

Conversione di energia

Materiali per tecnologie avanzate

di Gaetano Cacciola, Salvatore Freni, Angelo Freni

Le tecnologie che utilizzano energie rinnovabili e l'innovativa tecnologia delle celle a combustibile hanno ricevuto un notevole impulso dai progressi ottenuti dalla ricerca nel campo dei materiali speciali. In quest'articolo è presentato lo stato dell'arte di queste tecnologie e la tendenza in fatto di sviluppo di materiali speciali. Quest'analisi è motivata dal fatto che le prospettive di diffusione di queste tecnologie sono fortemente legate allo sviluppo di materiali innovativi.

L'energetica è una materia multidisciplinare che abbraccia molteplici tematiche e spesso è molto complesso fissarne chiaramente i contorni, pertanto parlare di materiali per l'energetica diventerebbe oltremodo difficile e poco interessante se prima non si tentasse di darne una definizione.

Nella nostra chiave di lettura, l'energetica si occupa di tutti quei processi e di quelle tecnologie legate alla conversione dell'energia, dalle sorgenti energetiche primarie sino all'utilizzo finale, attraverso le diverse trasformazioni, necessarie alla produzione, al trasporto e all'accumulo (Figura 1).

Questo lavoro si sofferma sulle tecnologie di conversione delle energie primarie e dei combustibili, trascurando quelle relative ai sistemi di accumulo ed al trasporto dell'energia. La trattazione non ha, tuttavia, l'ambizione di essere esaustiva della tematica, così ampia e complessa, ma vuol evidenziare per alcune tecnologie, il ruolo svolto dalla ricerca nello sviluppo di materiali innovativi il cui utilizzo contribuisce all'aumento dell'efficienza, alla riduzione dei livelli di inquinamento, alla riduzione dei costi ed al miglioramento dei requisiti di sicurezza.

Tecnologie tradizionali

La tendenza del mercato della produzione di energia, per i prossimi anni, continua a vedere un ruolo di fondamentale importanza per gli impianti tradizionali (impianti a vapore, turbine a gas e bruciatori catalitici), anche se lo sviluppo di queste tecnologie sarà fortemente influenzato dalla crescente necessità di aumentare i rendimenti, diminuire l'impatto ambientale e migliorarne l'affidabilità. Tra queste tecnologie, gli impianti a vapore dovrebbero continuare ad essere i più diffusi, con un'aliquota produttiva stimata di circa un terzo di tutta l'energia elettrica richiesta per il nostro Paese (Figura 2).

La ricerca in questo settore è indirizzata, quindi, a sviluppare soluzioni tecniche che permettano di aumentare il rendimento elevando la temperatura di esercizio fino a 680 °C (contro i 600 °C attuali) e migliorando la durata degli impianti, con un

G. Cacciola, S. Freni, A. Freni, Istituto Cnr-Tae - Salita S.ta Lucia, 5 - 98126 Messina - afreni@itae.me.cnr.it.



Figura 1 - Correlazione tra le varie fasi dalla produzione all'uso dell'energia

target di 100.000 ore ad una pressione di 170 MPa.

Il raggiungimento di questi obiettivi si potrà realizzare con il miglioramento delle conoscenze sui meccanismi di decadimento dei materiali e lo sviluppo di nuovi acciai legati, saldabili e resistenti ai fenomeni di corrosione/ossidazione ed all'elevata temperatura [1].

Gli impianti a turbine a gas hanno subito sostanziali miglioramenti ed attualmente la sfida tecnologica punta al miglioramento del rendimento del compressore e della turbina. Nel primo caso, è necessario risolvere i problemi legati ai fenomeni di corrosione delle parti statoriche e rotoriche; nel secondo, si punta ad un innalzamento della temperatura dei gas in ingresso (fino a 1.350 °C). Lo sviluppo di processi economici di rivestimento, al Ni/Cd o ceramici, delle palette del compressore sembra promettere risultati interessanti al fine di ottimizzare questa parte di impianto. Più complessa appare la risoluzione dei problemi che nascono dal voler aumentare la temperatura di ingresso dei gas. Infatti, l'elevata temperatura richiede che le pale siano rivestite da una barriera termica che ne riduca lo stress termico, ma che nel contempo non sia permeabile ai

