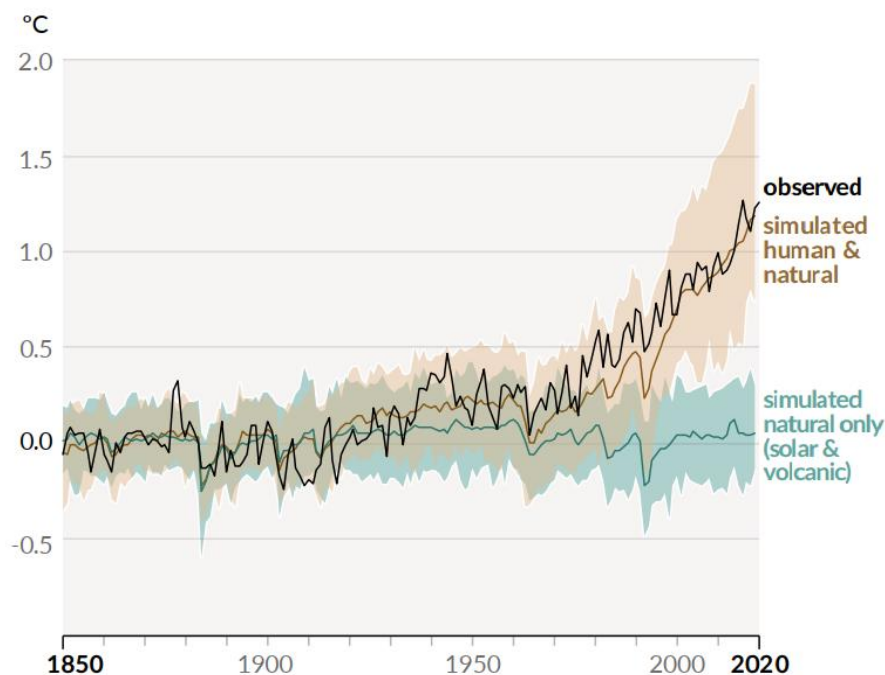


## SURRISCADAMENTO GLOBALE: PERCHÉ L'IDROGENO?

La manifestazione più immediatamente palese del riscaldamento globale, e cioè l'aumentata frequenza di fenomeni atmosferici estremi, è ormai sotto gli occhi di tutti, e non passa giorno che la stampa non ne parli. Mentre si affievoliscono le voci dei negazionisti, peraltro ancora ben attivi nell'opporci all'evidenza, il tema di questa emergenza globale coinvolge sempre di più movimenti giovanili di protesta, ed anche i politici sembrano ora lentamente svegliarsi da un colpevole letargo.



Andamento dell'anomalia termica (IPCC 2021)

Secondo l'ultimo rapporto sui cambiamenti climatici pubblicato lo scorso agosto 2021 dall'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), nel 2020 la temperatura media sulla superficie terrestre è stata tra 0,8 e 1,3 °C superiore al valore preindustriale (incremento chiamato *anomalia termica*); tale elevato valore è senza precedenti negli ultimi 2000 anni, ed è superiore ai valori, mediati sulla base di un secolo, ricostruiti per gli ultimi 100 000 anni di vita del nostro pianeta.

Sugli effetti devastanti del surriscaldamento globale sull'ecosistema terrestre è inutile dilungarsi in questa sede, essendo argomento ben noto; ben note, almeno ai più, ne sono anche le cause: il rigetto di gas serra nell'atmosfera in conseguenza delle diverse attività umane. Tra questi gas, di gran lunga quello che maggiormente contribuisce all'effetto serra antropico è l'anidride carbonica (*biossido di carbonio CO<sub>2</sub>*), che si libera principalmente nei processi di sfruttamento delle fonti energetiche fossili (combustione di carbone, prodotti petroliferi e gas naturale), ma anche in altri processi industriali, come la fabbricazione del cemento. L'attuale concentrazione volumetrica di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera ha ormai raggiunto il valore di 410 ppm (parti per milione in volume); nell'era preindustriale (1850-1900) era attorno a 290 ppm. Mai negli ultimi 2 milioni di anni, l'atmosfera è

stata così ricca di anidride carbonica. Analoghi dati allarmanti riguardano altri gas serra di origine antropica nell'attuale atmosfera (metano CH<sub>4</sub> e ossido nitroso N<sub>2</sub>O).

