

**FRANCO DONATINI**

Professore di Energia Geotermica presso l'Università di Pisa, è stato fino al 2010 responsabile delle Politiche di Ricerca e Sviluppo delle fonti rinnovabili di Enel e membro della Piattaforma Europea dell'Idrogeno e delle Celle a Combustibile. Nel 2006 ha sviluppato la prima applicazione di accumulo energetico a idrogeno solido su una imbarcazione alimentata a fonte solare ed eolica, che ha effettuato la circumnavigazione del Sudamerica.

L'IDROGENO E LE SUE PROSPETTIVE NEL SISTEMA ENERGETICO

Introduzione

Il problema del cambio climatico rappresenta la sfida epocale dell'umanità e richiede di avviare una fase di transizione energetica basata su un programma di interventi a largo raggio per ridurre le emissioni di gas Serra, costituite principalmente da anidride carbonica e da altri gas climalteranti. Lo scopo è quello di limitare l'incremento di temperatura media del pianeta nei prossimi anni non oltre due gradi centigradi, per evitare impatti proibitivi sulla vita dell'umanità.

I punti focali di questa transizione consistono nella riduzione del consumo primario delle risorse energetiche e il passaggio dall'uso delle fonti fossili a quelle rinnovabili.

L'obiettivo più sfidante proposto dalla IEA (International Energy Agency) è quello di raggiungere al 2050 l'azzeramento delle emissioni di gas Serra [1]. Per il raggiungimento di questo obiettivo, lo sviluppo delle applicazioni dell'idrogeno nel sistema energetico può avere un ruolo importante nell'ambito dei diversi comparti, quali la generazione elettrica, il trasporto e i processi industriali [2]. La progressiva penetrazione dell'idrogeno in questi settori può ridurre significativamente le emissioni di anidride carbonica, soprattutto se la sua produzione deriva dall'impiego di fonti rinnovabili.

Caratteristiche dell'idrogeno

L'idrogeno non è praticamente presente in natura allo stato libero; non può quindi essere considerato un combustibile in quanto deve essere prodotto utilizzando una fonte primaria di energia, che può essere di tipo fossile o rinnovabile.

Le proprietà dell'idrogeno sono riportate nella tabella 1 e confrontate con quelle del gas naturale, da cui emerge una profonda differenza dal punto di vista chimico fisico ed energetico.

Galileo n.1

| | Idrogeno | Gas naturale |
|---|----------|--------------|
| Peso molecolare | 2 | 16 |
| Densità gas (kg/Nm ³) | 0,09 | 0,71 |
| Densità liquido (kg/m ³) | 71 | 424 |
| Temperatura di ebollizione (K) | 20 | 112 |
| Range di infiammabilità (% v/v gas) | 4-75 | 5-15 |
| Temperatura di autoignizione (K) | 847 | 813 |
| Temperatura adiabatica di fiamma (K) | 2318 | 2148 |
| Velocità di fiamma (m/s) | 28 | 3,5 |
| Potere calorifico inferiore (MJ/kg) | 120 | 47 |
| Potere calorifico inferiore (MJ/Nm ³) | 10,2 | 34 |

Tabella I – Confronto tra le proprietà dell'idrogeno e del gas naturale

Dalla tabella emerge che l'idrogeno rispetto al gas naturale ha una velocità di fiamma molto più elevata, un potere calorifico per unità di massa più che triplo, ma una densità molto più bassa a parità di pressione. Questo fa sì che il suo contenuto energetico a parità di volume e di pressione sia notevolmente più basso, il che pone maggiori problemi per quanto riguarda lo stoccaggio e la distribuzione se si vogliono utilizzare per questo gas le stesse infrastrutture usate per il gas naturale. Dal punto di vista del suo impiego, l'idrogeno, più che un combustibile, si può ritenere un intermedio nella conversione di energia, con almeno tre connotazioni.

Si tratta di un intermedio nello spazio, in quanto è possibile produrlo a livello centralizzato e distribuirlo attraverso una rete agli utenti finali per impieghi energetici localizzati, contribuendo a migliorare notevolmente la qualità dell'ambiente, in quanto l'idrogeno non produce emissioni nocive ma soltanto acqua. In questo caso l'idrogeno assume la caratteristica di un vettore energetico. La seconda connotazione è quella di intermedio nel tempo, in quanto esso può essere prodotto dagli impianti di generazione elettrica, nelle ore di bassa richiesta di carico ed accumulato per fornire energia nelle ore di punta, esplicando quindi una funzione di accumulo energetico.

