzatore, mantenuto appunto ad alta temperatura per avere una soddisfacente cinetica di reazione.

Il calore necessario a tale reazione deve essere fornito da un bruciatore alimentato da metano e/o dall’idrogeno non consumato dalla cella e prelevato come esausto anodico. La miscela così prodotta, ricca in idrogeno, ma contenente un tenore di monossido di carbonio inaccettabile per le celle ad elettrolita polimerico, deve passare, dopo aver ceduto calore all’acqua proveniente dalle celle e diretta nella zona dello steam reforming, in un reattore di shift, ove la miscela viene nuovamente arricchita di vapor acqueo. La reazione di “shift reaction”, in tal caso esotermica, consiste nel far migrare, attraverso l’impiego di opportuni catalizzatori, un atomo di ossigeno dalla molecola dell’acqua a quella del monossido di carbonio, completandone l’ossidazione ad anidride carbonica e, nel contempo, ottenendo un’ulteriore molecola di idrogeno. Il monossido di carbonio residuo contenuto nel gas in uscita dal trattamento secondario deve essere ulteriormente ridotto fino a circa 20 ppm in un processo di “preferential oxidation”, che consiste nel far passare il gas attraverso un catalizzatore selettivo nella conseguente formazione d’anidride carbonica.

La progettazione del fuel processor deve contemporaneamente tener conto di molti aspetti diversi, come le differenti e complesse cinetiche chimiche, l'uso di diversi catalizzatori e il loro avvelenamento, i distinti reattori, i fenomeni di fatica termica, etc.

A valle del sottosistema di trattamento del combustibile, si trova la sezione di potenza. Nella progettazione delle celle si deve tener conto che la membrana polimerica deve essere idratata ma non allagata, e che i due elettrodi devono essere porosi per permettere la diffusione dei gas, e assicurare conduttività elettrica e resistenza strutturale. Su di essi si devono trovare dispersi i catalizzatori costituiti di platino o di una sua lega. Devono essere in quantità sufficiente per favorire le reazioni, ma non in quantità superiori dato il loro altissimo costo; si è soliti mediare tra i due fattori e concentrarsi sull'ottimizzazione dei processi di applicazione sulle superfici.

Si deve prestare poi estrema attenzione alla configurazione dei flussi agli elettrodi e nei canali di raffreddamento; le forme dei condotti, che vengono disegnate e studiate con programmi di analisi agli elementi finiti, devono essere progettate per distribuire uniformemente la portata dei reagenti: al fine di evitare dannosi gradienti di tensione, di corrente e di temperatura all'interno della cella.

Per completare la pila si aggiungono altri elementi come le piastre isolanti elettricamente e quelle di estremità, il sistema di tensione, i collettori, le tenute, l'isolamento termico, il sistema di prelievo della potenza, la strumentazione, ecc.

A valle del sottosistema di potenza si trova il sottosistema di power conditioning, la cui funzione principale è di convertire la potenza generata dalle celle come corrente continua in corrente alternata alla frequenza e tensione volute.

Sia nel caso che l'impianto sia collegato alla rete elettrica, sia nel caso l'impianto sia di tipo stand alone ci sarà un accumulatore per gestire controlli e sicurezze che per sistemi ad idrogeno sono sempre importanti e per assicurare la partenza del sistema in caso di blackout della rete semmai il sistema sia spento in quel momento per un generico motivo, alimentando ventilatori e pompe.

Tale sottosistema deve essere in grado di operare con un intervallo di tensioni in uscita dal sistema di potenza, e cioè dall'insieme degli stack di celle; tale intervallo dipende dalle condizioni operative delle celle, così come dalla portata di idrogeno, dalle pressioni e temperature dei reagenti.

Il sistema di controllo deve essere in grado di governare tutte le fasi operative secondo precise procedure e sequenze. In particolare gestirà avviamento, inizio della fase di produzione energia, variazioni di carico, spegnimento, sicurezza, prevenzione di guasti in fase operativa, protezione attiva dei componenti del sistema. Le sue funzioni sono quindi quelle di esecuzione delle sequenze e controllo continuo in regime stazionario, di monitoraggio e segnalazione dello stato operativo e dello "stato di salute" del sistema. È quindi necessario identificare tutte le modalità operative ed i possibili cambi da una all'altra per programmare le giuste sequenze. Per far questo sarà

indispensabile in fase di progetto individuare tutti i parametri critici, fissarne i valori di soglia, e definire le azioni correttive da attuare in caso di superamento dei valori di soglia (incluso l'eventuale spegnimento dell'impianto) ed i messaggi diagnostici da inviare in uscita all'utilizzatore. La funzione di controllo sarà effettuata attraverso algoritmi che tengono conto delle caratteristiche fisiche del sistema attraverso grandezze costanti e parametri che sono messi a punto anche per i transistori attraverso la modellizzazione, la simulazione numerica e la validazione sul modello reale. Il sottosistema di controllo, computerizzato e programmabile, permetterà di mantenere i valori impostati di temperatura, pressione e portate in modo stabile e sarà interfacciato agli altri controlli dell'impianto come quello della caldaia e dell'assorbitore.

Se poi nell'edificio è richiesto il condizionamento totale o di una sua parte, si considera allora una macchina ad assorbimento capace di impiegare il calore prodotto dall'unità di potenza (e dal fuel processor), altrimenti disperso nell'ambiente al di fuori della stagione di riscaldamento, producendo freddo. Oltre ai principali sottosistemi presentati ve ne sono altri per il bilanciamento dell'intero sistema quali quelli relativi al trattamento dell'aria, alla gestione termica, al recupero dell'acqua e al suo trattamento, ecc.

Gli ultimi due aspetti sono dati senza dubbio dall'uso dell'idrogeno. Questo gas può essere ottenuto in alternativa al gas naturale, che già è distribuito più uniformemente sulla terra e in paesi più stabili rispetto ai pochi che possiedono la stragrande maggioranza di petrolio, anche da altre fonti fossili; questo quindi, migliora ulteriormente i margini di sicurezza degli approvvigionamenti e considerando anche l'alta efficienza delle celle a combustibile, riduce la domanda di fonti fossili non rinnovabili, aumentandone la durata.

L'Idrogeno può essere ottenuto anche da biomasse operando così un recupero energetico da risorse altrimenti non sfruttate. Ancora più importante e interessante è la possibilità di produrre idrogeno dall'acqua attraverso l'uso di elettrolizzatori alimentati da energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili e pulite quali l'eolico, il solare e l'idroelettrico. In questo modo le emissioni di CO₂ sarebbero nulle così come tutte le altre nocive; emissioni che nel sistema in progettazione sono già minime. Per un impianto tradizionale a celle a combustibile le emissioni d'anidride carbonica sono la metà circa di un impianto a gas, già considerato ambientalmente favorevole, e quelle degli altri componenti pressoché nulle. Gli altri impianti, in particolare quelli a carbone e i motori a combustione interna, contribuiscono all'inquinamento con smog e piogge acide. Inoltre abbinando un sistema cogenerativo si risparmiano tutte quelle emissioni che sarebbero altrimenti emesse da sistemi supplementari di produzione termica. Il gas naturale d'altra parte rappresenta il primo modo per far partire la tecnologia delle celle a combustibile permettendo una diminuzione dei costi e una

familiarità nei confronti di questa nuova tecnologia. La rete di distribuzione è ampiamente diffusa su tutto il territorio, ed attualmente il reforming dal metano, tecnologicamente maturo, rappresenta il metodo più economico per ottenere idrogeno. Con questo sistema di produzione di energia poi si ottengono ulteriori benefici quali: si eliminano le canne fumarie, si ottiene un'elevata produzione di acqua calda sanitaria senza nessun limite di potenza termica installata in ambiente, maggiori rendimenti termici con conseguente riduzione dell'impatto ambientale, minore potenza termica installata, minori spese di manutenzione, non occupa spazio all'interno dell'alloggio, maggior sicurezza, maggiore vita utile dell'impianto e rispetto delle nuove normative che impongono la possibilità di collegamento a impianti di teleriscaldamento/cogenerazione. Il reale risparmio energetico si attua erogando l'effettiva potenza termica richiesta dall'utente attraverso un sistema integrato utenze/generatore in cui le unità periferiche (i moduli satellitari) informano in tempo reale la centrale termica dell'effettiva potenza richiesta. Queste informazioni, gestite dall'unità di centralizzazione dati (unità master) permettono alla caldaia di modulare sulla base della richiesta di calore e alle pompe del circuito di regolare la propria velocità in funzione di ciò che l'utente sta effettivamente richiedendo. Con questo sistema si ottimizza il consumo di combustibile e si limitano le emissioni di agenti inquinanti.

3.2 Le fuel cells applicate al settore automotive

I problemi che il trasporto stradale generano in termini di risorse consumate e di danni all'ambiente hanno spinto la costruzione di politiche tendenti a sviluppare il mercato di tecnologie innovative in grado di dare soluzione, o sollievo, a tali problemi. Queste tecnologie si inseriscono nel settore automotive, uno dei settori industriali considerati più maturi. I veicoli oggi venduti sono piuttosto simili per caratteristiche, prezzi, dotazioni e tecnologie. Nel tempo l'evoluzione ha toccato prima i motori alla ricerca di migliori performance e potenze, quindi il concetto di veicolo e da circa un decennio molto si è dedicato all'aumento della sicurezza. Il successivo salto tecnologico è tornato a concentrarsi sui motori, ma stavolta in un'ottica ambientale e di efficienza.

Da questo punto di vista si è assistito ad una crescita qualitativa continua sia sui benzina che, più recentemente, sui diesel. La frontiera del mercato automobilistico per i prossimi anni è rivoluzionare ancora una volta i motori, superando i limiti intrinseci delle attuali tecnologie industrializzate verso nuove tecnologie, nuove architetture e nuovi combustibili.

Questa evoluzione è necessaria e voluta dalla società con il fine di ottenere mezzi da una parte più "ecologici", il cui impatto sull'ambiente e sull'aria in particolare sia inferiore a quello attuale, ma dall'altra anche più efficienti, che permettano cioè un minore consumo di energia e in ultima analisi un costo inferiore.