Di fronte ad una prospettiva drammatica per l'umanità nell'immediato futuro, i governi hanno risposto con l'accordo di Parigi, trattato internazionale vincolante sul cambiamento climatico, adottato da 196 nazioni il 12 dicembre 2015, ed entrato in vigore il 4 novembre 2016. L'obiettivo dichiarato di questo accordo è di limitare l'anomalia termica antropica del nostro pianeta ben sotto 2 °C, e possibilmente sotto 1,5 °C, rispetto al livello preindustriale.

Per centrare questo risultato di lungo termine, i diversi paesi intendono raggiungere il picco di emissione di gas serra il più rapidamente possibile, per realizzare poi un mondo climaticamente neutro entro la metà del secolo. Per tale data, le emissioni antropiche di CO<sub>2</sub> in atmosfera dovranno essere ridotte dell'85 % rispetto ai livelli attuali. Nell'ambito di questa strategia, l'Unione Europea si è impegnata a ridurre le emissioni di gas serra del 55% entro il 2030, rispetto ai valori 1990 (*Giornata della Terra*, aprile 2021). Nella stessa occasione, anche gli Stati Uniti si sono impegnati ad abbattere almeno del 50% le proprie emissioni di gas serra, entro la stessa data e sempre rispetto ai livelli del 1990.

Appare evidente come, per raggiungere tali risultati, il principale presupposto sia una rapida transizione verso un diverso modello di produzione ed utilizzo dell'energia, con l'abbandono delle fonti energetiche fossili (o quanto meno del rilascio in atmosfera dei relativi prodotti di combustione). A questo proposito si fa grande affidamento sulla transizione verso un modello energetico basato sull'idrogeno; vediamo di spiegare perché.

Mentre le principali proprietà termofisiche dell'idrogeno sono riportate nella Tabella 1, è necessario precisare che questo combustibile, a differenza del gas naturale, pur essendo l'elemento più diffuso nel pianeta Terra ed anche nell'intero universo osservabile, non costituisce una fonte energetica ma solo un vettore energetico, in quanto non reperibile liberamente in natura (se non in tracce in alcuni gas naturali); deve essere prodotto. Fondamentale il fatto che il risultato della combustione dell'idrogeno è l'acqua, innocua all'ambiente. La capacità dell'idrogeno in prospettiva di poter soddisfare direttamente parecchi usi energetici finali gli attribuisce similitudine con il vettore energia elettrica.

**Tabella 1 – Proprietà fisiche dell'idrogeno e confronto con altri combustibili**

<b>PROPRIETÀ</b>	<b>IDROGENO</b>	<b>CONFRONTO</b>
<b>Temperatura di ebollizione normale NBP (a 1 atm)</b>	<b>-252,78 °C</b>	<b>~90 °C sotto LNG</b>
<b>Densità (gas a 20 °C e 1 bar)</b>	<b>0,0838 kg m<sup>-3</sup></b>	<b>~ 1/10 del Gas Naturale</b>
<b>Densità (gas a 20 °C e 700 bar)</b>	<b>39,7 kg m<sup>-3</sup></b>	<b>~ 1/8 del Gas Naturale</b>
<b>Densità (liquido al NBP)</b>	<b>70,79 kg m<sup>-3</sup></b>	<b>~ 1/6 del Gas Naturale</b>
<b>Potere calorifico inferiore massico (LHV) a 20 °C e 1 bar</b>	<b>33,314 kWh/kg</b>	<b>2,39 quello del Metano</b>
<b>Potere calorifico inferiore volumico a 20 °C e 1 bar</b>	<b>2,754 kWh/m<sup>3</sup></b>	<b>~ 1/3 del Metano</b>
<b>Potere calorifico inferiore volumico a 20 °C e 700 bar</b>	<b>1322 kWh/m<sup>3</sup></b>	<b>~ 1/3 del Metano</b>
<b>Velocità di propagazione della fiamma laminare</b>	<b>3,46 m s<sup>-1</sup></b>	<b>~ 8 volte quella del Metano</b>
<b>Intervallo di infiammabilità in aria</b>	<b>4-77 % vol.</b>	<b>~ 7 volte quello del Metano</b>
<b>Energia minima di accensione</b>	<b>0,011-0,017 mJ</b>	<b>~ 1/25 di quella del Metano</b>

Come si vede dai dati di Tabella 1, l'idrogeno è un prodotto altamente infiammabile, con bassa energia di accensione e maggior propensione del metano ad indurre detonazione.