Infine la terza connotazione è quella di intermedio di processo, in quanto nei sistemi di conversione di energia il passaggio attraverso l'idrogeno consente di utilizzare tecnologie, come le celle a combustibile, che hanno elevati rendimenti di conversione.

Produzione

La produzione dell'idrogeno può essere effettuata principalmente attraverso i seguenti processi:

- Reforming del metano: si tratta di una reazione catalitica del metano con vapore ad alta temperatura con produzione di idrogeno ed ossido di carbonio, ulteriormente convertito in idrogeno ed anidride carbonica attraverso la reazione di shift dell'acqua. Il processo ha un rendimento energetico di circa l'85%
- Gassificazione del carbone: consiste in una ossidazione parziale con ossigeno seguita da

una reazione di shift dell'acqua per produrre idrogeno ed anidride carbonica. La necessità di introdurre il processo di separazione dell'aria per produrre l'ossigeno penalizza l'efficienza energetica che risulta leggermente inferiore al 60%.

- Elettrolisi dell'acqua: consiste nella separazione elettrolitica dell'acqua in idrogeno e ossigeno, utilizzando elettricità; l'efficienza energetica è attualmente del 70-80%, con possibilità di raggiungere il 90% con lo sviluppo della tecnologia. La necessità di utilizzare elettricità ne limita la convenienza energetica, tuttavia la vera valenza di applicazione di questo processo risiede nell'accumulo, che peraltro è indispensabile nella produzione di elettricità da fonti rinnovabili come il solare e l'eolico, dove la disponibilità non ha un carattere continuo nel corso della giornata.
- Scissione termica dell'acqua con energia solare; si tratta di un processo innovativo sviluppato a livello sperimentale, molto interessante perché utilizza una fonte rinnovabile. La sua fattibilità è legata alla capacità di concentrare la radiazione solare per raggiungere le elevate temperature necessarie alla scissione della molecola dell'acqua.

Dal punto di vista delle fonti energetiche utilizzate, sono possibili diverse filiere produttive come illustrato nella figura 1. Partendo da fonti fossili, quali gas metano, carbone, olio combustibile, la produzione di idrogeno si basa su una sequenza di processi termochimici, essenzialmente la gassificazione per il carbone e il Reforming per il metano, con produzione di un gas ricco di idrogeno e ossido di carbonio. Il suddetto gas viene sottoposto al processo di Shift con vapore e produzione di ulteriore idrogeno e anidride carbonica che deve essere separata per il recupero dell'idrogeno stesso. Per rendere il processo sostenibile dal punto di vista ambientale occorre che l'anidride carbonica non venga emessa all'atmosfera, ma confinata in qualche modo, ad esempio pompata nel sottosuolo. Si tratta tuttavia di una operazione complessa sia in termini economici che ambientali e rischiosa per quanto riguarda la stabilità nel tempo del gas pompato all'interno delle cavità sotterranee. L'unica strada attualmente praticata con successo è la reiniezione dell'anidride carbonica nei giacimenti di carbone e di petrolio, che consente di aumentare la produttività dei giacimenti stessi. Si tratta tuttavia di soluzioni che si applicano in situazioni particolari che non risolvono in maniera generale il problema della sostenibilità ambientale di queste filiere.

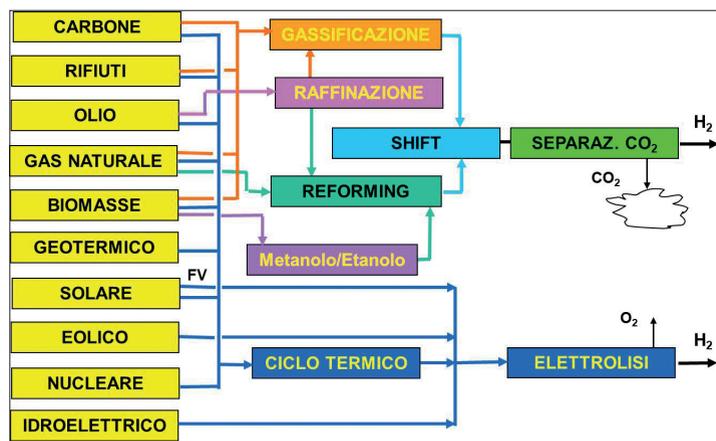


Figura 1 - Filiere di produzione dell'idrogeno a partire dalle diverse fonti energetiche