Evoluzioni dei motori a combustione interna

Una risposta alle domande di rispetto ambientale e minori consumi è già arrivata dall'evoluzione dei motori a combustione interna tradizionali, benzina e diesel. Per i veicoli a benzina l'introduzione anni fa della marmitta catalitica e delle benzine senza piombo ma con pari performance è stato un primo passaggio, seguito negli anni più recenti dalle diverse tecnologie applicate ai motori diesel come il Common Rail, il Multijet e il TDI. Attualmente, a meno di alcuni inquinanti come le polveri sottili, il diesel ha raggiunto i livelli di emissione della benzina, migliorando inoltre i consumi e di conseguenza l'emissione di CO₂. Esiste inoltre un altro combustibile "tradizionale", il GPL, che garantisce buone caratteristiche ambientali e ha una non trascurabile diffusione anche nel nostro paese. Dal punto di vista normativo la sola evoluzione di queste tecnologie è stata finora in grado di ottemperare al sistema europeo di vincolo alle emissioni noto come "Euro".

Veicoli ibridi

Con veicoli ibridi si intende una classe di veicoli caratterizzata dalla presenza contemporanea di un motore a combustione interna ed uno elettrico. Il primo è alimentato da un combustibile fossile (attualmente benzina, ma potenzialmente sia gasolio che metano), mentre il secondo trae energia da uno stack di batterie o da un generatore collegato direttamente al motore a combustione. Il grande vantaggio di questi mezzi è che per l'utente non ci sono cambiamenti sostanziali nel veicolo e nel rifornimento di carburante in particolare, ma la maggiore efficienza del sistema garantisce migliori efficienze e quindi minori consumi ed emissioni. In sostanza tali veicoli sono per l'utente del tutto analoghi a quelli tradizionali e non necessitano di carburanti alternativi, ma sono di fatto dei veicoli con architetture elettriche con i vantaggi che questa permette in termini di efficienza, possibilità di marcia a zero emissioni, minori manutenzioni sulle parti mobili.

Le performance ambientali sono, per i modelli in commercio, piuttosto buone: raggiungono sempre gli standard Euro IV e hanno emissioni di CO₂ inferiori a veicoli di pari peso. Per contro, il costo è leggermente maggiore a causa degli stack di batterie e dei sistemi di controllo elettronico, pur restando dello stesso ordine di grandezza di un diesel.

Veicoli a metano

L'uso del metano per autotrazione non è una novità tecnologica recente, ma la sua diffusione è finora stata limitata dall'assenza di una capillare rete di distribuzione del gas oltre che da costi maggiori e maturità tecnologica inferiore. Il metano è un combustibile intrinsecamente meno inquinante, avendo minor contenuto di CO₂ e minori componenti altre, come piombo, zolfo, etc.

costituenti gli inquinanti tradizionali. Il metano è quindi in grado di garantire standard qualitativi di combustione migliori, oltre che un prezzo del carburante alla pompa inferiore, non solo per motivi fiscali. D'altro canto una politica in grado di spingerne la diffusione si scontra con la barriera della necessità di costituzione di una nuova rete distributiva, capillare ed omogenea su tutto il territorio nazionale.

Veicoli elettrici

Quella dei veicoli elettrici è una tecnologia non recente ma che di fatto non ha mai avuto il successo sperato. Il principio di utilizzare l'energia elettrica consente ai veicoli di essere completamente a zero emissioni, ma questo fatto si scontra con i maggiori costi e pesi del veicolo a causa degli stack di batterie e della limitata autonomia con ragionevoli tempi di ricarica, senza contare che la produzione di energia elettrica in Italia è lontana dall'essere a basso impatto ambientale (è responsabile di oltre il 35% delle emissioni nazionali di CO₂, di quasi il 60% di SO₂ e in misura minore degli altri inquinanti. Di fatto i veicoli elettrici in Italia non sembrano essere mezzi commercialmente appetibili, nemmeno con aiuti statali in grado di portarne il prezzo a livello degli altri veicoli.

Veicoli a idrogeno

L'idrogeno è visto a lungo termine come il carburante ideale, per una serie di motivi e caratteristiche: è potenzialmente estraibile da qualsiasi fonte energetica, garantisce alte efficienze del veicolo, è a emissioni locali zero. I veicoli a idrogeno sono ancora lontani dal vedere applicazioni commerciali credibili, ma sono già molti i prototipi di auto o veicoli più grandi (come autobus) già funzionanti. Le tipologie di auto a idrogeno sono due: quelle a combustione interna (simili nel motore ai veicoli a metano) e quelle a fuel cell. Queste ultime sono veicoli elettrici a tutti gli effetti, ma che generano a bordo l'elettricità necessaria a partire appunto dall'ossidazione elettrochimica di idrogeno gassoso nelle fuel cell. I vantaggi dell'idrogeno si hanno solo nel momento in cui esso sia effettivamente prodotto a partire da fonti energetiche meno inquinanti o non inquinanti di quelle che si vogliono sostituire, e che il suo costo di produzione sia sostenibile sul mercato. In caso contrario le potenzialità di risparmio ambientale ed efficienza sono relative solo al veicolo ma non all'intera catena energetica.

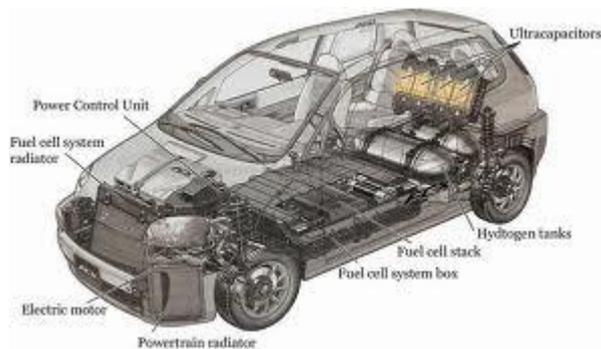


Figura 12 : Schema di un veicolo ad idrogeno

In un'automobile alimentata con fuel cell l'energia necessaria viene immagazzinata a bordo sotto forma di idrogeno liquido o gassoso in un apposito serbatoio. Nel caso si opti per utilizzare idrogeno liquido, il serbatoio è decisamente più complesso in quanto il liquido viene immagazzinato ad una pressione elevata (circa 700 atm) e a basse temperature che vengono mantenute tramite un alto isolamento del serbatoio ed un circuito di raffreddamento. Nel caso si utilizzi idrogeno gassoso, la pressione di immagazzinamento si riduce sensibilmente (circa 300 atm) così come la complessità e il peso del serbatoio. Il vantaggio di usare idrogeno liquido risiede nel fatto che a pari volume del serbatoio, esso permette una maggiore autonomia rispetto all'impiego di idrogeno gassoso. Le fuel cell (normalmente di tipo PEMFC) combinano l'idrogeno ad elevato grado di purezza presente nel serbatoio con l'ossigeno presente nell'aria per produrre energia elettrica e vapore acqueo. Per funzionare correttamente, le fuel cell a bordo necessitano di una serie di utenze secondarie, tra le quali un compressore per l'aria esterna ed un sistema di raffreddamento. Come nei veicoli puramente elettrici, il motore a bordo funziona normalmente a corrente alternata: le fuel cell producono corrente continua ed è dunque necessario un inverter. Su alcuni veicoli anche se non è un requisito necessario per il funzionamento di un'auto basata su questa tecnologia, è previsto un pacco batterie che viene impiegato per recuperare l'energia dell'auto in fase di frenata e/o discesa e di assistere la fuel cell nelle fasi di partenza e accelerazione. I vantaggi di questo tipo di veicolo rispetto ad un mezzo convenzionale a combustione interna risiedono principalmente nell'assenza di emissioni nocive al tubo di scarico fino ad arrivare ad avere zero emissioni totali qualora l'idrogeno sia prodotto sfruttando fonti rinnovabili. Inoltre, un veicolo di questo tipo, permette di mantenere inalterate le caratteristiche di guida (velocità di punta, autonomia, ripresa) rispetto ad un veicolo a combustione interna. A differenza dei veicoli elettrici, i tempi di ricarica sono piuttosto contenuti: in circa 10 minuti è possibile ricaricare completamente il serbatoio di un'autovettura con un'autonomia di 350 km. Attualmente esistono alcune flotte ridotte di veicoli a fuel cell, sono stati prodotti anche alcuni esemplari di autobus e di motocicli.

Ci sono quindi diversi impedimenti che si oppongono alla penetrazione di un veicolo ad idrogeno. Le principali barriere sono tecnologiche, strutturali, economiche e normative come l'assenza di una rete di distribuzione capillare, lo scarso rendimento delle fuel cell (attualmente le PEMFC hanno un rendimento di circa 45%), costi elevati (uno stack di fuel cell completo da 20 kW può arrivare a costare 100.000 €), assenza di una normativa completa per l'immagazzinamento di idrogeno a bordo e per la circolazione di detti veicoli. Inoltre, come già detto, l'idrogeno non è una fonte energetica e attualmente, la via più conveniente per produrlo è tramite un processo di steam reforming che utilizza gas naturale ovvero una fonte fossile.

Per quanto riguarda l'assenza di una rete di distribuzione, in Norvegia, Svezia e Germania sono stati costruite alcune stazioni di ricarica in via sperimentale con produzione di idrogeno in loco da fonti rinnovabili tramite elettrolisi. Come per i veicoli elettrici, anche i costi di produzione dei vari componenti (in particolare delle fuel cell) sono destinati a scendere qualora si inneschi un meccanismo di scala. Restano aperti alcuni problemi inerenti questa tecnologia: il rendimento del veicolo è piuttosto basso, soprattutto se confrontato con un veicolo elettrico. La produzione dell'idrogeno: il processo di elettrolisi, se alimentato da fonti rinnovabili, garantisce una produzione di idrogeno senza emissioni inquinanti ma ha un rendimento molto basso (circa 30%). In quest'ottica, un'auto puramente elettrica è decisamente più conveniente. Produrre idrogeno tramite steam reforming è decisamente più efficiente (si può arrivare ad un rendimento di circa 60-65%) ma è necessario utilizzare fonti fossili e durante il processo vengono prodotti agenti inquinanti. Esistono altre strade ma sono tuttora in forma puramente sperimentali e dunque non sfruttabili nel corto periodo. Riguardo alla sicurezza di questi veicoli, importanti passi sono stati compiuti: l'idrogeno è infatti altamente infiammabile ma se il serbatoio ed il sistema di distribuzione sono correttamente dimensionati è possibile prevedere vie di fuga e scongiurare il rischio di esplosioni.

