



Rendiconti  
Accademia Nazionale delle Scienze detta dei XL  
*Memorie e Rendiconti di Chimica, Fisica,  
Matematica e Scienze Naturali*  
141° (2023), Vol. IV, fasc. 1, pp. 127-134  
ISSN 0392-4130 • ISBN 978-88-98075-55-3

# Idrogeno: un combustibile pulito e rinnovabile per la transizione energetica

ALESSANDRO ABBOTTO

Dipartimento di Scienza dei Materiali dell'Università di Milano-Bicocca  
E.mail: [alessandro.abbotto@unimib.it](mailto:alessandro.abbotto@unimib.it) • ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0165-5581>

**Abstract** – Hydrogen is the most abundant element in the universe. However, on earth, hydrogen is not present in its molecular form  $H_2$  except in traces but is always found combined in molecules, including water, ammonia, and hydrocarbons. Hydrogen is an extremely versatile “material”. It can be used as a feedstock, as a fuel and as an energy carrier and storage. In recent years it has attracted the attention of the scientific, political, and economic world for what probably remains its main and fascinating characteristic: unlike traditional fuels, hydrogen does not generate  $CO_2$  through combustion but water.

In recent years, environmental emergencies have led to important decisions and programs at an international level. A key role has been assigned by EU to hydrogen, as outlined in the European «Hydrogen Strategy» in 2020. With this plan the EU aims to promote the production of clean hydrogen, to contribute to the reduction of greenhouse gas emissions. Recent geopolitical tensions have further brought to the attention the role of this energy carrier.

The sectors involved in the emerging applications of hydrogen are many and varied, from transport to heavy industry and the residential sector.

This paper will focus attention on the present and future use of hydrogen in the field of transport, which alone is responsible for a quarter of all emissions. The main uses will be presented (some of which are already underway), outlining a key role for the hydrogen energy carrier in the sustainable mobility of the future society.

**Keywords:** Affordable and clean energy, transport, fuel, renewable, water, sun

## 1. Introduzione

L'idrogeno è l'elemento più abbondante dell'universo, del quale rappresenta tre quarti dell'intera materia. È l'elemento principale delle stelle e del pianeta più grande del Sistema Solare, Giove. Sulla Terra invece, se ci riferiamo alla superficie, è *solo* il quarto elemento più abbondante (come numero di atomi), dopo ossigeno, silicio e alluminio. L'elemento idrogeno non è presente nella sua forma molecolare se non in tracce ( $< 0.0001\%$ ), ma lo si trova sempre combinato in molecole, tra cui naturalmente l'acqua, l'ammoniaca e gli idrocarburi (tra i quali il componente principale del gas naturale, il metano  $CH_4$ ), sostanze alle quali sono associati molto dei suoi utilizzi [1].

L'idrogeno è un "materiale" estremamente versatile. Può essere utilizzato come materia prima, come combustibile e come vettore e stoccaggio di energia. Le applicazioni sono anch'esse molteplici e vanno dall'industria chimica alle applicazioni emergenti, quali il trasporto o il *power-to-gas* (immagazzinamento di energia elettrica). Negli ultimi anni ha attirato l'attenzione del mondo scientifico, politico ed economico per quella che probabilmente rimane la sua principale caratteristica: a differenza dei combustibili tradizionali, l'idrogeno per combustione, ovvero per reazione con ossigeno, non genera CO<sub>2</sub>, ma acqua. Se la reazione viene svolta in aria - ovvero in presenza di azoto - vengono prodotte anche piccole quantità di ossidi di azoto (NO<sub>x</sub>).

Le emergenze ambientali hanno portato negli ultimi anni a importanti decisioni e programmi a livello internazionale, l'Agenda 2030 dell'ONU per lo sviluppo sostenibile del pianeta (2015) e l'accordo di Parigi (COP21, 2015) per limitare il riscaldamento globale a 1.5 °C rispetto ai livelli preindustriali. A fine 2019 la Commissione Europea, presieduta da Ursula von der Leyen, ha varato il Green Deal, il cui passaggio chiave è l'azzeramento delle emissioni nette di gas serra entro il 2050. Questi obiettivi sono stati più di recente ribaditi, con l'approvazione del Parlamento e del Consiglio Europeo nel 2023, nel pacchetto FIT FOR 55, un insieme di proposte per rivedere e aggiornare la legislazione dell'UE e per mettere in atto nuove iniziative con l'obiettivo di garantire che le politiche dell'UE siano in linea con gli obiettivi climatici concordati dagli organi europei. In particolare, FIT FOR 55 si riferisce all'obiettivo dell'UE di ridurre le emissioni nette di gas serra di *almeno* il 55% entro il 2030 [2].