Galileo n.1

La sostenibilità ambientale è invece consentita dall'uso di fonti energetiche rinnovabili, eolica, solare, geotermica, idrica, le biomasse e il nucleare. In questo caso la produzione di idrogeno è effettuata tramite il processo di elettrolisi che utilizza l'elettricità prodotta da queste fonti. Si tratta quindi del cosiddetto idrogeno verde, cioè esente da emissioni di anidride carbonica. Nel caso delle biomasse l'idrogeno può essere ottenuto passando attraverso la produzione di metanolo e i successivi processi di Reforming e Shift come nel caso del metano.

L'elettrolisi rappresenta quindi la tecnologia più interessante, in quanto è quella prevalente per la produzione dalle varie fonti rinnovabili. Purtroppo i costi di questi impianti sono ancora elevati e l'efficienza energetica della conversione, se si include anche quella di generazione dell'elettricità con va oltre il 40%. Ad oggi infatti il solo processo elettrolitico ha al massimo un rendimento del 70%, anche se sono in corso di sviluppo sistemi innovativi con l'obiettivo di raggiungere il 90%. Tutto questo fa sì che l'accumulo energetico basato sull'idrogeno sia ad oggi energeticamente meno conveniente di quello elettrico basato sulle batterie. Tuttavia l'idrogeno può diventare economicamente e tecnologicamente conveniente per accumuli di alta potenza ed energia.

Oltre alle filiere sopra descritte, l'idrogeno può essere prodotto per termo scissione dell'acqua, portandola a temperature di alcune migliaia di gradi per ottenere un grado adeguato di separazione di idrogeno. La termoscissione può essere realizzata catturando la radiazione solare ad elevata concentrazione anche se per rendere tecnologicamente possibile questo processo occorre lavorare a temperature al di sotto di un migliaio di gradi. Ciò è possibile introducendo dei reagenti ausiliari, consumati e rigenerati durante il processo, che utilizzano l'energia termica fornita dalla radiazione solare per farli reagire chimicamente a temperatura molto più basse, come nel caso del ciclo Zolfo-Iodio, o con altri reagenti, in grado di operare a temperature di 500-800°C [2], [3], [4].

Accumulo

L'uso strategico dell'idrogeno è legato al suo impiego, come vettore e come accumulo energetico e rappresenta una delle vie possibili per decarbonizzare settori che al momento risultano fortemente dipendenti da fonti fossili, come il trasporto e gli usi termici. Come già detto in precedenza tuttavia l'accumulo dell'idrogeno è reso problematico dal suo elevato volume specifico.

Il suo stoccaggio in forma gassosa richiede pressioni elevate e conseguentemente l'introduzione di nuovi materiali di contenimento. Dai contenitori convenzionali in acciaio a 300 bar, già impiegati sugli autobus, si punta in prospettiva a quelli in materiale composito ad oltre 700 bar, che consentono di contenere il volume, a parità di contenuto energetico, a quello dei contenitori tradizionali per metano. Questi contenitori innovativi ad altissime pressioni comportano tuttavia una non trascurabile perdita di potenza di pompaggio, intorno al 10% del contenuto energetico dell'idrogeno stesso.