L'elevato valore del potere calorifico massico (densità massica di energia) viene spesso sottolineato come caratteristica altamente favorevole di questo vettore energetico. Non si deve però dimenticare che l'idrogeno è l'elemento più leggero tra tutti: un chilogrammo di idrogeno gassoso in condizioni ambientali richiede per il contenimento un volume di quasi 12 m<sup>3</sup>; in stato condensato (come liquido o gas a 700 bar) i dati di Tabella 1 mostrano un cospicuo incremento della densità energetica (peraltro sempre largamente inferiore a quella del metano in condizioni equivalenti), ma in questi casi bisogna tener conto della massa dell'adatto contenitore: per gas a 700 bar (serbatoio in materiale composito dei veicoli ad idrogeno), la massa del gas è solo il 4 – 8% della massa totale. Inoltre, bisogna considerare la penalizzazione energetica per liquefare o comprimere l'idrogeno: con le attuali tecnologie, la liquefazione richiede attorno al 30% del suo contenuto energetico (in termini di *LHV*), mentre la compressione a 700 bar attorno al 13%. Per lo stoccaggio, anche stagionale, di grandi quantità di idrogeno l'opzione più immediata, similmente a quanto attualmente fatto per il gas naturale, è l'immissione sotto pressione in giacimenti esauriti di gas naturale o in cavità saline. La compressione e la liquefazione rappresentano anche sistemi di trasporto dell'idrogeno in contenitori (bomboloni e serbatoi criogenici) a bordo di veicoli stradali o ferroviari; come gas compresso attraverso gasdotti; come liquido, in prospettiva si pensa anche a navi simili alle attuali metaniere, con utilizzo della frazione evaporata, a causa della dispersione termica, per la propulsione; i relativi problemi di sicurezza e di efficientamento energetico appaiono pesanti.

Le difficoltà tecnologiche poste dal trasporto di rilevanti quantità di idrogeno a grande distanza o comunque per rotte trasmarine possono anche essere superate inglobando l'idrogeno in molecole più grandi trasportabili in forma liquida. Tra questi trasportatori d'idrogeno si pensa all'ammoniaca NH<sub>3</sub>, ottenibile per sintesi tra idrogeno e azoto, che a 30 °C è liquida alla pressione di 11,7 bar, riconvertibile in idrogeno o in molti casi direttamente impiegabile come combustibile, con produzione di innocuo azoto. Altri trasportatori di idrogeno su cui è impegnata la ricerca tecnologica, sono i cosiddetti LOHC (*Liquid Organic Hydrogen Carriers*), molecole organiche ricche in idrogeno, formate per reazione con un composto base, e riconvertibili in idrogeno per reazione opposta. Tra questi prodotti, particolare attenzione è riposta sul *MCH* (*metilcicloesano*), ottenibile per reazione di idrogeno con toluolo; sia toluolo che *MCH* sono liquidi sottoraffreddati in condizioni ambiente; naturalmente il trasporto di idrogeno sotto questa forma richiede una doppia infrastruttura, per ricondurre il toluolo al luogo d'origine. La penalizzazione energetica della doppia conversione è piuttosto elevata: con tecnologia attuale attorno al 25 – 35 % del potere calorifico inferiore dell'idrogeno per quanto concerne l'ammoniaca; attorno al 35 – 40% (in prospettiva 25%) per *MCH*. Questi stessi trasportatori di idrogeno possono venire impiegati per il suo stoccaggio indiretto. Un ulteriore processo considerato con interesse è la produzione di *idrocarburi sintetici* (metano, metanolo, benzine, kerosene) per reazione di idrogeno decarbonizzato e anidride carbonica catturata dall'atmosfera o prodotta da biomasse; possono direttamente sostituire gli analoghi combustibili di origine fossile, e far uso delle infrastrutture già esistenti per il trasporto e lo stoccaggio.

Tra le particolari caratteristiche dell'idrogeno bisogna inoltre tenere in conto le dimensioni molto ridotte della sua molecola, che causano difficoltà di contenimento nelle connessioni e tenute meccaniche, ed inducono fragilità (per fenomeni di diffusione a livello interstiziale) in alcuni materiali ferrosi.