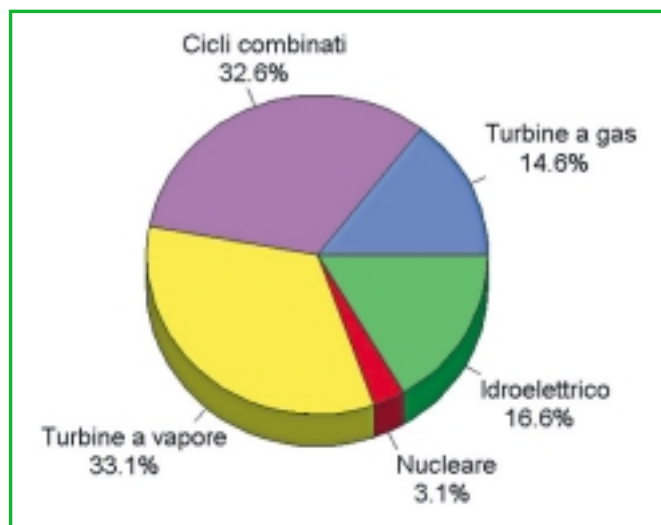


Figura 2 - Tendenza futura del mercato della produzione di elettricità

gas di processo che, altrimenti, innescerebbero pericolosi fenomeni di corrosione sia sulla struttura della barriera che su quella della pala. Appare evidente, pertanto, che le ricerche sono articolate su diversi fronti, che comprendono lo sviluppo di nuovi processi (high velocity oxygen fuel) di rivestimento delle pale con materiali anticorrosivi quali Ni-Co-Cr-Al-Y ed il miglioramento della resistenza a corrosione delle barriere termiche [2].

Un altro settore che ha avuto un notevole impulso nell'ultimo decennio riguarda lo sviluppo di bruciatori catalitici. Questa tecnica è stata proposta come sistema per l'ossidazione di un combustibile con alto rendimento e bassa produzione di sottoprodotti inquinanti (NO_x) ed è risultata essere un'interessante alternativa alla tradizionale combustione in fase fiamma. In questo caso, l'ossidazione del combustibile è realizzata su uno strato catalitico che ne consente il pieno controllo ed il raggiungimento dell'equilibrio anche a temperatura relativamente bassa. La limitazione della temperatura evita la produzione degli NO_x , che svolgono un ruolo fondamentale nel fenomeno delle piogge acide, mentre l'elevato rendimento di tutto il processo riduce il consumo di combustibile primario e quindi limita l'emissione di anidride carbonica [3]. Tuttavia, esistono problemi tecnici insiti nell'uso di catalizzatori supportati che devono operare per lunghi periodi. Tali problemi sono correlati agli effetti della temperatura sulla struttura di supporto e sullo strato catalitico. Gli studi nel settore sono indirizzati verso lo sviluppo di materiali di supporto caratterizzati da un'elevata resistenza agli shock termici, da una buona stabilità strutturale e capaci di assicurare tenacità nell'adesione del catalizzatore sul supporto. I materiali che in parte sembrano avere le caratteristiche necessarie e su cui sono orientate molte ricerche sono supporti ceramici a base di cordierite, mullite, allumina e zirconia, o metallici a base di leghe ad alto tenore di Al. Lo sviluppo dei catalizzatori riveste un'importanza strategica e complessità di tutto interesse. Infatti, i catalizzatori utilizzabili per questo processo, oltre ad avere un'alta stabilità termica, devono possedere bassa temperatura di innesco ($350\text{ }^\circ\text{C}$) ed elevata attività catalitica e selettività. Tra i materiali più studiati, particolare rilievo è dato ai catalizzatori a base di Pd o esaalluminati.

Un settore specifico delle tecniche di catalisi applicate alla produzione di energia è quello che comprende lo studio di mem-

brane catalitiche. Questi materiali sono composti da una struttura, densa o porosa, permeabile all'idrogeno e caricata con uno specifico catalizzatore attivo verso la reazione di ossidazione o reforming di un combustibile (generalmente metano) [4]. Le principali caratteristiche delle membrane catalitiche sono la capacità di ossidare o riformare il metano a temperatura più bassa rispetto ad altri processi tradizionali e di rimuovere selettivamente i prodotti di reazione. I maggiori problemi che limitano lo sviluppo di questa tecnologia, sono connessi al costo del palladio, che è il materiale di base per preparare le membrane, ed alla produzione economica e riproducibile di strutture ceramiche con porosità, spessore e raggio dei pori costanti.

A completamento del quadro relativo alle tecniche di tipo tradizionali, utilizzate nei processi di conversione di energia con produzione di elettricità, è necessario accennare ai cicli combinati che rappresentano un'integrazione spinta di tecnologie diverse. Così, si può avere un'integrazione tra le turbine a gas, che rappresentano di norma la tecnologia trasversale, con le turbine a vapore, che diventano la tecnologia complementare [5]. Questi impianti permettono un miglior sfruttamento del combustibile, con rendimenti elettrici superiori al 50% e risultano essere una tecnologia d'importanza strategica nella produzione di energia elettrica tanto da coprire circa un terzo della richiesta prevista nei prossimi anni. I miglioramenti che si cerca di apportare a questi sistemi riguardano essenzialmente i materiali relativi alle tecniche di base di cui si è già parlato ed alle tecnologie relative ai recuperi energetici.