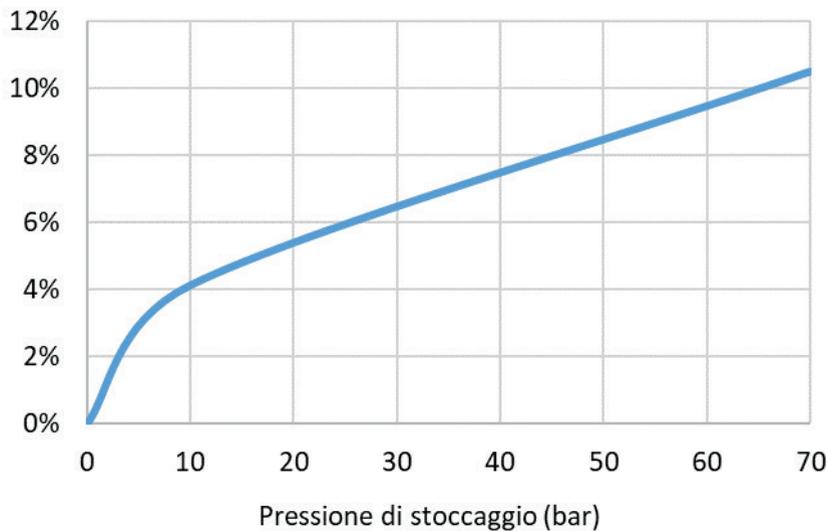


Figura 2 – Frazione di energia di compressione dell'idrogeno rispetto al suo potere calorifico al variare della pressione di stoccaggio

Lo stoccaggio in fase liquida risulta migliore di quello gassoso convenzionale per quanto riguarda il volume, ma più dispendioso in termini di consumo energetico che supera il 30%. Viene effettuato utilizzando serbatoi isolati a doppia parete con temperature di $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$. Si presta meglio a un impiego su autoveicoli, non richiedendo le elevate pressioni di quello gassoso.

Infine è stato messo a punto un sistema di stoccaggio solido, basato sull'immagazzinamento dell'idrogeno all'interno della matrice cristallina di leghe metalliche (LaNi_5 , Mg, Ti). Si tratta di una tecnica significativamente più compatta delle precedenti, di uso agevole e sicuro, in quanto opera a temperatura ambiente e pressioni limitate, di possibile impiego nella generazione elettrica distribuita, negli autoveicoli e nelle imbarcazioni da diporto. Una prima applicazione è stata sviluppata con successo nel 2006 per l'accumulo energetico di una barca alimentata a fonti rinnovabili che ha effettuato la circumnavigazione del Sudamerica [5].

In fase ancora sperimentale esiste una tecnica molto più efficiente di stoccaggio, basata sull'assorbimento per capillarità all'interno di nano fibre di atomi di Carbonio, raggiungendo una percentuale in peso del 60%, una soluzione che, per la sua compattezza, risulta molto adatta all'impiego su autoveicoli.

Nella figura 3 viene mostrato il confronto in termini di energia accumulata per unità di volume, tra le quattro soluzioni citate e i combustibili convenzionali, come il metanolo e la benzina, dove emerge la criticità dell'idrogeno rispetto a questi ultimi, eccetto che per le nanofibre al momento non ancora diffuse a livello industriale.

Galileo n.1

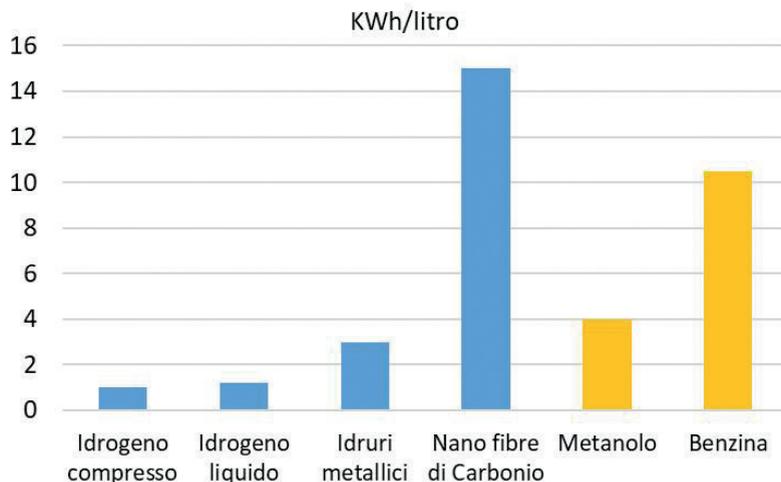


Figura 3 – Confronto tra le densità energetiche di stoccaggio tra l'idrogeno e alcuni combustibili convenzionali

Utilizzo

L'idrogeno ha prospettive di utilizzazione in tutti i tre settori energetici, con particolare riferimento al trasporto e alla generazione elettrica. Nel settore degli usi termici l'idrogeno ha interesse in ambito industriale, mentre a livello residenziale distribuito, i sistemi a pompa di calore appaiono più convenienti dal punto di vista economico, dell'efficienza energetica e della sicurezza.