La rapida decarbonizzazione del mondo dell'energia richiede innanzitutto un drastico incremento nella penetrazione elettrica (impiego dell'energia elettrica negli usi finali), accompagnato da un parallelo esplosivo sviluppo nello sfruttamento delle sorgenti energetiche rinnovabili di tecnologia già consolidata (fotovoltaico, eolico e biomasse), con il progressivo abbandono delle fonti fossili almeno in tutte le applicazioni ove non sia possibile la cattura e lo stoccaggio permanente dell'anidride carbonica prodotta, evitando il suo rilascio nell'atmosfera. La separazione della  $CO_2$  dai prodotti di combustione è praticamente fattibile solo in situazioni di elevato sviluppo concentrato, e può avvenire in post-combustione con processi di lavaggio dei fumi con soluzioni assorbenti rigenerabili o per adsorbimento su matrici solide; altre tecnologie (separazione pre-combustione o combustione con ossigeno) sono in fase di sviluppo. La cattura della  $CO_2$  è sperimentata anche direttamente dall'atmosfera, con elevato dispendio energetico per la bassa concentrazione coinvolta.

Per quanto concerne lo stoccaggio permanente della  $CO_2$  catturata, la tecnica ora preferita è quella dello stoccaggio geologico in caverne saline sotterranee, giacimenti di idrocarburi esausti (l'iniezione di anidride carbonica in questi siti è anche utilizzata per il recupero delle frazioni residue di idrocarburi); anche in questo caso, altri sistemi di stoccaggio sono in fase di sperimentazione (stoccaggio geologico in formazioni saline profonde, in fase liquida o di idrato clatrato in profondità negli oceani, oltre i 3000 m, oppure stoccaggio per mineralizzazione di rocce ricche di *Ca* e *Mg*, con formazione di carbonati per lenta reazione spontanea).

L'idrogeno è già presente nell'attuale modello economico: costituisce la materia prima di alcuni importanti processi industriali, quali la sintesi dell'ammoniaca  $NH_3$  (a propria volta materia prima per la produzione dei fertilizzanti ureici e di esplosivi), la sintesi del metanolo  $CH_3OH$  (da cui si producono materie plastiche e solventi organici), e la raffinazione del petrolio (*Idrotrattamento, Desolforazione, Idrocracking*). Attualmente la produzione di idrogeno ha principalmente luogo da idrocarburi fossili (processi di *Steam Reforming, Ossidazione Parziale o Reformig Autotermico del metano; Gasificazione del carbone*). È chiaro che l'idrogeno così prodotto è ad alta intensità di carbonio, in conseguenza delle materie prime di partenza (viene chiamato *idrogeno nero o grigio*). Le medesime tecnologie possono permettere la produzione di idrogeno a bassa intensità di carbonio qualora si provveda al sequestro e stoccaggio della  $CO_2$  prodotta (*idrogeno blu*). L'*idrogeno verde* (ad intensità nulla di carbonio) si può ottenere partendo da biomasse (per gasificazione) o per elettrolisi dell'acqua negli elettrolizzatori, utilizzando energia elettrica da fonti rinnovabili.

L'accoppiamento armonico dei vettori energetici elettricità / idrogeno si completa per l'esistenza di due apparati di tecnologia ormai consolidata, che realizzano entrambi reazioni elettrochimiche: i già ricordati elettrolizzatori e le pile a combustibile. Gli elettrolizzatori richiedono alimentazione elettrica in corrente continua per scindere le molecole d'acqua e produrre agli elettrodi in forma separata idrogeno ed ossigeno anche a media pressione, con rendimento (calcolato rispetto al potere calorifico inferiore dell'idrogeno) dell'ordine del 60-80 % ed in prospettiva fino anche al 90 % (elettrolizzatori ad ossidi solidi).

Le pile a combustibile (*Fuel Cells*, acronimo *FC*) realizzano la reazione opposta degli elettrolizzatori: alimentando gli elettrodi con idrogeno ed ossigeno (o aria atmosferica) producono energia elettrica in corrente continua, scaricando acqua come prodotto di reazione. Operano generalmente in cogenerazione, rendendo disponibile anche calore a temperatura più o meno elevata, in dipendenza del tipo di *FC*. Il rendimento di conversione, sempre calcolato rispetto al potere calorifico inferiore dell'idrogeno, è in questo caso attualmente attorno al 55-60 % con buone prospettive di miglioramento nell'immediato futuro.