3.3 Fuel cell per applicazioni “portable”- APU(Auxiliary Power Unit)

L'enorme crescita dei volumi di vendita di dispositivi elettronici portatili accoppiato alla necessità di aumentare la durata della batteria, ha portato i produttori di dispositivi elettronici ad esaminare nuove soluzioni tecniche. Per questa ragione la densità energetica intrinseca maggiore, propria delle celle a combustibile di piccole dimensioni rispetto alle batterie, potrebbe determinare l'affermarsi dell'utilizzo delle fuel cell per l'alimentazione di portatili elettronici di prossima generazione. Diversi settori di mercato, infatti, realizzano nuove applicazioni per le tecnologie delle celle a combustibile portatili. Negli ultimi anni, sia i produttori di celle a combustibile che le aziende di elettronica hanno fatto sforzi per sostenere questa tecnologia in funzione di una prospettiva di commercializzazione su larga scala. Le principali sfide rimangono quelle relative ai costi e agli standard tecnologici. Le fuel cell, come alternativa alle tradizionali batterie, per l'alimentazione di lettori MP3, telecamere, computer portatili, stampanti, radio, kit di istruzione e giocattoli può essere un settore chiave in termini di opportunità di mercato. Per supportare questa gamma di prodotti, le celle a combustibile portatili sono sviluppate in una vasta gamma di dimensioni che variano da meno di 5 W fino a 500 kW. Le celle a combustibile che sviluppano una potenza inferiore ai 5W vengono dette micro. I dispositivi più piccoli, quali fotocamere o telefoni cellulari sono nel range dei 3 W di potenza, mentre un computer portatile può arrivare fino a 25 W, motivo per cui richiedono una cella a combustibile di densità di potenza superiore. Per sostituire le tradizionali batterie si possono sfruttare molto bene sia le PEM fuel cell. Con questa tipologia di cella è possibile usare idrogeno direttamente limitando così le emissioni. Esistono, inoltre, mercati di nicchia come il monitoraggio ambientale remoto, che può offrire vantaggi sostanziali rispetto ai generatori o anche le applicazioni militari, come il monitoraggio a distanza, che potrebbero essere un settore di applicazione per le fuel cell anche in considerazione dell'costo medio elevato



Figura 13 : Dispositivi elettronici alimentati da fuel cell

Celle a combustibile a carbonati fusi per la cattura di CO₂ dai gas combusti

Uno studio dell'ENEA mostra un'applicazione delle Molten Carbonate fuel cell, come sistema a se stante o associato ad altre tecnologie per applicazioni in sistemi di cattura della CO₂ (CCS) da gas combusti di impianti di potenza e industriali altamente inquinanti. Il processo MCFC, quindi, può essere sfruttato oltre che per produrre energia elettrica anche per separare la CO₂ dall'ambiente catodico di cella e trasferirla concentrata a quello anodico. Il motivo di interesse risiede nel fatto che in generale, la migliore applicazione delle tecniche di separazione convenzionali si ha in processi di cattura pre-combustione nei quali i fumi sono ricchi di CO₂ (15-40 %). Processi di cattura post-combustione vengono studiati soprattutto per applicazioni in centrali termoelettriche dove però la bassa concentrazione di CO₂ nei gas combusti (3-15 %) implica il trattamento di grandi volumi di gas e proibitivi consumi energetici rendendo molto costosa la separazione. Un gas combusto, se non eccessivamente diluito in CO₂ ha una composizione simile a quella di una tipica cella MCFC, che per questo può diventare una soluzione possibile per la cattura da gas diluiti a costi meno proibitivi. Come ulteriore aspetto innovativo, la tecnologia MCFC permetterebbe la realizzazione di quello che viene denominato un sistema "attivo" di cattura intendendo con questo termine il fatto che il processo di separazione della CO₂ avviene in condizioni di normale funzionamento della cella a combustibile ovvero contemporaneamente alla produzione di energia elettrica. Un sistema attivo permette di ridurre le emissioni attraverso un incremento della potenza elettrica installata. Il ricorso ad un concentratore MCFC come sistema attivo di rimozione introduce delle incognite legate agli alti costi degli impianti MCFC, alla presenza di micro-inquinanti corrosivi nei gas e a prevedibili problemi fluido-dinamici causati dagli alti volumi di gas combusti prodotti da una centrale di potenza. I pochi studi effettuati sulle celle MCFC per applicazioni separative, in gran parte di modellistica al computer o sperimentazioni brevi con piccoli prototipi, hanno rivolto la loro attenzione alla cattura di CO₂ da impianti termoelettrici a turbogas cioè da impianti a combustione di carbone. La taglia massima di impianto MCFC attualmente in fase di sviluppo industriale è dell'ordine di 1-2 MW. Una taglia del genere si presta per un abbinamento relativamente agevole con i sistemi di generazione distribuita ed in particolar modo con gli impianti a turbo-gas in quanto caratterizzati da emissioni prive o quasi di micro-inquinanti acidi, che nella gran parte dei casi hanno un'azione corrosiva per i materiali con cui si realizzano le celle MCFC.

Il costo complessivo di un sistema di cattura con concentratore a carbonati fusi in abbinamento ad impianto di potenza dovrebbe attestarsi intorno a 85€/t CO₂, ponendosi nella parte alta della forchetta dei valori ammissibili, secondo le linee-guida internazionali. Tuttavia, gli alti volumi di gas emessi da un impianto di potenza richiedono studi approfonditi delle condizioni

pdfMachine

Is a pdf writer that produces quality PDF files with ease!

Produce quality PDF files in seconds and preserve the integrity of your original documents. Compatible across nearly all Windows platforms, if you can print from a windows application you can use pdfMachine.

Get yours now!

fluidodinamiche interne alla cella MCFC ed una probabile riprogettazione della cella. Inoltre, a causa degli alti costi di investimento, un sistema separativo basato su tecnologia MCFC ha senso solo se applicato a grandi impianti emissivi per il processamento di almeno 0.1 Mt CO₂ /anno, il che significa dover considerare MCFC di taglia complessiva fra 10 e 20 MW. C'è infine da rilevare che allo stato attuale della tecnologia i costi di un concentratore MCFC aumentano visto che la vita utile di un impianto MCFC non supera i tre anni anche con la migliore tecnologia oggi disponibile. Applicazioni potenzialmente interessanti per un sistema di concentrazione MCFC sono state individuate nella cattura di CO₂ da gas di altoforno e da cementifici per via del loro alto contenuto di CO₂ e volumi di gas da trattare maggiormente compatibili con le caratteristiche di funzionamento di una cella MCFC.

L'elettrolisi della CO₂ in carbonati fusi, se fosse realizzabile su scala industriale, introdurrebbe un concetto nuovo di utilizzo della tecnologia a carbonati fusi nell'ambito delle applicazioni CCS. Elettrolizzatori MCFC potrebbero essere proposti come innovativo sistema ibrido di cattura combinando metodologie di cattura post-combustione e ossi-combustione, a costi prevedibilmente minori rispetto all'uso originariamente proposto delle celle MCFC come concentratori. Infatti nello studio si analizzano anche le potenzialità di uno schema di cattura ibrido con generazione "oxy-fuel", concettualmente realizzabile operando la cella a carbonati fusi come elettrolizzatore di CO₂. La cella MCFC può infatti operare facilmente anche in modalità elettrolisi separando la CO₂ al catodo e decomponendo il carbonato in CO₂ ed O₂ all'anodo con un minimo dispendio di energia elettrica grazie alle alte temperature di esercizio. La miscela CO₂/O₂ (rapporto 2:1) potrebbe essere direttamente impiegata in processi di ossi-combustione agevolando la separazione e lo stoccaggio finale della CO₂. Tale tecnologia, il cui principio di funzionamento è noto da tempo, non è mai stata sviluppata a livello di impianto per scarso interesse industriale all'epoca in cui fu studiata. Tuttavia, oggi l'elettrolisi della CO₂ potrebbe trovare una collocazione interessante nell'ambito delle attività sulla ossicombustione. Occorrerebbero comunque investimenti per il suo sviluppo tecnologico prima di considerarla una opzione realizzabile.

3.5 Fuel Cell integrate con Sistemi Energetici tradizionali a combustibile fossile

3.5.1 Caratteristiche generali

Come già sottolineato, l'aumento della domanda di energia, la riduzione delle risorse energetiche fossili, l'emergere delle problematiche ambientali connesse al rispetto dei criteri inquinanti hanno determinato la necessità di studiare nuovi sistemi in grado di produrre energia con maggiore efficienza e contemporaneamente ridurre le emissioni inquinanti. Una tecnologia ad alta efficienza e che produce basse emissioni può essere, allora, il sistema ibrido composto da una turbina a gas e da una cella a combustibile ad alta temperatura. Sistemi ibridi di questo tipo potranno consentire di soddisfare il fabbisogno energetico potenziando l'efficienza, l'affidabilità e la sicurezza riducendo l'impatto ambientale. I sistemi ibridi sono costituiti in genere da turbine a gas e celle a combustibile integrate con altre tecnologie. Esistono una miriade di possibili configurazioni. Quasi sempre questi cicli ibridi presentano un miglioramento delle prestazioni ambientali attraverso nuove componenti tecnologiche, un'unica integrazione di sistemi, dispositivi avanzati di conversione dell'energia, approcci innovativi di mitigazione degli inquinanti e maggiore flessibilità nell'utilizzo del carburante.