Tecnologie innovative: le celle a combustibile

Le previsioni nel campo della produzione di elettricità indicano che le tecnologie tradizionali saranno indiscusse protagoniste anche per il prossimo futuro. Tuttavia, non mancano forti interessi nello sviluppo di tecnologie d'avanguardia che si prestano ad applicazioni in settori strategici, quali quello dei trasporti [6] e della produzione elettrica in impianti di piccola potenza per specifiche utenze (generatori autonomi o per utenti isolati) o per sistemi di cogenerazione di elettricità e calore.

Le celle a combustibile (FC) sono dei sistemi elettrochimici capaci di convertire l'energia chimica di un combustibile in energia elettrica, senza l'intervento intermedio di un ciclo termico [7]. Ciò comporta che l'efficienza non è così strettamente dipendente dalla temperatura e si possono avere rendimenti di

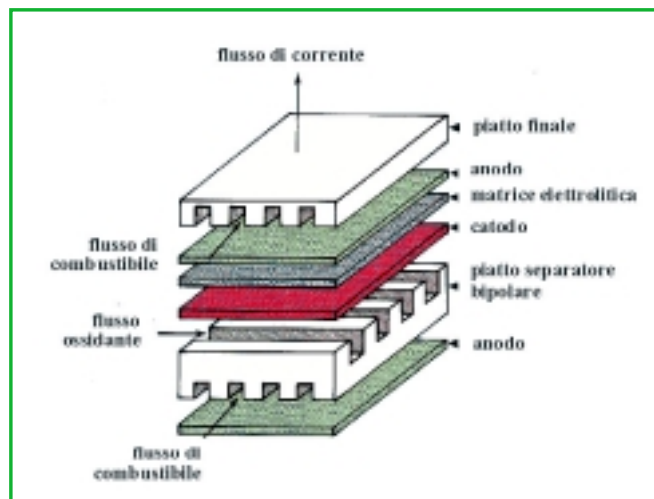


Figura 3 - Schema di una cella a combustibile

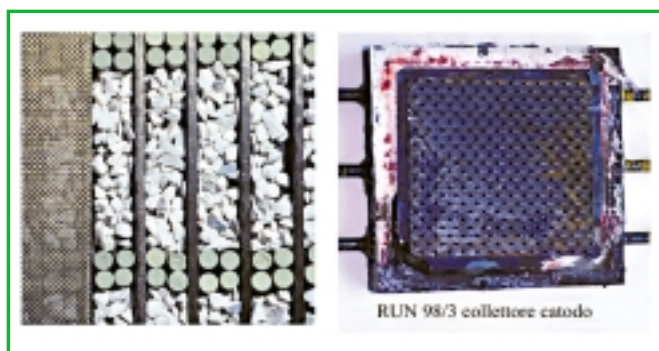


Figura 4 - Monocella a carbonati fusi: a) prima dell'uso; b) dopo mille ore di prova

trasformazione più elevati rispetto a quelli ottenibili tramite le macchine termiche convenzionali.

In Figura 3 è riportato lo schema di una cella a combustibile, da cui si può vedere che i componenti essenziali della cella sono gli elettrodi (anodo e catodo), sui quali sono depositati il catalizzatore e un elettrolita.

Il processo elettrochimico, necessario alla produzione d'energia elettrica, si basa sull'ossidazione del combustibile (in genere idrogeno) contenuto nel flusso di gas che alimenta l'anodo e la riduzione dell'ossigeno contenuto nel gas comburente (aria) che alimenta il catodo. L'elettrolita permette il passaggio degli ioni tra i due elettrodi, internamente alla cella, mentre gli elettroni prodotti all'anodo raggiungono il catodo attraverso un circuito esterno.

Grazie alle caratteristiche di modularità, si possono ottenere sistemi ad elevati rendimenti anche a bassi carichi. La tecnologia delle celle a combustibile si è differenziata negli anni, in funzione dell'elettrolita utilizzato e del conseguente livello di temperatura di funzionamento, portando ad una differenziazione tra "celle ad alta temperatura" (MCFC, SOFC) e "celle a bassa temperatura" (PAFC, PEFC, DMFC).

Celle a combustibile a carbonati fusi (MCFC)

In queste celle l'elettrolita è costituito da una miscela di carbonati di litio e potassio (o sodio), impregnata in una matrice ceramica porosa, isolante e chimicamente inerte, di alluminato di litio. La temperatura di lavoro della cella è di 650 °C e come combustibili possono essere utilizzati sia l'H₂ che il CO. Queste celle si prestano ad essere alimentate direttamente con gas naturale o distillati leggeri. L'anodo è costituito da una struttura porosa di nichel contenente dal 2 al 10% di cromo, che incide per il 40% sul costo totale dello stack, mentre il catodo è costituito da una struttura porosa di ossido di nichel con 1-2% di litio.