Sulla scorta dei programmi europei, il governo italiano ha pubblicato, nel gennaio 2020, il Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC), che prevede il taglio del 55% delle emissioni di gas serra (rispetto ai livelli 1990), almeno il 32% di energia rinnovabile e almeno il 32.5% di incremento di efficienza energetica [3].

Nell'ambito di questi piani è stato assegnato all'idrogeno un ruolo chiave, delineato nella "Strategia dell'Idrogeno" europea, varata l'8 luglio 2020 [4]. Con questo piano l'UE mira a promuovere la produzione di idrogeno pulito nei suoi molteplici utilizzi, al fine di contribuire alla riduzione delle emissioni climalteranti. Il piano strategico europeo è solo uno dei tasselli sviluppati attorno all'idrogeno negli ultimi anni, che includono programmi di ricerca e sviluppo, *vision documents*, *roadmaps* e piani strategici nazionali. Nei prossimi anni sono attesi i piani strategici dell'idrogeno di molte altre

nazioni, tra cui l'Italia, che nell'autunno 2020, a opera del Ministero dell'Università e della Ricerca e del Ministero dello Sviluppo Economico, ha varato le linee guida preliminari [5].

L'idrogeno rappresenta una delle priorità di investimento del "Recovery Plan" europeo per la ripresa post-COVID che, tra lo stanziamento "Next Generation EU" (807 miliardi di euro) e il bilancio a lungo termine, ammonta a oltre 2000 miliardi di euro. In questo contesto la *hydrogen economy* contribuirà alla crescita economica e alla creazione di posti di lavoro.

## 2. Utilizzo dell'idrogeno

Oggi la produzione globale di idrogeno è di oltre 70 milioni di tonnellate all'anno. La produzione di idrogeno ha subito negli ultimi anni una crescita impressionante, passando dai meno di 20 milioni di tonnellate del 1975 ai 70 milioni di oggi (Fig. 1). I vari piani strategici internazionali prevedono per i prossimi anni una crescita annua del 2-3%, raggiungendo la quota 100 milioni tra soli 10-15 anni.

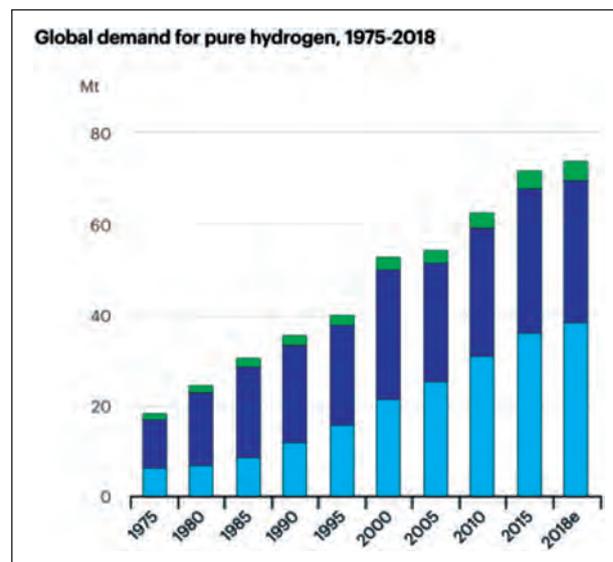


Fig. 1. Domanda mondiale di idrogeno dal 1975 al 2018 in milioni di tonnellate (azzurro: per la raffinazione del petrolio; blu: per la sintesi dell'ammoniaca; verde: altro) (Fonte: IEA (2019), *The Future of Hydrogen*, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>).