In Giappone (programma *ENE-FARM*) sono già installate più di 300 000 *miniFC*, per ora alimentate a gas di rete o *GPL* ma con possibilità di alimentazione futura ad idrogeno o gas di rete ricco in questo componente, con funzionamento cogenerativo, per i fabbisogni residenziali; più di 5 milioni di queste unità sono previste per il 2050.

L'idrogeno può svolgere un ruolo sistemico nella transizione verso il totale sfruttamento delle fonti rinnovabili d'energia nei diversi settori di utilizzo, diversificati nello spazio e nel tempo. Le due tendenze parallele (aumento dello sfruttamento delle fonti rinnovabili e aumento dell'elettrificazione negli usi finali dell'energia) pongono serie sfide alla stabilità del sistema energetico poiché entrambe la generazione e la domanda di potenza sono intermittenti e variabili nel tempo. Sul lato della produzione, le generazioni eolica e solare mostrano forti variazioni sia sul corto che nel lungo periodo. Dal lato della domanda, variazioni orarie, giornaliere, settimanali, mensili e stagionali sono significative, specie nel settore degli edifici. L'idrogeno può costituire un fondamentale meccanismo di accoppiamento tra i diversi settori di utilizzo energetico, quale importante mezzo per immagazzinare energia in grande quantità per lunghi periodi di tempo, e di trasportare energia dalle regioni di produzione a quelle di utilizzo. Da tener presente peraltro che, con la tecnologia attuale, la doppia transizione *energia elettrica*→*idrogeno*→*energia elettrica* comporta una penalizzazione energetica superiore al 50%, ben maggiore a quella del pompaggio. Localmente, per quantità più limitate e tempi più brevi, l'accumulo di energia elettrica può venire realizzato in rampe di batterie.

Quanto più sopra sommariamente riportato permette di tracciare il futuro panorama decarbonizzato nelle principali applicazioni dei diversi principali settori energetici come segue:

**Trasporti.** In questo settore la presenza dell'idrogeno è già palese. Per le autovetture elettriche di trasporto passeggeri l'alimentazione a batteria (*BEV – Battery Electric Vehicles*) appare al momento nettamente favorita rispetto all'alimentazione ad idrogeno e pila a combustibile (*FCEV – Fuel Cell Electric Vehicles*), con le penalità di limitata autonomia e lungo tempo di ricarica. La situazione potrebbe mutare con lo sviluppo della rete di rifornimento di idrogeno e la diminuzione di costi, per effetto scala, delle pile a combustibile e dei serbatoi. Se l'idrogeno è prodotto da energia elettrica in elettrolizzatori, risulta evidente la maggior convenienza energetica dei veicoli *BEV*.

Diversa è la situazione per veicoli pesanti (autocarri, bus), quando è essenziale grande autonomia e la potenza in gioco è maggiore: in questo settore la modalità *FC* sta sviluppandosi, anche per il fatto che spesso questi veicoli fanno capo a locazioni fisse di partenza, ove una singola struttura di rifornimento può già operare con sufficiente utilizzazione. Per il trasporto urbano o per percorsi limitati, anche bus a batterie sono già presenti nella realtà di alcuni Paesi.

Un sostanziale freno allo sviluppo della motorizzazione ad idrogeno è, e sarà nell'immediato futuro, la mancanza di una adeguata rete di stazioni di rifornimento. Interventi legislativi e sussidi pubblici saranno sicuramente necessari per superare questo ostacolo.

Anche nel trasporto ferroviario si può beneficiare, per il rifornimento, di percorsi fissi: situazioni favorevoli all'impiego del combustibile idrogeno con *FC* sono le tratte non elettrificate, con intenso trasporto merci anche transfrontaliero, o linee di grande estensione e traffico limitato. Come in altri casi, l'impiego dell'idrogeno per la propulsione di treni merci ne permetterebbe l'adozione anche ai mezzi di movimentazione e sollevamento utilizzati nelle operazioni di carico e scarico (muletti, camioncini etc.).