L'utilizzo può essere effettuato, sia passando attraverso processi di combustione, che mediante la tecnologia innovativa, già sviluppata, rappresentata dalle celle a combustibile (Fuel Cell).

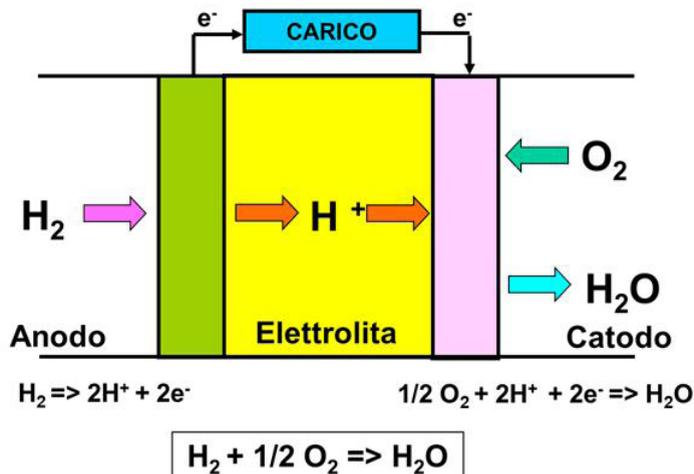


Figura 4 – Schema di una cella a combustibile alimentata a idrogeno

Le Fuel Cell consentono di ottenere potenza elettrica, mediante combinazione elettrochimica di un combustibile e di un ossidante, senza passare attraverso la conversione in energia termica. Il loro funzionamento è basato sulla presenza di un elettrolita permeabile al passaggio degli ioni, creando una circolazione di carica elettrica attraverso un circuito esterno, come mostrato schematicamente in figura 4 per una cella a combustibile alimentata a idrogeno. Rispetto alla combustione questa tecnica risulta intrinsecamente più efficiente e può essere anch'essa integrata in cicli termodinamici per la conversione di energia. Infatti mentre la combustione consiste in una reazione di ossidazione che trasforma completamente l'energia chimica del combustibile in calore che viene poi convertito in elettricità attraverso una macchina termica, le celle a combustibile utilizzano una reazione di ossido-riduzione, in grado di convertire l'energia del combustibile in un flusso ordinato di ioni in un senso ed elettroni nell'altro e quindi in elettricità [6].

I sistemi di generazione elettrica basati sulla combustione, utilizzano l'idrogeno prodotto attraverso il reforming del metano in un ciclo combinato; considerando che il reforming ha un rendimento di circa l'85% e un ciclo combinato attuale del 60%, il rendimento complessivo del sistema supera il 50%. Questa soluzione è meno efficiente dell'utilizzo diretto del metano, ma consente la separazione completa e l'eventuale confinamento dell'anidride carbonica. Un prototipo di questo tipo con combustione di idrogeno al 100% nella turbina a gas di un ciclo combinato, è stato progettato e realizzato da Enel ed esercito con successo a livello sperimentale [7], [8], [9], [10].

Se si introduce la tecnologia delle Fuel Cell integrata con un ciclo combinato gas vapore, il rendimento complessivo del sistema di generazione elettrica può arrivare a superare il 70% come mostrato nel bilancio energetico di figura 5.

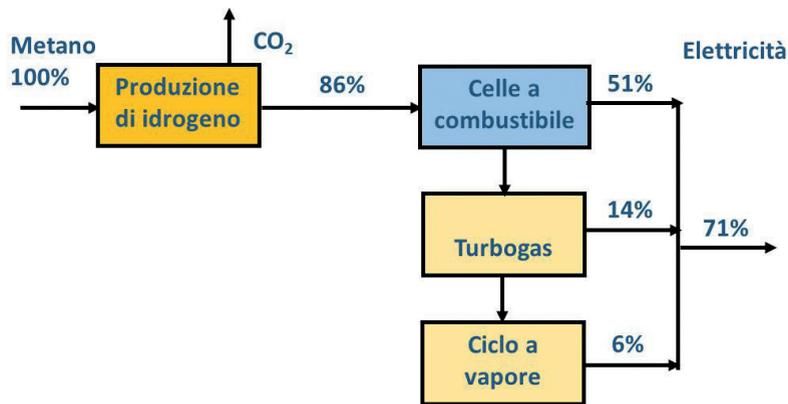


Figura 5 – Schema di un sistema di generazione a idrogeno integrato con Fuel Cell