I principali usi attuali dell'idrogeno sono due: raffinazione del petrolio e sintesi dell'ammoniaca. Altri utilizzi non trascurabili comprendono la sintesi del metanolo, intermedio per l'industria chimica. In particolare, oggi, attraverso il processo Haber-Bosch, vengono prodotte

oltre 200 milioni di tonnellate di ammoniaca, utilizzata tal quale o in derivati azotati come fertilizzanti sintetici. Il processo Haber-Bosch utilizza idrogeno e azoto ad alte temperature e pressioni, consumando da solo quasi il 2% dell'energia globale ed emettendo circa 1.5% di tutte le emissioni di gas serra. È, quindi, evidente come la produzione sostenibile di ammoniaca sia al centro dei piani strategici internazionali.

### 3. Utilizzi emergenti: il trasporto

Ma sono gli utilizzi emergenti che oggi attirano l'interesse del mondo politico, economico e industriale e dell'opinione pubblica, grazie alla proprietà di reagire in modo pulito via combustione o per via elettrochimica. Nel secondo caso, il più interessante, l'idrogeno reagisce con ossigeno in un dispositivo elettrochimico – la “cella a combustibile” – producendo energia elettrica, calore e, come unico sottoprodotto, acqua (Fig. 2). Gli utilizzi emergenti comprendono l'uso come combustibile, come vettore di energia e come accumulatore di energia (*power-to-gas*). I settori coinvolti sono molteplici e variegati, dai trasporti all'industria pesante e all'ambito residenziale.

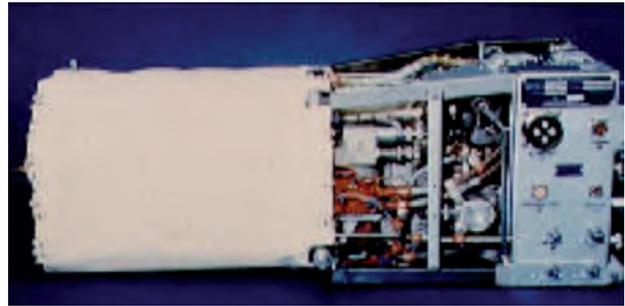


Fig. 2. Le celle a combustibile sono state sviluppate dalla NASA per l'esplorazione spaziale (in foto il sistema di generazione che ha fornito energia elettrica allo Space Shuttle) (Fonte: NASA).

Il campo dei trasporti è quello che richiama il maggior interesse non solo degli enti governativi, ma anche dei cittadini e dei mass media [6]. L'idrogeno è infatti un combustibile totalmente *carbon-free*. Va tuttavia subito chiaramente sottolineato che l'idrogeno è da considerarsi pulito o meno a seconda di come viene prodotto. L'utilizzo come combustibile richiede alcune considerazioni a livello di densità energetica (o volumetrica, Wh/L) ed energia specifica (o ponderale, Wh/kg) (Fig. 3).