Nel trasporto marittimo, settore ad elevata emissione di  $CO_2$  ed anche di ossidi di zolfo, l'utilizzo diretto dell'idrogeno viene preso in considerazione per battelli e navi di modesta stazza e percorsi limitati, sotto giurisdizione nazionale. Per navi di grande tonnellaggio per traffico merci internazionale e crociere l'ipotesi ora più accreditata, oltre all'uso diretto dell'idrogeno anche immagazzinato in forma liquida, è l'utilizzo di combustibili a basso impatto di carbonio derivati dall'idrogeno, ed in particolare dell'ammoniaca, che si presta ad alimentare direttamente motori a combustione interna opportunamente adattati, ed anche turbine a gas, con eventuali promotori di ignizione. Quest'ultima soluzione può beneficiare di infrastrutture sperimentate e già in parte esistenti in molti porti.

Nel trasporto aereo la propulsione con motore elettrico è ipotizzabile solo per piccoli velivoli in servizio locale, ed in questo caso l'impiego di batterie è visto con maggior favore rispetto alle FC, per le difficoltà poste dallo stoccaggio criogenico dell'idrogeno a bordo. Per le flotte di grandi aerei commerciali, l'unica opzione realistica per la riduzione delle emissioni di  $CO_2$  è l'impiego di adeguati biocombustibili o idrocarburi sintetici ottenuti per sintesi di  $H_2$  e  $CO_2$ , entrambi a basso o nullo impatto di carbonio. Ulteriore vantaggio di questa soluzione è di conservare pressoché inalterata l'attuale conformazione sia dei velivoli che dell'infrastruttura di rifornimento a terra; un conseguente svantaggio è il forte incremento nei costi di esercizio, che dovrà necessariamente riverberarsi sull'utenza.

**Edifici.** L'uso dell'energia negli edifici è responsabile, a livello globale, di circa il 28% delle emissioni di gas serra legate alla totalità delle trasformazioni e utilizzi energetici; quale premessa bisogna sottolineare quindi che tutte le azioni di efficientamento energetico in questo contesto, soprattutto legate all'isolamento dell'involucro, possono dare un contributo sostanziale sulla strada di un mondo decarbonizzato.

In situazione di disponibilità di idrogeno verde si potrà procedere, come intervento preliminare, al suo miscelamento nel gas distribuito dalle reti pubbliche: fino ad una concentrazione in volume del 5% le utenze domestiche non dovrebbero avvertire alcuna conseguenza. Secondo studi preliminari in corso, il miscelamento di idrogeno nel gas di rete potrebbe essere spinto fino ad una concentrazione volumetrica del 20% con solo modesti interventi sulle condutture e apparecchi utilizzatori domestici; problemi potrebbero sorgere per alcune utenze industriali.

Nel futuro meno immediato c'è chi ipotizza la totale sostituzione del gas di rete con idrogeno verde, con drastici interventi sulle infrastrutture di trasporto e distribuzione, ed adeguamento degli apparecchi utilizzatori. Questo scenario potrebbe incontrare opposizione da parte dell'utenza domestica per questioni di sicurezza; impianti di teleriscaldamento urbano possono limitare l'utilizzo diretto dell'idrogeno in un contesto più adeguato.

Altra opzione è quella di sostituire la frazione fossile con biocombustibili o prodotti sintetici verdi nel gas di rete, potendo così utilizzare le infrastrutture di trasporto e distribuzione esistenti; questa ipotesi si scontra con problemi di reperibilità delle materie prime e di costo di produzione.

La decarbonizzazione di questo settore energetico certamente comporterà un forte incremento nell'impiego di pompe di calore elettriche per il riscaldamento invernale e produzione di acqua calda sanitaria negli edifici di nuova costruzione utilizzando terminali di riscaldamento a bassa temperatura, in un contesto urbano non troppo agglomerato. Ciò comporterà un ulteriore aggravio nello sbilanciamento del sistema energetico con sfasamento tra disponibilità e consumo del vettore elettrico, da equilibrare anche come accennato in precedenza con importante ruolo dell'idrogeno.

È anche prevedibile un forte impulso, soprattutto per utenze commerciali e grandi condomini, nell'installazione di impianti cogenerativi a FC, ma anche micro-cogenerativi per singole utenze domestiche sull'esempio del programma *ENE-FARM* in corso in Giappone.