Questa tipologia di sistemi è stata sviluppata e proposta per il funzionamento a gas naturale, carbone, biomassa e di altri combustibili fossili. L'analisi sia sperimentale che teorica di tali sistemi ibridi composti da celle a combustibile e turbina a gas hanno indicato che con questa tecnologia si possono raggiungere altissime efficienza ed emissioni molto basse. Inoltre le prestazioni ambientali ed energetiche di questi sistemi ibridi potrebbero permettere di apportare contributi importanti nello sviluppo della così detta "economia dell'idrogeno".

Le celle a combustibile SOFC e MCFC, già analizzate nei capitoli precedenti, sono particolarmente adatte per il funzionamento ibrido. La temperatura di esercizio di queste celle, infatti, consente l'integrazione con una turbina a gas. A seconda della progettazione del sistema ibrido, il calore scaricato dalla cella a combustibile può essere convertito dalla turbina a gas in elettricità oppure può essere usato per preriscaldare i reagenti della cella.

3.5.2 Caratteristiche delle Turbine a gas e delle fuel cell integrate in un sistema ibrido

Un tipico sistema ibrido, recupera l'energia termica scaricata dalla cella a combustibile e la trasforma in energia elettrica attraverso un motore termico. Per implementare questa tecnologia sono state considerate diverse tipologie d'impianto, tra cui le turbine a gas, le turbine a vapore e motori alternativi. L'unico dispositivo però che è stato testato è una micro-turbina a gas (MTG). Essa risulta essere particolarmente compatibile con una cella a combustibile ad alta temperatura in

un sistema ibrido. Ciò è dovuto a diverse caratteristiche, quali:

- Le MTG richiedono una temperatura di ingresso relativamente bassa, che può essere fornita da una cella a combustibile ad alta temperatura;
- La MTG funziona con rapporti di pressione relativamente bassi, adatti per essere utilizzati sia direttamente nella cella a combustibile ad alta temperatura o in altri componenti del sistema ibrido;
- Una MTG recupera il calore attraverso scambiatori di calore oppure attraverso il passaggio di grandi volumi di gas tra il compressore e la turbina, ciò la rende particolarmente indicata per un ciclo ibrido;
- Il calore scaricato dalla cella a combustibile è sufficiente per alimentare una MTG;
- La dimensione attuale della maggior parte dei sistemi a celle a combustibile è relativamente modesto (tra 250 kW e 1,5 MW), il che si sposa perfettamente con una MTG;
- La densità di potenza del sistema può essere aumentata, se aumenta la produzione della cella a combustibile;
- Il costo del sistema ibrido è potenzialmente inferiore.

Bisogna comunque sottolineare che le caratteristiche delle turbina a gas nelle applicazioni ibride non sono necessariamente quelle delle turbine a gas che funzionano stand-alone. Di solito, infatti, le TG necessitano di alte temperature dei fumi in ingresso ed un rapporto di compressione più elevato per migliorare le prestazioni della turbina. Nei cicli ibridi con una cella a combustibile ad alta temperatura, non sono necessari invece alti rapporti di pressione particolarmente elevati oppure elevate temperature di ingresso dei fumi. Proprio questo rende particolarmente facile la realizzazione di sistemi ibridi, anche se è necessario ed auspicabile un miglioramento dell'efficienza di tutti i componenti.

Anche se le MTG si prestano molto bene per l'integrazione con celle a combustibile, la ricerca si propone di studiare e poi realizzare sistemi di taglia maggiore. L'aumento della taglia degli impianti ibridi, infatti, presuppone che le celle siano in grado di resistere a pressioni molto elevate. Molti studi evidenziano proprio che l'efficienza di conversione elettrica è del 72-74 % per sistemi di taglia inferiore ai 10 MW, mentre con sistemi più grandi si può raggiungere efficienze superiore al 75%. Quindi non appena le MCFC e le SOFC saranno in grado di resistere a pressioni maggiori si renderà necessario l'utilizzo di TG più sofisticati e più potenti.

La turbina a gas unita ad una fuel cell è un sistema che è stato concepito a metà degli anni 70. Nel 1998 erano stati brevettati più di dieci sistemi ibridi, che si differenziavano principalmente per la tipologia di cella a combustibile utilizzata, per la posizione dei componenti nel sistema integrato o per la pressione di esercizio del sistema. Il concetto di base di un sistema ibrido turbina a gas e

cella a combustibile è illustrato nella Figura14, dove la cella a combustibile sostituisce il tipico ciclo Brayton di un tipico motore a combustione. Il risultato che ne deriva è la produzione diretta dell'energia elettrica da parte della cella a combustibile. Quindi, con questo sistema, il calore scaricato dalla cella a combustibile viene utilizzato per fornire tutta la potenza necessaria alla compressione e per produrre energia elettrica attraverso un turbo-generatore. La produzione di energia elettrica con un dispositivo elettrochimico riduce le emissioni e aumenta l'efficienza. Come risultato si ottiene che circa l'80% dell' energia elettrica è prodotta dalla cella a combustibile, la restante parte di energia è prodotta nel turbo-generatore.

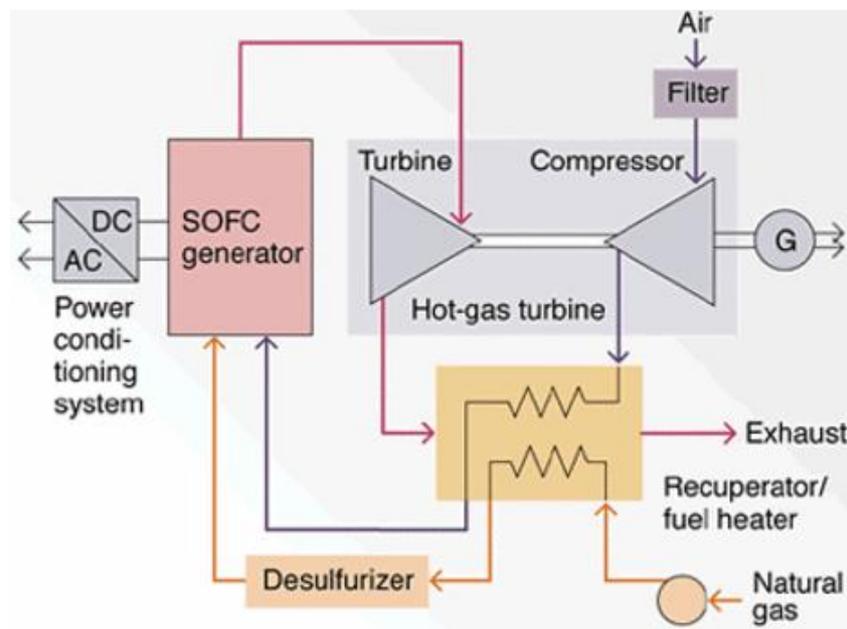


Figura 14:design di base di un sistema ibrido TG-FC

L'obiettivo della progettazione di un sistema ibrido è di integrare due o più dispositivi di conversione dell'energia in un unico sistema che offra vantaggi in termini di flessibilità nell'utilizzo del carburante, efficienza, disponibilità, economicità e sostenibilità che ognuno dei dispositivi da solo non sarebbe in grado di fornire. "Sinergia" è il termine più utilizzato per descrivere i sistemi ibridi in quanto i componenti integrati garantiscono prestazioni superiori alla somma delle prestazioni dei singoli elementi. Nel caso particolare di un sistema ibrido turbina a gas e celle a combustibile i concetti di progettazione principali sono i seguenti:

1. Convertire la maggior parte dell'energia nella cella a combustibile, sfruttando le reazioni di elettro-ossidazione, determinando basse emissioni di inquinanti ed efficienze di conversione relativamente elevate;

2. Utilizzare il calore prodotto nella cella a combustibile e il calore dei fumi scaricati dalla turbina in altre parti del sistema come, ad esempio, per il trattamento del combustibile, il preriscaldamento dei reagenti o per fornire la potenza di compressione. In modo così da migliorare l'efficienza complessiva;
3. Utilizzare l'alta pressione prodotta dalla turbina a gas per migliorare l'output della fuel cell e l'efficienza;
4. Utilizzare i flussi separati del combustibile e dell'ossidante della cella a combustibile per migliorare altre funzionalità come ad esempio il sequestro della CO₂ o la produzione del combustibile del ciclo ibrido.

La sinergia può essere realizzata in molti modi. L'utilizzo di una cella a combustibile che lavora ad alte pressioni tra il compressore e la turbina di un TG porta sia ad un aumento della potenza di cella sia ad una riduzione delle perdite elettrochimiche, il che comporta una maggiore efficienza. Inoltre, il fatto che in una cella a combustibile i flussi del combustibile e dell'ossidante siano separati, offre molteplici opportunità per aumentare le prestazioni del ciclo ibrido e rende più facile la cattura della CO₂

3.5.3 Configurazioni possibili del Sistema Ibrido

La cella a combustibile e la turbina a gas in un sistema ibrido può essere configurato in molti modi diversi. Quattro sono i parametri di base che caratterizzano il sistema ibrido:

1. Cella a combustibile a ciclo "topping";
2. Cella a combustibile a ciclo "bottoming";
3. Ciclo ibrido diretto;
4. Ciclo ibrido indiretto.