Nel settore dei trasporti, l'idrogeno può contribuire in maniera significativa a migliorarne la sostenibilità ambientale. La tendenza nel campo degli autoveicoli è quella del passaggio all'auto elettrica con batterie, che al momento appare più conveniente in termini di costi e di efficienza energetica rispetto all'idrogeno. Tuttavia la produzione con elettrolisi avan-

Galileo n.1

zata con efficienze verso il 90% e l'uso delle celle a combustibile, può rendere l'idrogeno competitivo in questo settore, considerando la criticità ambientale dello smaltimento / riciclo parziale delle batterie. Per quanto riguarda la parte del trasporto relativa ai mezzi pesanti e in particolare a quello marino, caratterizzato da grandi potenze e dalla necessità di elevate autonomia, l'idrogeno rappresenta in prospettiva la soluzione più idonea.

Impieghi attuali e futuri dell'idrogeno

L'attuale consumo annuo di idrogeno a livello mondiale è di circa 120 milioni di tonnellate, di cui 74 utilizzato come idrogeno puro principalmente per la produzione di ammoniaca e nel settore della raffinazione e 45 miscelato con altri gas principalmente per la produzione di metanolo e nel settore siderurgico (tabella 2)

| Tipo di utilizzo | Mt/anno |
|---------------------------------|---------|
| Idrogeno puro | 74 |
| Idrogeno miscelato ad altri gas | 45 |
| Totale | 119 |

Tabella 2 – Tipologie di utilizzo dell'idrogeno a livello mondiale (fonte Eni 2018)

Attualmente l'uso dell'idrogeno è in larga misura destinato alle applicazioni industriali. I quattro impieghi principali, sia in forma pura che miscelata, riguardano la raffinazione del petrolio (33%), la produzione di ammoniaca (27%), la produzione di metanolo (11%) e la produzione dell'acciaio attraverso la riduzione diretta del minerale di ferro (3%) [11].

| | Mt/anno | % |
|-------------|---------|------|
| Metano | 57,12 | 48% |
| Petrolio | 35,7 | 30% |
| Carbone | 23,8 | 20% |
| Elettrolisi | 2,38 | 2% |
| Totale | 119 | 100% |

Tabella 3 – Produzione annua di idrogeno per fonti (fonte Irena)

La produzione dell'idrogeno (tabella 3) deriva in massima parte da fonti fossili e solo in una piccola frazione dall'elettricità attraverso l'elettrolisi. L'intera produzione annua equivale a circa 360 Mtep, poco più del 2% del consumo energetico globale.

Si tratta di una quota abbastanza limitata del fabbisogno energetico mondiale, tuttavia il suo consumo cresce dal 1990 del 2,8% medio all'anno. Un tasso di crescita non trascurabile, comunque non sufficiente a sostenere le applicazioni previste negli scenari energetici.

Si ritiene che nel breve e nel medio termine aumenti la domanda di ammoniaca e metanolo, mentre, relativamente agli impieghi energetici distribuiti, la maggior opportunità a breve termine ap-

pare quella di miscelare l'idrogeno nelle reti esistenti di gas naturale. Nel 2030 un uso fino a 4 Mt di idrogeno per riscaldare le abitazioni può derivare dalla miscelazione in basse concentrazioni che aiuta a ridurre le emissioni.

A lungo termine la produzione di acciaio e di calore ad alta temperatura offrono un vasto potenziale per la domanda di idrogeno a basse emissioni. A lungo termine sarà tecnicamente possibile produrre tutto l'acciaio primario con idrogeno, ma questo richiederà una grande quantità di elettricità di tipo rinnovabile o low-carbon di circa 2500 TWh/anno, che rappresenta il 10% della generazione globale di elettricità ad oggi) [11].

Per quanto riguarda i trasporti marini e aerei, essi hanno limitate alternative per combustibili low-carbon e rappresentano una opportunità per combustibili a base di idrogeno. Questi offrono particolari vantaggi per l'aviazione (nella forma di combustibili sintetici) e per le navi (stoccati sotto forma di ammoniaca), settori dove è più difficile usare direttamente idrogeno o elettricità [11].