L'elevata temperatura di lavoro offre, in genere, numerosi vantaggi: consente di utilizzare metalli comuni, quali il nichel, come catalizzatori, di realizzare il reforming del combustibile all'interno della stessa cella, di utilizzare il CO come combustibile ed infine di sfruttare il calore prodotto in altri cicli in cascata alla cella. L'alta temperatura tuttavia, pone problemi di stabilità strutturale [8].

Il rendimento teorico delle MCFC è circa il 60% ma, con le attuali realizzazioni, non è stato superato il 45%. Questa tecnologia, seppur oggetto di intensa attività di ricerca da molti anni, presenta ancora problemi di durata, principalmente legati alla elevata corrosività dell'elettrolita, alle alte temperature, il cui effetto è visibile in Figura 4 che mostra una monocella a carbonati fusi prima dell'uso e dopo 1.000 ore di funzionamento.

Anche la dissoluzione dell'ossido di nichel catodico, dovuta alla solubilità di questo materiale nella miscela di carbonati fusi, è una severa limitazione e causa di cortocircuiti interni alla cella.

Celle a combustibile ad ossidi solidi (SOFC)

I componenti delle celle ad ossidi solidi sono costituiti da materiali ceramici in strati sottili, che consentono di operare ad altissima temperatura (1.000 °C). L'elettrolita è un ossido di zirconio stabilizzato con ossido di ittrio, l'anodo è un cermet nichel/zirconio ossido ed il catodo un manganito di lantanio drogato con stronzio. La presenza di un elettrolita solido elimina i tipici problemi degli elettroliti liquidi, legati all'evaporazione, alla corrosione e all'allagamento degli elettrodi ed impedisce la miscelazione diretta dei gas reagenti. Grazie all'alta temperatura, la cinetica della reazione è elevata ed il CO può essere usato come combustibile; inoltre l'idrogeno può essere ricavato direttamente dal combustibile all'interno della stessa cella (reforming interno) e il calore generato può essere utilizzato da turbine a gas poste in cascata per formare il così detto "ciclo combinato avanzato" mediante il quale si può ottenere un'efficienza elettrica globale superiore al 60%.

L'alta temperatura di lavoro comporta tuttavia degli svantaggi: problemi sui materiali legati alle dilatazioni termiche e ai loro costi, possibilità che l'accumulo d'idrogeno possa provocare miscele esplosive, essendo la temperatura d'accensione dell'idrogeno inferiore a quella di lavoro della cella, tempi d'avviamento piuttosto lunghi.

Queste problematiche, attualmente sono affrontate con due diversi approcci:

- 1) miglioramento della resistenza della cella all'alta temperatura, attraverso l'impiego di nuovi elettroliti stabilizzati con alumina o zirconia in fase tetragonale;
- 2) sviluppo di celle operanti a temperatura più bassa, tra 600 e 800 °C ed utilizzando nuovi materiali elettrodici ed elettrolitici (cerio, gadolinio ecc.) [9].

Nel primo caso si cerca di ridurre il costo della cella attraverso l'impiego di elettrodi costituiti da lantanidi con un minore grado di purezza. Nel secondo caso l'abbassamento della temperatura di funzionamento consente l'impiego di un'ampia varietà di materiali con una conseguente riduzione dei costi [10].

Celle a combustibile ad acido fosforico (PAFC)

In queste celle l'elettrolita è costituito da acido fosforico, contenuto in una matrice porosa di carburo di silicio; gli elettrodi so-

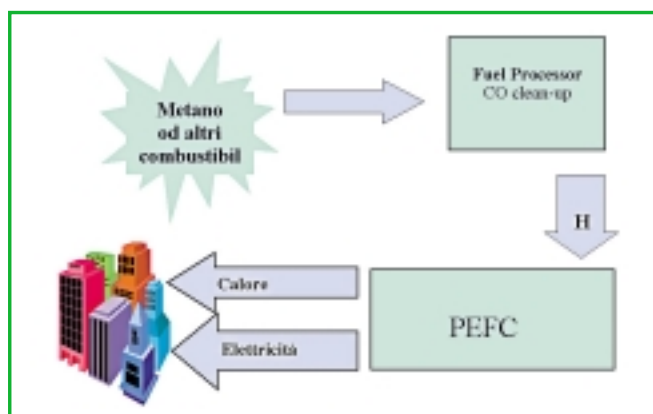


Figura 5 - Applicazione di una cella a bassa temperatura per la produzione di elettricità

no realizzati con platino finemente disperso su supporti a base di carbone [11]. La temperatura di lavoro di circa 200 °C e l'uso di un elettrolita liquido hanno indirizzato questa tecnologia ad impieghi, principalmente stazionari, per la produzione di energia elettrica e calore. I sistemi PAFC sono generalmente alimentati a metano, attraverso un sistema di reforming esterno; tuttavia, data la temperatura di lavoro non richiedono gas di alimentazione estremamente puri (contenuto massimo ammissibile di CO: 1%). Il rendimento totale per la sola produzione di energia elettrica è intorno al 40%, mentre raggiunge l'85% utilizzando l'energia termica cogenerata.