Nel primo caso la cella a combustibile sostituisce il combustore e il suo ciclo Brayton, e la turbina è posta a valle della cella. La turbina utilizza il calore scaricato dalla cella a combustibile per produrre energia elettrica e per il lavoro di compressione, il combustibile della cella è quindi il generatore di elettricità primaria. In una cella a combustibile con ciclo "bottoming" invece la turbina a gas risiede a monte della cella a combustibile. La cella a combustibile è posta a valle della turbina e utilizza i fumi di scarico della turbina a gas come flusso di aria di alimentazione. Questo tipo di configurazione è particolarmente idoneo per l'utilizzo delle MCFC, poiché questo tipo di celle a combustibile richiede anidride carbonica come flusso ossidante. Nel ciclo ibrido diretto la cella a combustibile lavora con le pressioni tipiche della turbina e del compressore. Il problema più rilevante di questa soluzione è il controllo del funzionamento della cella a combustibile e del degrado dei componenti. Di contro, però, i cicli diretti hanno una maggiore efficienza rispetto alle

altre configurazioni. Un ciclo ibrido indiretto, infine, utilizza dispositivi come gli scambiatori di calore per fare in modo che la turbina a gas e la cella a combustibile lavorino in modo separato. L'integrazione termica del ciclo, tuttavia, comporta maggiori perdite vista la presenza degli scambiatori di calore supplementari e la cella a combustibile è tipicamente azionata a pressione atmosferica. La perdita di efficienza dovuta alla separazione fisica delle due unità viene compensata dall'utilizzo di sistemi di controllo meno complessi, minori problemi nel funzionamento delle celle a combustibile e un minor degrado dei componenti. Va però considerato che il costo e le dimensioni degli scambiatori di calore può essere considerevole.

Ognuno dei cicli illustrati sopra può prevedere l'utilizzo di scambiatori di calore aggiuntivi, caldaie, impianti per la produzione del combustibile, impianti di depurazione o altri dispositivi. A seconda delle dimensioni del sistema il numero di componenti aumenta e il ciclo può diventare anche molto complesso.

3.5.4 Sviluppo dei Sistemi Ibridi Turbine a Gas (TG) Fuel Cell (FC)

I primi brevetti di sistemi ibridi furono rilasciati negli Stati Uniti negli anni 70. Negli anni sono state individuate diverse soluzioni che si differenziano principalmente per la posizione della cella a combustibile rispetto alla turbina, e per la pressione di esercizio della cella. Dagli anni 90' il progresso tecnologico delle celle a combustibile ad alta temperatura ha permesso di costruire celle di tipo SOFC e MCFC di dimensioni sufficienti a rendere possibile la sperimentazione di tali sistemi. L'iniziale ottimismo per quanto riguarda la facilità di integrazione di celle a combustibile con le micro-turbine è stata temperata da problemi tecnici riscontrati in fase di sperimentazione. L'integrazione di questi sistemi è comunque impegnativo; le turbine a gas esistenti operano con rapporti di pressione, flussi di massa, e altri parametri critici di funzionamento diversi da quelli caratteristici delle celle a combustibile ad alta temperatura disponibili. Tuttavia, i test hanno confermato che i sistemi ibridi determinano elevate efficienze e basse emissioni, fattori che giustificano l'ottimismo sul potenziale di questa tipologia d'impianto nel poter contribuire in modo significativo al fabbisogno energetico futuro. Questi sistemi infatti offrono la possibilità di ottenere rendimenti elettrici netti superiori al 70%, per impianti dai 20 MW ai 40 MW, e di superare in modo significativo gli standard di emissione delle sostanze inquinanti e i criteri di riduzione delle emissioni di CO₂ / kW-h. Gli studi prevedono anche la diminuzione dei costi dell'energia elettrica prodotta e costi di capitale inferiori a quelli degli altri sistemi di generazione dell'energia.

3.5.5 Simulazione dinamica di sistemi ibridi

In tutte le simulazioni termodinamiche i sistemi ibridi composti da turbine a gas e celle a combustibile hanno dimostrato un impatto ambientale ridotto e una maggiore efficienza rispetto ai tradizionali impianti a combustione. Minori emissioni di anidride carbonica si possono ottenere attraverso più elevate efficienze nell'utilizzo del carburante, mentre gli NOx e altre emissioni di sostanze inquinanti sono notevolmente ridotte con la produzione di energia sfruttando il processo elettrochimico tipico delle celle a combustibile, che sostituisce, almeno in parte, il processo di combustione degli impianti convenzionali. La comprensione del comportamento dinamico dei sistemi ibridi è importante per l'avanzamento della tecnologia e per lo sviluppo dei sistemi di controllo per i sistemi futuri.

Siemens Power Corporation ha sviluppato il primo sistema ibrido pressurizzato SOFC/TG utilizzando una cella a combustibile di tipo SOFC. Lo stack ed il reformer sono collocati tra il compressore e la turbina che sviluppa una potenza di 75 kW. Il ciclo integrato comprende anche uno scambiatore di calore. La cella SOFC nominalmente sviluppa 180 kW_e, mentre la turbina a gas produce 40 kW_e di tutta la potenza totale.



Figura 15 : Impianto ibrido FC-TG Siemens

Un diagramma di una cella a combustibile SOFC integrata con una turbina a gas viene presentata in Figura 16. Questo sistema è costituito da una SOFC a geometria tubolare (Figura 17) alimentata da un reformer interno. Questi componenti (stack, reformer) sono collocati tra il compressore e la turbina in modo da operare a pressioni inferiori a quella di esercizio. La turbina a gas ha un doppio albero e il ciclo integrato comprende anche uno scambiatore di calore a recupero.

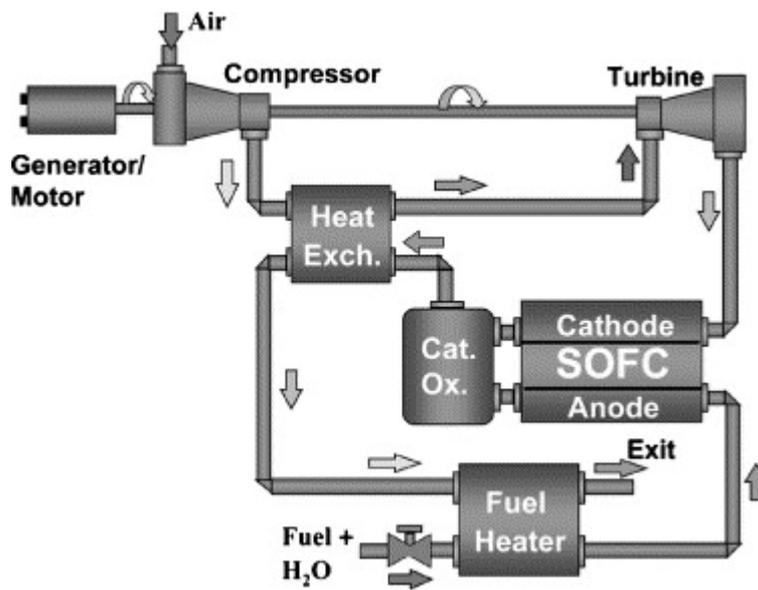


Figura 16: Diagramma del sistema ibrido SOFC / turbina a gas

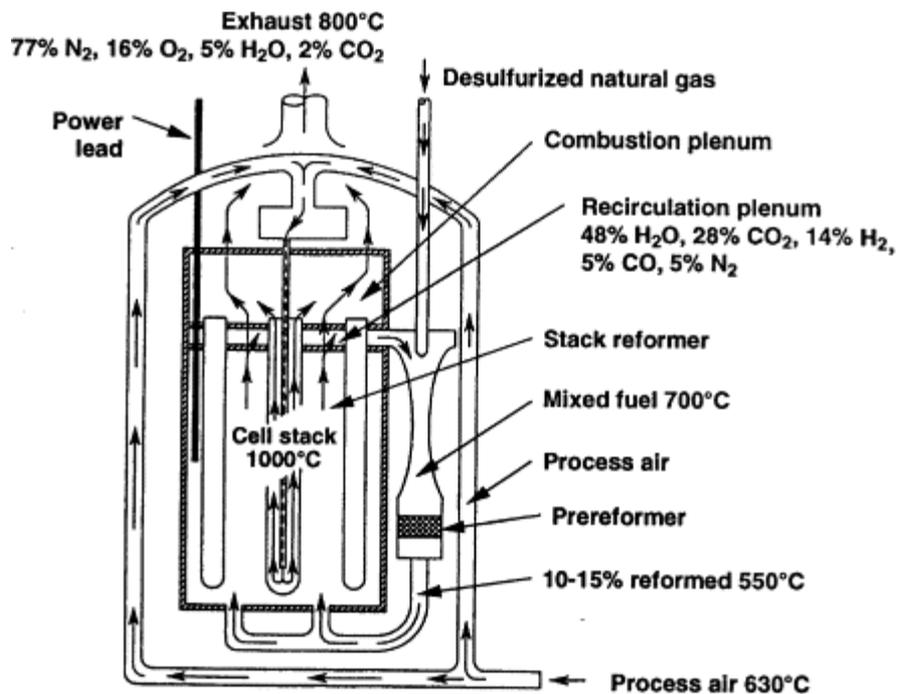


Figura 17: Stack di una fuel cell SOFC a geometria tubolare

Sintesi dello studio del sistema di controllo del sistema integrato

L'impianto Siemens SOFC-TG studiato, è stato analizzato e messo in funzione per circa 2000 ore, ha messo in luce che il sistema genera una potenza pressoché costante anche se esposto a variazioni di temperatura significative (da -5°C a $+35^{\circ}\text{C}$). Il sistema di controllo infatti risponde tempestivamente ai cambiamenti di temperatura, mantenendo la temperatura di funzionamento della cella entro la temperatura di esercizio nominale. I parametri della turbina a gas, invece, necessitano di modifiche continue per mantenere la corretta velocità dell'albero e la quantità adeguata della portata d'aria per la compressione.

Quando la temperatura ambiente raggiunge il picco massimo e contemporaneamente c'è un picco massimo di domanda di produzione di energia, il sistema ibrido necessita di un profilo di carico sinusoidale. Al verificarsi di queste condizioni il sistema sembra seguire il carico molto bene. In questo caso, infatti, la produzione della turbina a gas rimane prossima ai 140 kW per tutto l'intervallo della perturbazione, anche se si riscontra una maggiore richiesta di ossigeno.

L'ideale per un sistema ibrido, composto da una SOFC e da una turbina a gas, sarebbe che l'utilizzo di ossigeno e combustibile rimanesse il più possibile costante, anche in presenza di variazioni di carico. In questo modo è possibile fissare in modo preciso il rapporto aria/combustibile all'interno della cella SOFC. Un quantitativo di ossigeno costante, infatti, è necessario per mantenere costante la temperatura della cella e per razionalizzare il suo funzionamento.