**Produzione di energia elettrica.** Nel periodo di transizione che accompagnerà il progressivo sviluppo dello sfruttamento delle fonti rinnovabili, si dovrà intervenire per mitigare l'impronta di carbonio della produzione di energia termoelettrica dalle tradizionali fonti fossili, iniziando in particolare dalle centrali più inquinanti, e cioè quelle alimentate a carbone. A questo proposito è in fase di sperimentazione la possibilità di gestire queste centrali in co-combustione di carbone ed ammoniaca (che dovrà essere di origine decarbonizzata). Risultati preliminari indicano che si possa arrivare a percentuali di ammoniaca, in termini di relativo apporto energetico alla combustione, fino al 20% senza particolari problemi, se non la necessità di maggior abbattimento degli  $NO_x$  dai fumi. Naturalmente la messa in opera di efficaci sistemi di cattura e sequestro permanente della  $CO_2$  dai fumi di combustione darebbe un contributo definitivo alla decarbonizzazione del settore. Come già accennato, la natura aleatoria della produzione elettrica dalle fonti rinnovabili fotovoltaica ed eolica e la variabilità della richiesta elettrica renderà necessaria la presenza di sistemi di accumulo (diretto od indiretto) e di produzione elettrica altamente flessibili, per bilanciare lo sfasamento tra domanda e disponibilità. A questo proposito, dal lato della produzione decarbonizzata un ruolo importante lo potranno giocare non solo le pile a combustibile ma anche impianti a turbina a gas, anche a ciclo combinato, direttamente alimentati ad idrogeno o ad ammoniaca verdi, la cui fattibilità è già stata dimostrata.

Bisogna infine considerare i generatori di emergenza, necessari per assicurare continuità di alimentazione elettrica ad utenze critiche, ed i generatori operanti in assenza della rete elettrica, necessari ad esempio per alimentare piccoli agglomerati abitativi isolati, o apparati di telecomunicazione (applicazione in grande espansione anche nei paesi in via di sviluppo). Attualmente questi generatori funzionano in prevalenza con motori diesel alimentati da combustibili di origine fossile. Le pile a combustibile si prestano ottimamente a questa stessa applicazione, con possibilità di alimentazione da combustibili a bassa o nulla impronta di carbonio, quali l'idrogeno stesso ma anche il metanolo o l'ammoniaca verdi, facilmente contenibili in serbatoi.

**Impieghi industriali dell'energia.** Si è già accennato agli attuali impieghi principali dell'idrogeno nell'industria, che riguardano la raffinazione dei prodotti petroliferi, la produzione di ammoniaca e di metanolo: in questo ambito la strada per la decarbonizzazione consiste nell'implementare la produzione dell'idrogeno verde.

Tra i processi industriali ad alta impronta di carbonio bisogna citare la produzione di acciaio primario negli altoforni, che utilizza carbone (*coke*) quale mezzo riducente dei minerali ferrosi (ossidi: ematite, magnetite), con conseguente immissione in atmosfera di  $CO_2$ . Per la decarbonizzazione di questo settore sono percorribili due strade: la prima, ovvia, consiste nella messa in opera di sistemi di cattura e stoccaggio della  $CO_2$ ; la seconda nell'utilizzare direttamente idrogeno quale agente riducente dei minerali ferrosi in forni a tino, e successivamente energia elettrica verde nei forni ad arco (processo *DRI-EAF: Direct Reduced Iron – Electric Arc Furnace*). Entrambe queste tecnologie sono in fase di sperimentazione.

In molte lavorazioni industriali vengono ora utilizzati combustibili di origine fossile per generare le alte temperature richieste dal processo (fabbricazione del cemento, della carta, di particolari composti chimici etc.). Con opportuni adattamenti a componenti d'impianto, si potrà impiegare idrogeno verde quale combustibile, con rilevanti vantaggi ecologici.

Pressoché tutte le nuove tecnologie considerate per la salvaguardia ambientale risultano meno efficienti, più costose ed in genere tecnologicamente più complesse di quanto in atto al presente; se così non fosse, questi stessi processi si sarebbero probabilmente già imposti autonomamente nel mercato. Ciò genera diffuso scetticismo sulla loro effettiva possibilità di adozione. Purtroppo non esiste ad ora migliore alternativa per garantire sopravvivenza alle future generazioni in questo pianeta.