Celle a combustibile polimeriche (PEFC)

Lo schema operativo di questi sistemi è mostrato in Figura 5; il "processore" è esterno alla cella e ha una funzione essenziale nel produrre idrogeno nella quantità e purezza richieste dalla cella a combustibile.

In questo tipo di celle, l'elettrolita è costituito da una membrana polimerica conduttrice protonica. La temperatura di lavoro è attualmente limitata a circa 80 °C dall'uso di membrane perfluoro-sulfoniche, pertanto la cinetica di reazione richiede la presenza di catalizzatori, costituiti da metalli nobili come il platino. Tuttavia, sono in corso attività di sviluppo di nuove membrane, in grado di lavorare a temperature più elevate per favorire così sia la cinetica di reazione che il possibile sfruttamento dell'energia termica prodotta dalla cella.

Gli elettrodi, a struttura porosa, sono ottenuti depositando il catalizzatore (Pt), finemente disperso, su un substrato di fibra di carbonio grafitizzata.

L'aspetto critico di queste celle è rappresentato dalla scarsa resistenza del platino all'avvelenamento da CO, contenuto nei gas di alimentazione [12]. Attualmente, sono in corso ricerche su catalizzatori costituiti da leghe binarie o ternarie a base di platino e rutenio, tungsteno e altro.

Le PEFC grazie alla loro versatilità possono essere impiegate come batterie in sistemi elettronici portatili od in sistemi per la produzione dell'energia elettrica e cogenerazione. Inoltre, la rapida partenza a freddo, l'elevata potenza specifica ed il basso costo previsto, rendono tale tecnologia ottimale per impieghi nel settore dell'autotrazione.

Celle a combustibile a metanolo diretto (DMFC)

Le celle a combustibile a metanolo diretto costituiscono l'ultima generazione delle FC e possono considerarsi derivate dalle PEFC, in quanto entrambe usano una membrana polimerica come elettrolita. Tuttavia le DMFC si distinguono per il combustibile utilizzato. Infatti, possono essere alimentate direttamente con metanolo essendo in grado di ossidarne elettrochimicamente, grazie all'utilizzo di una nuova classe di catalizzatori composti da leghe di Pt-Ru.

La possibilità di utilizzare il metanolo liquido direttamente in cella rende le DMFC particolarmente adatte all'impiego nel settore automobilistico, grazie alla notevole semplificazione del sistema e alla riduzione del suo ingombro, anche a scapito di un minore rendimento totale.

Al grande interesse verso questo tipo di tecnologia si affianca la necessità della risoluzione di problematiche tecniche ancora aperte e che limitano la loro immediata applicazione. Le DMFC, infatti, hanno un decadimento nel tempo ancora molto rapido, una bassa efficienza, presentano problemi di cross-over del combustibile ed inoltre la quantità di catalizzatore necessario è elevata, se paragonata a quella delle PEFC [13].

Tecnologie utilizzanti energie rinnovabili

Nel passato, il settore delle tecnologie per la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili si è basato sostanzialmente su impianti per lo sfruttamento delle risorse idriche e geotermiche. Negli ultimi decenni si è assistito ad una progressiva diversificazione finalizzata allo sfruttamento di altre risorse rinnovabili la cui importanza e competitività sono andate sempre più crescendo. Allo stato attuale dell'arte, tra questo gruppo di tecnologie possiamo quindi annoverare, oltre ai due casi classici già citati: a) gassificatori per biomasse; b) inceneritori per rifiuti solidi urbani; c) impianti fotovoltaici; e) impianti eolici; f) generatori da correnti marine.

Impianti idroelettrici

Gli impianti idroelettrici per la produzione di energia elettrica poggiano su conoscenze tecniche molto ben radicate e sviluppate da decenni di applicazioni su area planetaria. Sono state costruite centrali idroelettriche di notevoli dimensioni ed anche in Italia, questi impianti sono stati ormai installati su tutti i più importanti siti. Apparentemente sembrerebbe, quindi, esulare dal discorso specifico di nuovi materiali da applicare a questa tecnologia, ma queste frontiere stanno, invece, riaprendosi su una nicchia di mercato dedicata ad impianti di piccola potenza (da 100 a 1.000 kW) per la quale è necessario sviluppare piccole turbine a costi economici. Le tradizionali tecnologie di costruzione delle turbine per grandi potenze risultano, infatti, costose e quindi disincentivanti, mentre la produzione di piccole turbine, progettate appositamente per piccole potenze e costruite con materiali e metodi economici può riportare il costo dell'impianto ad un livello assai interessante dal punto di vista commerciale [14].