La sfida maggiore comunque risulta essere proprio il controllo del flusso di massa d'aria nel compressore durante le ampie fluttuazioni di temperatura ambiente. Infatti, se non vengono controllati tutti i parametri, la turbina a gas può diventare instabile. I sistemi di controllo che tentano di variare la portata di aria al compressore appena avvertita la variazione di temperatura, determinano cambiamenti nella temperatura della cella e variazione del carico di ossigeno sempre all'interno della SOFC.

Di certo, quindi, i problemi che il testing del sistema ibrido ha messo in luce sono quelli che la ricerca e lo sviluppo su questa tecnologia devono proporsi di migliorare.

3.5.6 Esigenze di ricerca e sviluppo per sistemi ibridi celle a combustibile - turbine a gas

Nel corso degli anni sono stati organizzati molti seminari e conferenze sul tema dei sistemi ibridi composti da turbine a gas e celle a combustibile. L'industria, le agenzie nazionali, i laboratori e le università collaborano per verificare le ultime scoperte e i risultati ottenuti. Lo scopo è quello di creare una sinergia per identificare gli argomenti su cui orientare la ricerca futura per promuovere lo sviluppo dei sistemi ibridi.

Sviluppo delle celle a combustibile

Entrambe le celle a combustibile ad ossidi solidi (SOFC) o a carbonati fusi (MCFC) sono adatte per applicazioni ibride, come già spiegato. L'avanzamento tecnologico di queste due tipologie di celle a combustibile sarà quindi fondamentale per l'affermazione di questo tipo di impianto. Vi sono specifiche esigenze di ricerca e sviluppo per le celle a combustibile che dovrebbero essere affrontate al fine di facilitare la loro integrazione con le turbine a gas. In prima istanza è necessario approfondire lo studio del funzionamento della cella quando questa lavora a pressioni maggiori di 10-15 bar. In particolare la progettazione di questi dispositivi deve prevedere differenziali o variazioni di pressione significativi. Nei casi in cui ci fosse necessità, si deve poi prevedere un'ulteriore integrazione di ossidante al fine di ottenere una maggiore potenza termica per il riscaldamento della turbina. È necessario, inoltre, un aumento della densità di potenza della cella a combustibile, la sostituzione del nichel, una maggiore tolleranza dell'anodo allo zolfo e alle reazioni di ossidoriduzione. La ricerca, perciò, è necessaria per consentire alle celle a combustibile di soddisfare le esigenze che il ciclo ibrido impone. I campi di ricerca più interessanti sono:

- 1) Ricerca su nuovi materiali che dovranno portare ad un aumento della densità di corrente, in modo da ridurre le dimensioni ed il costo delle celle a combustibile. Per fare questo devono essere migliorati i materiali degli elettrodi e degli elettroliti. Contemporaneamente si dovranno migliorare le proprietà meccaniche, per resistere alle sollecitazioni termiche indotte dalle accensioni e dagli arresti, e alle vibrazioni indotte dalla turbina o dal movimento in caso di applicazioni mobili;
- 2) Diminuzione del rapporto aria/ carburante in modo da diminuire le dimensioni della cella a combustibile, delle apparecchiature a monte della fuel cell per l'alimentazione dell'aria e a valle della cella per lo scarico del gas, nonché un aumento dell'efficienza del ciclo ibrido dato che la turbina a gas è in grado di operare a temperature di esercizio maggiori;
- 3) Studio della modalità migliore per rimuovere il calore generato dalla cella. Per esempio si potrebbe adottare come soluzione un reforming interno per assorbire calore generato dalla cella, oppure nuove tecnologie di inverter che contemplino nuovi materiali come composti semiconduttori e/o strutture a strati di materiali diversi o nuove tecniche di commutazione;
- 4) Maggiore tolleranza dei componenti che costituiscono la cella ai composti dello zolfo e del cloro spesso presenti nel combustibile.

Combustori

I combustori sono richiesti per tutti i sistemi in cui sono presenti celle a combustibile. Essi sono utili soprattutto nelle fasi di avvio ed eventualmente arresto del sistema, ad esempio, per mantenere il funzionamento della turbina a gas e fornire aria di raffreddamento alla pila, nonché per permettere al sistema di tollerare meglio variazioni di carico dinamico attraverso una maggiore produzione di calore. I progressi tecnologici che sarebbero più utili per un ciclo ibrido FC-TG dovrebbero includere le seguenti caratteristiche:

- Combustore modulabile (0-100% del carico);
- Capacità di relight;
- Capacità di sopportare il flusso costante di prodotti ad alta temperatura provenienti dalla cella senza che ci sia la necessità di inviare aria di raffreddamento;
- Elevata affidabilità, disponibilità, manutenibilità, durabilità;
- Basso costo.

Inverter ed elettronica di potenza

Gli Inverter e l'elettronica di potenza devono essere progettati e fabbricati specificamente per i sistemi ibridi in cui sono presenti celle a combustibile con la consapevolezza che sarebbero preferibili dispositivi in grado di accettare input in ingresso sia dal motore termico sia dalla cella a combustibile. L'integrazione dell'inverter e dell'elettronica di potenza con sistemi ibridi di questo tipo non è stato forse ancora ben compreso e ben studiato. In particolare per sviluppare al meglio l'integrazione delle turbina a gas con le fuel cell sarebbe utile avere a disposizione inverter a basso costo e con un'architettura semplificata. La scelta dell'inverter e dell'elettronica di potenza dovrebbe scaturire da un'analisi dettagliata che porti ad una scelta che sia un trade off tra costi ragionevoli e complessità dei dispositivi. Nella scelta di questi dispositivi, oltre ai costi e alle varie soluzioni, bisogna anche considerare la possibilità di prevedere l'utilizzo di inverter separati per le celle a combustibile la turbina a gas rispetto alla possibilità di utilizzare un singolo inverter. Bisogna, inoltre, progettare un'integrazione del sistema ibrido con gli inverter quanto più precisa possibile ed assicurarsi anche che l'architettura dei dispositivi tenga conto della qualità dei componenti e che quest'ultimi siano affidabili. La ricerca e lo sviluppo sugli inverter e l'elettronica di potenza deve avere come obiettivo primario quello di portare ad un abbassamento dei costi e ad una maggiore robustezza dei dispositivi, per fare in modo che i sistemi ibridi così strutturati abbiano bisogno di meno manutenzione possibile.

Sensori e controllori

La ricerca su nuovi sensori o l'applicazione di sensori affidabili e robusti e dispositivi per la diagnostica, nonché algoritmi di controllo e strategie basate sulle misurazioni sensibili degli ingressi manipolati sono tutti elementi che contribuirebbero ad aumentare le prestazioni dei sistemi ibridi. La ricerca e lo sviluppo è richiesto in diverse aree. Ad esempio sarebbe importante identificare e sviluppare opportuni sensori in situ per la misurazione di parametri critici come la composizione all'interno del reformer, la temperatura, le pressioni, comprese quelle delle varie miscele ad alta temperatura e la pressione di tutte le masse che circolano all'interno del sistema ibrido. È fondamentale, inoltre, l'identificazione e la comprensione delle risposte del sistema alla manipolazione di alcune variabili, come pure l'identificazione e la comprensione della risposta del parametro controllato alle varie manipolazioni. Devono poi migliorare le tecnologie di misurazione e controllo dei sensori e delle valvole quando queste operano ad alta temperatura o ad alta pressione. Risulta determinante comprendere come reagisce il sistema sia in assetto statico che dinamico alla manipolazione controllata delle variabili, per questo l'obiettivo da raggiungere è lo sviluppo di strategie di controllo efficienti. Per far questo sono necessari dei "componenti intelligenti" che siano in grado di identificare il guasto prima che questo si verifichi.

Turbine a gas e altre tipologie di motori a combustione

È noto che non si può semplicemente sostituire il calore necessario ad un motore endotermico con quello proveniente dalle celle a combustibile ed aspettarsi che il motore endotermico funzioni alla perfezione. Per poter sfruttare appieno i cicli ibridi bisogna sviluppare e progettare motori che siano in grado di gestire il flusso di ingresso e le caratteristiche termiche del calore che una cella a combustibile è in grado di fornire e che siano in grado di operare in queste condizioni. Ciò richiede, inevitabilmente, un cambiamento considerevole nella ricerca e nello sviluppo delle tecnologie dei motori termici. Considerando che per motori endotermici stand-alone, l'aumento di temperatura e pressione sono quasi sempre requisiti essenziali per aumentare l'efficienza, al contrario, quando i motori endotermici vengono utilizzati in cicli ibridi, per massimizzare l'efficienza è più importante che questi operino con basse temperature e basse pressioni.

Lo sviluppo di motori endotermici che abbiano le seguenti caratteristiche servono per aumentare le performance del sistema quando si trova ad operare con input in ingresso che hanno scarse qualità termiche, come accade appunto alla turbina a gas inserita in un ciclo ibrido, che riceve in ingresso fumi a basse temperature provenienti dalla cella a combustibile. Motori così progettati aumentano inoltre la capacità del sistema di resistere alle lunghe durate dei cicli termici, dovuti alla massa

termica proveniente dalla cella a combustibile. Si aumenta anche la capacità del sistema di operare in maniera ottimale con rapporti di compressione più bassi. Essi permettono poi uno spettro di funzionamenti più ampi ed evitano l'arresto del sistema integrato, ad esempio, in presenza di picchi lontani dalle condizioni tipiche di funzionamento del compressore. Una turbina che sia in grado di operare a bassi valori di pressione e temperatura permette un controllo maggiore dei flussi in uscita dalla cella a combustibile. I motori poi devono essere robusti in modo che il loro ciclo di manutenzione corrisponda con quello delle celle a combustibile.