Un impiego ambientalmente sostenibile dell'idrogeno presuppone la sua produzione attraverso l'elettrolisi a partire da fonti rinnovabili. Nello scenario di lungo termine si può ipotizzare un consumo dell'ordine di 3000 – 5000 TWh all'anno di elettricità, che rappresenta circa il 20% del consumo attuale a livello mondiale.

La penetrazione delle fonti rinnovabili, che hanno una disponibilità fortemente aleatoria, dovranno essere integrate con sistemi di accumulo, per consentire la dispacciabilità dell'elettricità prodotta. L'accumulo energetico sarà quindi fondamentale in questo contesto e sarà effettuato utilizzando diverse tecnologie in funzione della potenza necessaria e della durata del rilascio, che è legata alla energia accumulata.

Le diverse tecnologie di accumulo sono confrontate, in funzione di questi due parametri, nella figura 6, da cui emerge come per elevate capacità di accumulo, anche associate a lunghi tempi di rilascio, l'idrogeno rappresenta la soluzione più idonea.

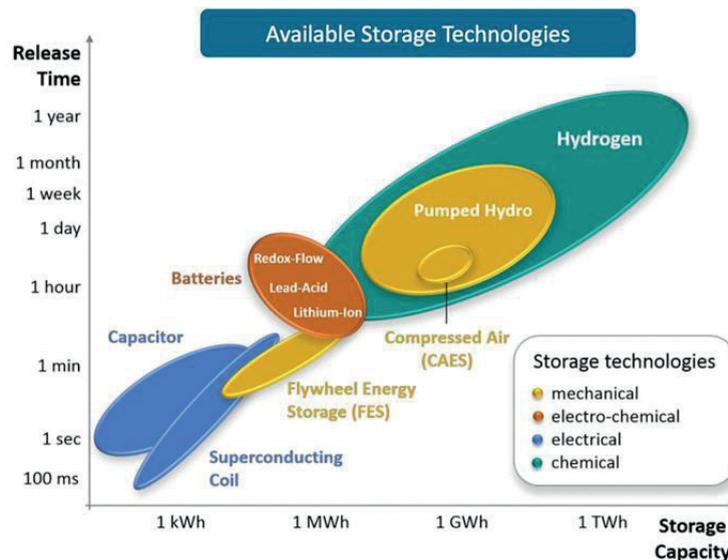


Figura 6 – Confronto tra le diverse tecnologie di accumulo energetico (fonte JoiScientific 2018)

Galileo n.1

Dal grafico emerge che il più agguerrito concorrente dell'idrogeno rappresentato dalle batterie, ha potenze e capacità associate dell'ordine dei MWh, mentre l'accumulo a idrogeno consente capacità oltre il TWh. Questo configura un futuro caratterizzato da un impiego delle batterie soprattutto nella generazione distribuita, mentre si userà l'idrogeno per l'accumulo nei grandi impianti di potenza a fonte rinnovabile, come ad esempio le centrali eoliche. I grandi poli di generazione rinnovabile diventeranno così Hub di produzione di idrogeno che potranno fornirlo a tutte le applicazioni di questo combustibile Carbon free.

Per quanto riguarda lo scenario nazionale, SNAM [12] prevede una crescita significativa dell'impiego dell'idrogeno, negli anni che vanno da oggi al 2050, come contributo agli obiettivi europei e italiani previsti dalla transizione energetica (figura 7)

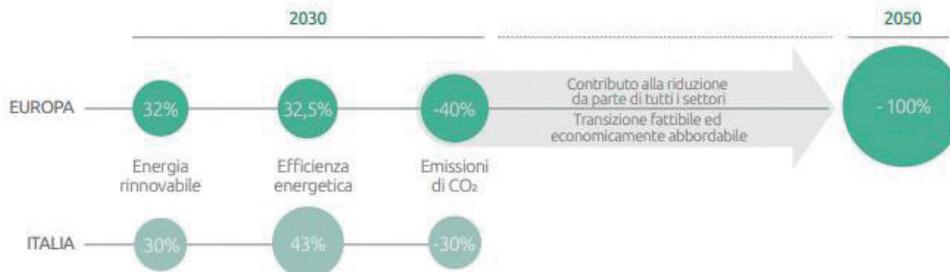


Figura 7 - Obiettivi europei e italiani al 2030 e al 2050 (fonte "Clean Energy for all Europeans"; "EU Climate Long-term Strategy 2050"; "PNIEC")