Impianti geotermici

Lo sfruttamento dell'energia geotermica è possibile nelle sole zone dove essa è disponibile. La fattibilità di questi impianti è limitata all'utilizzo di sorgenti a bassa e media temperatura (60-150 °C) [15]. In Italia, lo sfruttamento di queste risorse è già in atto da diversi decenni con una tecnologia abbastanza ben sviluppata. I punti critici che questi impianti presentano sono dati dalle pompe sommerse necessarie a movimentare i fluidi a temperatura o dagli scambiatori di calore geotermici (down hole exchanger, DHE) che si allocano in fondo ai pozzi per estrarre direttamente il calore disponibile. L'opzione di operare con pompe di sollevamento o scambiatori di calore dipende esclusivamente dalla scelta progettuale, ma in entrambi i casi esiste l'inconveniente di operare con fluidi corrosivi e spesso fortemente incrostanti. Attualmente le scelte tecniche sui materiali sono indirizzate all'uso dell'acciaio per la costruzione di componenti a contatto con i fluidi geotermici.

Gassificatori per biomasse

In termini generali, la decomposizione di una tonnellata di sostanze vegetali può produrre 50-110 m³ di anidride carbonica e 90-140 m³ di metano e l'uso generalizzato delle biomasse di scarto per produrre biocombustibile potrebbe ridurre l'effetto di riscaldamento globale fino al 20% [16]. Con questa tecnologia, l'anidride carbonica prodotta equivale a quella assorbita dai vegetali con il processo clorofilliano e sarà riciclata a condizione che altre masse vegetali siano fatte ricrescere. Lo sviluppo di questa tecnica necessita il miglioramento di alcuni aspetti che rimangono limitanti. In primo luogo è necessario accresce-

re la frazione gassificabile di materiale (attualmente sull'ordine del 40-50%), ridurre la produzione di nitrati, conseguente all'uso di biomasse trattate con fertilizzanti, cercare di aumentare la resa in CO e idrogeno ed evitare il rischio di produrre carbone dalla decomposizione degli idrocarburi leggeri prodotti nel corso della fermentazione [17]. Attualmente, le ricerche puntano allo sviluppo di un processo termochimico che tramite l'uso di un opportuno catalizzatore, riesca a gassificare fino al 70% della massa trattata, producendo un gas composto da H₂, CO, CO₂ e CH₄. Particolare attenzione è rivolta allo studio di catalizzatori a base di carbonato di potassio, di ossidi di calcio o magnesio o a struttura perovskitica, che presentano alta selettività al CO ed idrogeno, resistenza alla formazione di carbone e stabilità termica.

Inceneritori per rifiuti solidi urbani

Il problema dello smaltimento dei rifiuti solidi urbani ha ormai raggiunto una dimensione allarmante in tutto il territorio nazionale. Negli anni, si è cercato di sostituire al confinamento dei rifiuti in appositi siti, la tecnica della termodistruzione. Ma anche questo metodo ha sollevato notevoli problemi di accettazione a causa della tossicità delle scorie e fumi prodotti ed è stato in parte abbandonato a favore delle tecniche di riciclo. Purtroppo, si è anche visto quanto difficile sia il riciclo delle materie prime per motivi legati all'elevato costo della raccolta differenziata ed alle difficili condizioni sanitarie in cui operano gli addetti ai lavori [18, 19]. Così, anche in considerazione delle esperienze sviluppate in altri Paesi, attualmente si tende a rivalutare la termodistruzione come metodica integrativa di recupero energetico che insieme alla riduzione all'origine, al riutilizzo, alla raccolta differenziata ed al riciclo rappresenta una soluzione totale al problema dello smaltimento dei rifiuti solidi urbani [20]. Nella tecnica della termodistruzione, il forno ed il ciclo termico di recupero, rappresentano il punto critico di tutto l'impianto. Negli impianti di tipo tradizionale si utilizzavano forni a griglia mobile che trattando i rifiuti tal quali non riuscivano a dare rendimenti elettrici superiori al 20%. Attualmente, si stanno sviluppando forni a letto fluido che offrono rendimenti superiori al 25%, grazie alla più efficiente combustione delle particelle, trattate in regime di turbolenza. Resta difficile la scelta di materiali costruttivi, sia per le pareti del forno che per gli scambiatori del ciclo di recupero, che devono resistere ai processi corrosivi innescati dalla aggressività di alcuni prodotti, quali HCl, HF, SO₂. Leghe a base di Ni mostrano una resistenza alla corrosione maggiore rispetto agli acciai austenitici, ma danno notevoli difficoltà di saldatura. Attualmente le ricerche sono orientate verso lo sviluppo di materiali basati su acciai austenitici cui sono aggiunti degli alliganti come Nb o Mo o l'applicazione di rivestimenti su materiali economici [1].