La ricerca è necessaria per consentire ai motori delle turbine a gas di soddisfare le esigenze e le caratteristiche delle varie tipologie di cicli ibridi. Alcune esigenze che le turbine a gas dovrebbero soddisfare per raggiungere gli obiettivi di performance attesi per i sistemi ibridi sono:

1. Configurazione del ciclo di recupero;
2. Configurazioni avanzate del ciclo con annesso intercooler e turbina aria umida;
3. Combustore in grado di accettare aria calda e viziata proveniente dal combustibile esaurito;
4. Riduzione delle emissioni (riduzione NO_x, CO e idrocarburi);
5. Combustore catalitico (in grado di accettare quantità ridotte di aria in eccesso, con un rapporto aria/combustibile il più possibile prossimo al valore stechiometrico);
6. Riduzione dei problemi di raffreddamento della turbina utilizzando materiali avanzati, tra cui la ceramica e nuove tecnologie di raffreddamento;
7. Aumento del rapporto di pressione;
8. Maggiore efficienza aerodinamica del compressore e della turbina;
9. Utilizzo di combustibili tolleranti ai composti contenenti cloro ed alcalino-terrosi.

3.5.7 Ottimizzazione delle Performance di un sistema ibrido

Dunque ci sarebbero diversi aspetti dei sistemi ibridi con celle a combustibile che potrebbero essere semplificati ed ottimizzati per rendere questa tecnologia utilizzabile su larga scala, per abbassare i costi e renderla più affidabile. La sfida include una comprensione completa delle celle a combustibile e del loro comportamento sia in regime stazionario che dinamico, in modo da poter aumentare la densità di potenza della cella e permettere una migliore integrazione. I parametri che vanno migliorati sono il rendimento di cella e il coefficiente di utilizzo del combustibile, la densità di potenza, la temperatura di uscita dalla cella a combustibile ed infine sviluppare fuel cell in grado di operare a temperature sia superiori che inferiori per facilitare l'integrazione con altri sistemi.

Il funzionamento della turbina a gas che opera in un sistema ibrido con celle a combustibile può essere ottimizzato in molti modi diversi per rendere il sottosistema in alcuni casi più sensibile, e in altri più rispondente a caratteristiche quali affidabilità ed efficienza. L'ottimizzazione dei motori

delle turbine a gas che operano all'interno di sistemi ibridi comporta che essi funzionino per almeno 8700 senza interruzione e senza manutenzione. È necessario poi che il funzionamento delle celle a combustibile corrisponda quanto più possibile al loro ciclo di manutenzione. A questo scopo la ricerca di componenti con caratteristiche di resistenza maggiori è fondamentale. Altri accorgimenti potrebbero essere aumentare il margine di pompaggio nel design delle celle a combustibile o adottare combustori e scambiatori di calore più resistenti e che durino di più. Sarebbe auspicabile anche sviluppare strategie di controllo che contemplino "nuovi" input termici, massimizzare la standardizzazione dei componenti delle turbine che fanno parte di sistemi ibridi con quelli che compongono le turbine a gas stand-alone. Con una prospettiva quindi di breve termine i materiali da utilizzare sarebbero quelli più tecnologicamente avanzati presenti sul mercato, mentre con una prospettiva più di lungo termine è necessario focalizzare gli sforzi sulla ricerca e lo sviluppo di materiali nuovi e sempre più avanzati. Questi sistemi necessitano di strategie di ottimizzazione per il controllo dell'efficienza che tenga conto della protezione sia della Turbina a gas sia delle celle a combustibile. Per questo bisogna integrare nei sistemi ibridi specifici sensori per una diagnostica di bordo "intelligente". A livello di design dei componenti sia la geometria del compressore che le pale della turbina devono avere una geometria variabile in modo da poter essere modificate in caso di variazioni del lay out d'impianto.

In definitiva il sistema deve avere un alternatore con elettronica di potenza avanzata, cuscinetti all'avanguardia quasi esenti da manutenzione (magnetici, ad aria, olio lubrificante free), un controllo della depressurizzazione funzionale, scambiatori di calore che lavorino ad elevate temperature, turbine di taglia appropriata in grado di lavorare con temperature in ingresso più basse e rapporti di pressione minori.

3.5.8 Strumenti di analisi per il sistema combinato FC-TG

Molti progressi sono ancora da compiere nel campo degli strumenti di simulazione del comportamento dei sistemi e dei componenti che lavorano in regime stazionario e dinamico, da utilizzare per l'ottimizzazione del ciclo, nella progettazione di sistemi di controllo e delle strategie e per lo sviluppo della prossima generazione di sistemi ibridi. Questi modelli dettagliati devono essere sviluppati in prima istanza al fine di conoscere le celle a combustibile dal punto di vista dei componenti, del funzionamento e del design, poi per la comprensione del sistema ibrido nella sua completezza nonché dei sotto sistemi che lo compongono. Inoltre, gli strumenti di modellazione del sistema devono comprendere modelli semplificati delle celle a combustibile e degli altri componenti del sistema da utilizzare per lo sviluppo di nuovi modelli di sistema ed analizzare e per ottimizzare le configurazioni di sistema così come per la progettazione di strategie di controllo per i

sistemi ibridi. Il piano per lo sviluppo dei sistemi ibridi prevede:

- Modelli matematici per ogni componente in considerazione;
- Validazione dei modelli matematici elaborati con calcolatori rispetto ai dati provenienti dalla letteratura in modo da ottenere previsioni del comportamento accurate;
- Acquisizione dei dati dai sistemi, dai sottosistemi e dai simulatori per la validazione del modello;
- Sviluppo ed utilizzo di interfacce per gli strumenti di modellizzazione facilmente fruibili, in modo da facilitare la diffusione in tutta la comunità scientifica;
- Fornire un orientamento preciso ed assistenza nella progettazione di algoritmi di controllo;
- Sviluppare meccanismi di condivisione dei dati empirici precedentemente detenute come proprietarie;
- Accurata determinazione delle scale temporali di simulazione per i componenti e per i sistemi ibridi completi;
- Sviluppare sistemi di simulazione dinamici e simultanei e stress analyses test sui materiali;
- Utilizzare computer capaci di effettuare simulazioni in parallelo per aumentare la potenza di calcolo;
- Valutare la possibilità di usufruire di pacchetti software esistenti da utilizzare come interfaccia utente;
- Usare modelli per scoprire malfunzionamenti del sistema prima esso sia costruito e messo in funzione.

3.5.9 Integrazione e ottimizzazione dei Cicli Ibridi FC-TG ed esigenze del mercato

L'integrazione e l'ottimizzazione dei cicli ibridi composti da celle a combustibile e Turbine a Gas dipende molto dall' identificazione di un mercato interessato a tale tecnologia e allo sviluppo di progetti che soddisfino le esigenze di tale mercato. Il campo di applicazione più immediato per l'utilizzo di sistemi ibridi è sicuramente il mercato della generazione distribuita. Questa è l'applicazione più logica poiché i principali produttori di celle a combustibile e di turbine a gas stanno già sviluppando sistemi e componenti applicabili a questo settore. Inoltre, i sistemi ibridi, come più volte spiegato, si caratterizzano per la loro elevata efficienza e bassissime emissioni; caratteristiche che li rendono attraenti in una vasta gamma di applicazioni e mercati. Lo stesso tipo di sistema ibrido, tuttavia, non va bene per ogni applicazione. Così, l'attuale piano di sviluppo di sistemi ibridi deve affrontare la questione dell' integrazione e dell'ottimizzazione del sistema per una vasta gamma di applicazioni. Il piano attuale ha come obiettivo di raggiungere degli standard soddisfacenti in modo da rendere applicabili questi sistemi sia nella generazione distribuita, come

già detto, ma anche per le utenze industriali, i grandi sistemi impiantistici centralizzati, le applicazioni portatili (APU) e per le applicazioni mobili.

È necessaria quindi una definizione della configurazione di sistema adeguata per ciascuno dei suddetti mercati, facendo corrispondere le performance delle celle a combustibile e delle turbine alle esigenze specifiche ogni applicazione. Quindi in ogni applicazione la potenza di uscita dalla celle a combustibile deve essere il più possibile vicina a quella richiesta dalla turbina. L'ottimizzazione delle dimensioni e delle prestazioni deve poter includere dispositivi per immagazzinare l'energia e dispositivi per la gestione ed il controllo della turbina. Bisogna poi comprendere in modo esatto e controllare gli effetti dei transitori sul ciclo, perché questi risultano diversi per ogni applicazione. Devono poi essere definiti a priori per ogni applicazione i criteri per i costi di installazione, i costi di gestione, affidabilità e deve essere effettuata la Life-Cycle Analysis (LCA). I componenti e sistemi necessitano di ottimizzazione per migliorare le prestazioni in ogni applicazione, inoltre le loro prestazioni devono essere dimostrate e rese disponibili al mercato di riferimento. La prova dei prototipi deve sollecitare i componenti fino alla loro distruzione al fine di dimostrare la loro applicabilità. È fondamentale una sorta di flessibilità operativa che risponda alle specifiche di progetto desiderate.

La ricerca e lo sviluppo di tutti i componenti di cui è costituito il sistema è necessaria per consentire ai sistemi integrati di soddisfare le aspettative di performance. Alcune esigenze che le tecnologie di integrazione dei sistemi ibridi devono soddisfare per raggiungere gli obiettivi di performance previsti sono i seguenti:

1. Analisi di sistema per identificare i sistemi ibridi più efficienti ed i relativi costi;
2. Analisi delle prestazioni in condizioni di carico parziale e della sensibilità del sistema alle condizioni ambientali;
3. Analisi dinamica e transitoria, nello specifico capacità di seguire il carico e capacità di reazione nel caso di avvii o arresti rapidi;
4. Sistemi di trattamento del carburante:
 - a) Reformers compatti;
 - b) Reformer a membrana per il Gas Naturale, che separano una parte dei prodotti di reazione come l'idrogeno o il biossido di carbonio in base a come è formata la miscela di reazione;
 - c) Reformer catalitico per gas naturale, meno sensibile ai veleni come lo zolfo e il cloro ed alle deposizioni di carbonio, che permette l'utilizzo di quantità di vapore inferiore;

- d) Impianti di ossidazione parziale per combustibili “sporchi” come il carbone, le biomasse o residui di raffineria. Questi impianti sono composti da reattori compatti che funzionano a temperature più basse per aumentare l'efficienza a freddo del gas e ridurre il consumo di ossigeno;
 - e) Diffusore catalitico di ossidazione parziale e/o reforming dei distillati per le applicazioni mobili come navi e locomotori.
 - f) Diffusore catalitico di ossidazione parziale Conveniente e/o reforming del Diesel e della benzina per applicazioni automotive;
5. Costo di produzione dell'ossigeno competitivo attraverso l'utilizzo, per esempio, di membrane per il trasporto degli ioni;
 6. Costo separazione dell'idrogeno dal Syn Gas sostenibile;
 7. Pulizia e desolforazione del combustibile;
 8. Scambiatori di calore ad alta temperatura che trasferiscono calore a pressione atmosferica o ancora inferiore, tipica della cella a combustibile, fino a portarlo alle pressioni di lavoro della turbina a gas che prevede alti rapporti di pressione;
 9. Sistemi che permettono di operare con livelli di liquido instabili causati dal movimento del sistema;
 10. Sistemi di stoccaggio dell'idrogeno efficienti.