La crescita ipotizzata da SNAM di utilizzo dell'idrogeno in ambito nazionale, mostra una forte penetrazione dell'idrogeno, pur in presenza di un contenimento dei consumi energetici (figura 8)

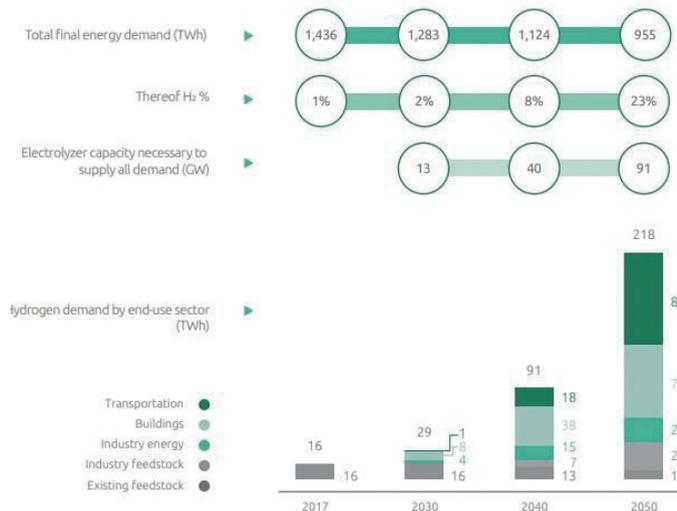


Figura 8 - Evoluzione della domanda di idrogeno in Italia al 2050 in differenti settori (fonte: Snam, 2019, "The Hydrogen Challenge")

Una parte significativa del fabbisogno di idrogeno sarà prodotta attraverso l'installazione di nuovi processi di elettrolisi alimentati ad energia rinnovabile.

Concludendo, sulla base delle considerazioni, è prevedibile negli anni che ci separano dal 2050, in cui il programma dell'Unione Europea (PNIEC) si propone l'eliminazione totale delle emissioni da fonti fossili, l'idrogeno diventi una componente rilevante nel sistema energetico italiano ed europeo.

Referenze

1. IEA "World Energy Outlook 2020", October 2020
2. IEA "The Future of Hydrogen, Seizing today's opportunities", June 2019
3. Marco Carcassi "Linee guida per la definizione di un piano strategico per lo sviluppo di un vettore energetico idrogeno" Università di Pisa, 2004
4. James E. Funk "Thermochemical hydrogen production: past and present" Elsevier, March 2001
5. F. Donatini, F.; Gigliucci, G.; Schiavetti, M. "Darwin project Use of renewable energy and Hydrogen on a sailing boat" Clean Electrical Power, 2007. ICCEP '07
6. F. Donatini, M. Schiavetti, R. Gabbrielli, G. Gigliucci, A. La Mendola, "Environmental performances of residential Fuel Cell CHP systems under various energy distribution scenarios", Clean Air Journal, Paper No 64-03, 2003
7. M. Balestri, G. Benelli, F. Donatini, F. Arlati, G. Conti "Enel's Fusina hydrogen-fed power generation plant", 2007 International Conference on Clean Electrical Power, IEEE, Capri (Italy) 2007
8. F. Donatini, M. Schiavetti, G. Gigliucci, P. Gheri, M. Monticelli, R. Mangione. A. Paulozza and J. Riccardi, "CFD Simulation and Experimental Tests on a Natural Gas/Hydrogen Mixture-Fired Flameless Combustor", ECCOMAS 2005, Lisboa.
9. G. Gigliucci, F. Donatini, M. Balestri, C. Zappacosta "Hydrogen-fed Gas Turbine with Steam Injection and Co-Generation", PowerGen Europe 2005, Milan.
10. G. Gigliucci, F. Donatini, M. Schiavetti, "Technical And Economic Analyses of a Hydrogen-Fed Gas Turbine with Steam Injection and Co-Generation", International Hydrogen Energy Conference and Exhibition 2005, Istanbul.
11. A. Costa "Il futuro dell'idrogeno", ALDAI Federmanager, Gruppo Progetto Innovazione SNAM "Alla ricerca della nuova energia", 2019