Impianti fotovoltaici

Le celle fotovoltaiche permettono di trasformare l'energia solare direttamente in elettricità con rendimento massimi dell'ordine del 15-20%. La potenza installata in tutto il mondo si aggira sui 600 MW [21], con il Giappone che rappresenta il primo mercato mondiale (20,9 MW installati su tetti) e la Germania che ha varato un programma nazionale che punta a coprire 1.000 tetti con questi sistemi. Il materiale di base per produrre celle fotovoltaiche è una lastra sottile di silicio monocristallino opportunamente drogato. Questo materiale per la sua purezza offre rendimenti fino al 20% ma presenta elevati costi di produzione. Viene anche utilizzato il silicio amorfo che è inferiore per purezza e

Tabella 1 - Caratteristiche principali di celle fotovoltaiche prodotte con materiali diversi

Materiali	Tipo	Spessore (μm)	Efficienza (%)	Risorse (10 ³ t)
c-Si	Wafer	200	20	•
	Film	20	15	
a-Si	Film	0.7	10	•
InP	Wafer	200	25	1.68
	Film	2	20	
GaAs	Wafer	200	25	110
	Film	2	20	
CuInSe ₂	Film	2	15	1.68/83
CdTe	Film	2	15	555/22
Ge	Wafer	200	15	4.4
	Film	0.5	15	

rendimento a quello cristallino, ma che è prodotto anche a costi inferiori. Attualmente si cerca di migliorare l'efficienza del silicio amorfo (>15%) e la sua stabilità. I ricercatori, oggi, intravedono ampi orizzonti di interesse nello sviluppo di nuovi materiali semiconduttori (calcogenuri di metalli di transizione) preparati con la tecnica dei film sottili.

I punti critici di studio per questi materiali sono il processo di deposizione, lo studio della morfologia dello strato, i processi di trattamento termico, la preparazione dei semiconduttori e la realizzazione di dispositivi (eterogiunzioni p-ZnTe/n-ZnFeS ed omogiunzione p-ZnFeS/n-ZnFeS) [22]. Le caratteristiche principali di celle prodotte con materiali diversi sono riportate nella Tabella 1.

Impianti eolici

L'energia eolica è una risorsa rinnovabile sfruttata sin dall'antichità per mezzo di sistemi rotanti a pale. I rudimentali mulini a vento sono diventati macchine sempre più sofisticate ed attualmente la maggior parte di essi monta rotori tripale [23]. Questi sistemi, sviluppati originariamente in Danimarca hanno evidenziato doti di semplicità costruttiva e durata. Allo stato attuale non esiste una diffusione capillare di questa tecnologia per motivi inerenti ai costi di installazione, ancora più elevati rispetto ai sistemi tradizionali. Una maggiore competitività può essere raggiunta con un aumento della potenza per macchina installata (fino ad 1 MW) e l'uso di materiali costruttivi leggeri, anche se ciò comporta la necessità di migliorare l'affidabilità dei componenti utilizzati. La pratica ha dimostrato che i problemi più comuni per gli aerogeneratori sono causati da cedimenti meccanici alle pale, dalla corrosione dei materiali e dalla azione degli agenti meteo.

I componenti del rotore sono le parti più sollecitate di tutto il sistema. Ai materiali metallici, quali alluminio od acciaio, soggetti a problemi di corrosione, si preferisce l'uso di compositi plastici rinforzati con fibre di vetro (GRP) o di carbonio (CRP), a cui si possono anche aggiungere componenti epossidici (GRP/epoxy o CRP/epoxy), che ne migliorano la resistenza alla salsedine. Il problema della corrosione delle torri e della navicella dovuta alla salsedine, soprattutto nei casi di installazioni in regioni costiere, influenza fortemente la scelta del tipo di struttura ed i costi dei trattamenti superficiali. Alle strutture in acciaio che richiedono notevoli costi di manutenzione e verniciature con resine epossidiche, oggi si preferiscono quelle in

cemento armato, mentre si utilizza una struttura metallica con esterno in materiali plastici rinforzati (GRP) per costruire le navicelle.

Generatori da correnti marine

Fino a pochi anni addietro, la realizzazione di impianti per lo sfruttamento delle correnti marine per la produzione di energia elettrica era considerata come un'ipotesi piuttosto lontana da una possibile concretizzazione. Al contrario, negli ultimi anni diversi studi sono stati sviluppati sull'argomento ed ormai si è passati alla costruzione dei primi impianti dimostrativi di questa tecnologia. I problemi connessi con la scelta dei materiali da adottare per questi impianti dipendono soprattutto dalla severità imposta dal particolare ambiente in cui questi devono operare. Corrosione, resistenza al fenomeno del biofouling e stabilità delle strutture al moto ondoso sono i problemi principali da affrontare e da risolvere per ottenere impianti con rendimenti accettabili e durate apprezzabili. Le ricerche attuali puntano soprattutto alle tecniche di trattamento e rivestimento delle superfici esposte all'azione del mare per avere risposte positive in termini di durata dei materiali [24].