Funzionalità specifiche dei componenti del sistema

Dato che i sistemi ibridi sono una tecnologia relativamente nuova ed in continua evoluzione sia nel loro design che nella progettazione dei singoli componenti, una parte del programma ibrido deve concentrarsi sulle funzionalità specifiche dei componenti del sistema.

Analisi di mercato e Design

Sviluppare una comprensione del mercato dei sistemi ibridi con celle a combustibile implica un'analisi dell'importanza di alcuni parametri e dei costi per ciascun segmento di mercato nonché la definizione e individuazione delle tecnologie concorrenti. Diventano fondamentali anche la comprensione degli impatti della politica di regolamentazione, la definizione dei mercati potenziali e della segmentazione del mercato, e l'interazione dei sistemi uno con l'altro attraverso l'ausilio di modelli accurati che gestiscano al meglio le apparecchiature e l'integrazione (ad esempio, con la rete).

Strategie per la condivisione delle informazioni di mercato tra i competitors

Sviluppare sistemi di analisi del regime dinamico e stazionario e raccogliere i dati da inserire in data base accessibili a tutti gli attori, in modo da collezionare informazioni neutrali, obiettive e affidabili. È importante promuovere, inoltre, la collaborazione tra utenti e produttori e la nascita di centri di ricerca multidisciplinare (Business, Economia, Ingegneria).

In conclusione, quindi, si può affermare che l'integrazione delle diverse tecnologie che compongono il sistema ibrido è forse la sfida più significativa dell'intero programma di sviluppo dei sistemi integrati FC-TG. I sistemi ibridi non sono sicuramente costituiti dal semplice collegamento di due o più tecnologie attraverso un'interfaccia configurabile facilmente. Un sistema ibrido è un'entità distinta e che promette prestazioni superiori alla somma delle prestazioni ottenibili dai due impianti separati. In questo contesto, l'integrazione delle celle a combustibile con le turbine a gas ha l'obiettivo di ottenere un sistema di costo competitivo, modularità, flessibilità operativa e semplicità di ogni parte che lo compone.

Conclusioni

Uno sviluppo sostenibile basato sull'idrogeno, vettore energetico "pulito", sicuro ed affidabile sembra la soluzione più convincente. Se si vuole effettivamente realizzare una sostanziale limitazione alla crescita del tenore dei composti carboniosi nell'atmosfera non si può che non tendere ad una molecola completamente priva di atomi di carbonio qual è l'idrogeno. In quest'ottica, come esaminato nella trattazione, soprattutto nell'ultimo decennio, si è assistito ad un importante sviluppo di iniziative scientifiche e tecnologiche mirate ad un'accelerazione nel processo di transizione all'idrogeno che hanno portato al consolidamento della tecnologia delle celle a combustibile, dispositivi elettrochimici in grado di convertire l'energia chimica dell'idrogeno in energia elettrica secondo un processo elettrochimico privo di combustione, pulito, sicuro ed efficiente. I risultati della ricerca ed il livello tecnologico raggiunto dalle fuel cell negli ultimi anni ha accresciuto notevolmente l'interesse di industrie, aziende, enti di ricerca e società di produzione e distribuzione dell'energia ed ha stimolato enti governativi a nuovi e cospicui finanziamenti per la ricerca. Tale grande interesse verso questa tecnologia si giustifica con il fatto che grazie alle loro caratteristiche, le fuel cell rispondono perfettamente agli obiettivi che si stanno perseguendo nel campo della generazione di energia elettrica: alta efficienza di conversione, riduzione delle emissioni inquinanti, flessibilità nell'uso del combustibile, possibilità di cogenerazione. La natura modulare ed il ridotto impatto ambientale, inoltre, le rendono ideali per una molteplicità di impieghi che vanno dalla generazione distribuita di energia elettrica ai sistemi di propulsione veicolari, all'alimentazione di piccole apparecchiature elettroniche in sostituzione delle tradizionali batterie al litio, permettendo un migliore e più razionale utilizzo delle risorse energetiche. A differenza dagli impianti termici convenzionali, la resa energetica del sistema è scarsamente influenzata dalla potenza installata, non vi è presenza di organi in movimento e ciò garantisce bassa rumorosità durante il funzionamento e alcuna necessità di lubrificazione.

Nel corso degli anni Ottanta e Novanta, gli sforzi e le attività di aziende ed enti di ricerca sono stati concentrati principalmente sulle potenzialità offerte dalla tecnologia, nella generazione distribuita di energia elettrica e calore e ciò ha fatto sì che, nell'ultimo ventennio, lo sviluppo della tecnologia sia passata, anche abbastanza rapidamente, dallo stack "da laboratorio", all'installazione dell'impianto dimostrativo. Attualmente, nel mondo, si registra la presenza di circa 800 impianti a celle a combustibile per un totale di 119 MW installati o in ultimazione di installazione. Si tratta di impianti che vanno da taglie da qualche kW (PEMFC, SOFC) fino a qualche MW (PAFC, MCFC, sistemi ibridi SOFC). Molti di questi impianti hanno già ultimato la loro fase dimostrativa dalla quale sono scaturiti risultati prestazionali in taluni casi anche superiori a quelli attesi. Le celle a combustibile alcaline trovano applicazione oltre che marginalmente nello stazionario di piccola

taglia e nel settore dei trasporti (automobili, trattori, barche), soprattutto in applicazioni spaziali e militari. Esse, tuttavia, rappresentano una tecnologia ormai in disuso e sostituita dalle “concorrenziali” PEMFC e DMFC, per costi troppo elevati e per la necessità di essere alimentate necessariamente con idrogeno puro. Attualmente resistono bene solo nelle applicazioni militari e di difesa, settori tutto sommato meno sensibili di altri agli alti costi di investimento.

È però nel campo della generazione distribuita dove si sono ottenuti i risultati più incoraggianti. Attualmente, nel mondo, sono installati circa 800 impianti, che producono energia elettrica utilizzando le celle a combustibile, per un totale di circa 119 MW. Il 44% di questi è rappresentato da sistemi PEMFC di piccola taglia (15 kW) utilizzate come unità cogenerative per utenze specifiche quali unità abitative, uffici, scuole, ospedali e da qualche anno, disponibili commercialmente; il 35% da impianti PAFC di media taglia (200 kW-1,5 MW); l'11% da impianti SOFC di piccola-media taglia (1-400 kW) installati prevalentemente negli ultimi anni; il 10%, infine, da impianti MCFC (250 kW-2 MW). Molti di questi impianti hanno già ultimato la loro fase dimostrativa, dalla quale sono scaturiti risultati prestazionali, in taluni casi anche superiori a quelli attesi. La pratica della cogenerazione ha consentito il raggiungimento di un'efficienza globale anche dell'80%, mentre le efficienze elettriche registrate si attestano mediamente intorno al 40- 42% per le filiere operanti a bassa temperatura, 45-55% per quelle operanti ad alta temperatura, fino a sfiorare il 60% per gli impianti MCFC e SOFC integrati a turbine a gas in assetto ibrido.

Rimane tuttavia ancora esorbitante il costo del kilowatt installato che va, per un sistema prototipo, dai 4.500 euro/kW delle PAFC ai 20.000 euro/kW delle SOFC, rendendo la tecnologia ancora scarsamente concorrenziale con gli impianti termici tradizionali (800 euro/kW). Tuttavia nel breve periodo si dovrebbe assistere all'avvio della produzione di serie, che dovrebbe portare a costi di 1.000- 1.500 euro/kW, già sufficienti per una penetrazione della tecnologia nel mercato della generazione distribuita. Se le PEMFC sembrano le più vicine ad una produzione di serie che le porterà in breve alla soglia di costo concorrenziale, le PAFC, dopo essere state oggetto di grandi studi nel corso degli anni Novanta, sembrano giunte ad un vicolo cieco: la ricerca è ferma, le aziende hanno dirottato la loro attenzione sulle altre filiere, pertanto il costo della tecnologia rimane bloccato a valori non concorrenziali; è facile, dunque prevedere che alle installazioni PAFC finora realizzate non ne seguano altre in futuro. Le prime applicazioni commerciali delle fuel cell hanno riguardato, inoltre, la filiera delle celle alcaline che hanno trovato e continuano a trovare notevole spazio nelle applicazioni spaziali e di difesa. Esse, tuttavia, rappresentano una tecnologia ormai in disuso per altre applicazioni (stazionario e trasporti) e sostituite dalle “concorrenziali”, per costi troppo elevati e per la necessità di essere alimentate necessariamente con idrogeno e ossigeno puri.

RIFERIMENTI

- **M. Bianchi, F. Melino, A. Peretto- Sistemi energetici (Vol 2)**
- **EG&G Technical Services, Inc- Fuel Cell Handbook (Seventh Edition)**
- **S. Campanari, A Casalegno- Celle a Combustibile: Stato dell'arte (Rivista trimestrale sui problemi dell'energia)**