Conclusioni

Dalla ricerca è stato messo in evidenza come lo sviluppo di materiali innovativi sia un elemento chiave nell'evoluzione delle tecnologie per la conversione dell'energia.

Nei tradizionali impianti termici ad espansione di fluido, l'incremento delle temperature operative è il fattore critico per l'ottenimento di efficienze sempre maggiori e di riduzione delle emissioni nocive. La ricerca in questo settore è stata quindi indirizzata, fin dagli anni cinquanta, verso la produzione di acciai legati resistenti a fenomeni di corrosione/ossidazione ed alla elevata temperatura. Recentemente, è stato proposto il ricorso ai materiali ceramici, che costituiscono una soluzione promettente per la realizzazione di componenti operanti ad elevatissime temperature.

Le celle a combustibile sono da tempo riconosciute come una valida alternativa ai tradizionali sistemi di produzione di energia elettrica, esiste tuttavia una serie di problematiche legate all'elettrolita utilizzato e al conseguente livello di temperatura di funzionamento. Attualmente le ricerche sono fortemente indirizzate verso lo sviluppo di materiali che presentino elevata stabilità alle condizioni di funzionamento, costi limitati ed utilizzabili con tecniche di preparazioni a basso impatto ambientale. Il panorama delle fonti rinnovabili è dominato dai grandi impianti idroelettrici che hanno ormai maturato un elevato livello tecnologico a costi competitivi. Lo sviluppo degli impianti idroelettrici di piccola potenza è legato alla produzione di turbine costruite con materiali e tecniche economiche.

Le altre tecnologie utilizzanti energie rinnovabili hanno raggiunto la soglia della pre-competitività economica; la loro piena espansione è strettamente legata alla possibilità di impiego di materiali che riducano i costi ed aumentino l'efficienza.

Bibliografia

- [1] F. Bregani, G.A. Camona *et al.*, Atti del convegno "Materiali, ricerca e prospettive tecnologiche", 2, Milano 10-14 Novembre 1997, 1321.
- [2] G.P. Mor, M. Prosperini *et al.*, Atti Convegno "Materiali, ricerca e prospettive tecnologiche" Milano 10-14 novembre 1997, 1343.
- [3] H. Arai, H. Fukuzawa, *Catalysis Today*, 1995, **26**, 217.
- [4] J.P. Collins, J.D. Way, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1993, **32**, 3006.
- [5] A. Paggini, *Chim. Ind.*, 1998, **80**, 989.
- [6] G. Cacciola, *Chim. Ind.*, 1998, **80**, 1057.
- [7] S. Freni, S. Cavallaro, N. Giordano, *Tecn. Chim.*, 1989, **11**, 150.
- [8] S. Freni, S. Cavallaro, N. Giordano, *J. Applied Electrochem.*, 1990, **20**, 1060.
- [9] J.H. Hirschenhofer, D.B. Stauffer *et al.*, Fuel cell Handbook 4th edition, 1998, 5.
- [10] K. Kirst, Proceedings of Fuel cell seminar, Tucson (AZ) 29 novembre - 2 dicembre 1992.
- [11] N. Giordano, E. Passalacqua *et al.*, *Electrochimica Acta*, 1990, **35(9)**, 1411.
- [12] E. Passalacqua, F. Lufrano *et al.*, *J. New Mat. Electrochem. Systems*, 2000, **3**, 131.
- [13] J.H. Hirschenhofer, D.B. Stauffer *et al.*, Fuel cell Handbook 4th edition, 1998, 6.
- [14] M. Gozzi, *Antinquin.*, 1999, **5**, 38.
- [15] A. Carotenuto, C. Casarosa, L. Vanoli, *La Termotecnica*, 1999, **4**, 91.
- [16] E.R. Vieitez, S. Ghosh, *Biomass and Bioen.*, 1999, **16**, 299.
- [17] S. Rapagnà, N. Jand *et al.*, Atti Convegno "Materiali, ricerca e prospettive tecnologiche" Milano 10-14 novembre 1997, 1457.
- [18] L. Cassito, Atti del 52° Congresso Ati, 1997, 1495.
- [19] L. Molina, Atti del 52° Congresso Ati, 1997, 1551.
- [20] P. Pierpaoli, G. Vitali, M. Nicolini, *Inquin.*, 1999, **4**, 44.
- [21] L. Marzio, R. Vigotti, *La Termotecnica*, 1999, **4**, 79.
- [22] A.B. Kashyout, A.S. Aricò *et al.*, Proceeding of the 4th International conference of Energy development and environment, Cairo Egypt, 1994, 337.
- [23] M. Gozzi, *Antinquin.*, 1999, **2**, 38.
- [24] M. De Pratti, Atti Convegno "Materiali, ricerca e prospettive tecnologiche" Milano 10-14 novembre 1997, 1351.