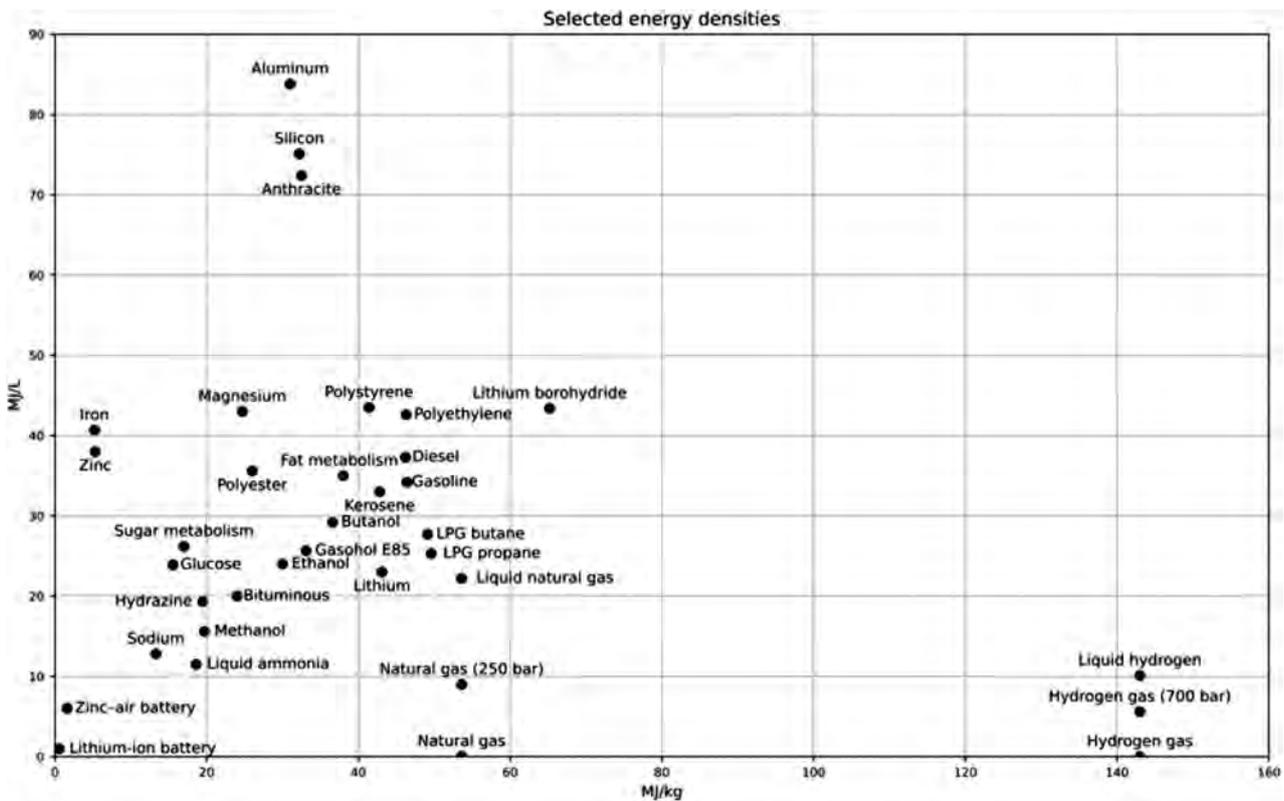


Fig. 3. Valori di densità energetica (o volumetrica, MJ/L) ed energia specifica (o ponderale, MJ/kg) di specie chimiche e dispositivi a base chimica impiegati nel settore energetico [7].

L'idrogeno ha un'elevata densità energetica ponderale, essendo una molecola estremamente leggera, ma è caratterizzato da una bassissima densità energetica volumetrica, essendo un gas (meno molecole per unità di volume rispetto a un liquido). Detto in altri termini, a parità di energia conservata l'idrogeno pesa molto meno, ma occupa volumi molto più grandi di altri vettori energetici. Per fare un confronto con il petrolio e i suoi derivati in fase liquida, l'idrogeno pesa circa un terzo ma occupa un volume oltre 3500 volte maggiore (a pressione atmosferica). Anche rispetto al gas naturale l'idrogeno a pressione atmosferica ha una densità di energia volumetrica uguale a un terzo (rapporto = 0.28) il che comporta che, a parità di volume di gas trasportato, corrisponde un terzo di energia (e quindi maggiori costi unitari).

È pertanto di fatto impossibile usare l'idrogeno in forma gassosa come combustibile in condizioni standard. Per dare l'idea, considerando che 1 kg di idrogeno consente circa 100 km di autonomia di un'automobile, nel volume a disposizione in una vettura sarebbe possibile stivare, a pressione atmosferica, idrogeno gassoso per poco più di 1 km di autonomia. Oggi i principali utilizzi nel campo del trasporto prevedono l'uso di idrogeno compresso a elevate pressioni, 700 bar per il trasporto leggero e 350 bar per il trasporto pesante. A 700 bar l'idrogeno occupa, a parità di energia, *solo* 7.6 volte il volume di un derivato del petrolio come la benzina.

Ancora meglio se si ricorre all'idrogeno in forma liquida, che occupa approssimativamente la metà del volume dell'idrogeno a 700 bar. In questo caso la densità energetica volumetrica dell'idrogeno scende a solo circa un quarto rispetto a quella del petrolio. L'idrogeno, tuttavia, diventa liquido a temperatura estremamente basse, -253 °C, particolarmente dispendiose dal punto di vista energetico da raggiungere e, soprattutto, da mantenere.

Pur in presenza di varie eccezioni anche significative (ad esempio, le flotte di veicoli commerciali e taxi, come Copenaghen, Berlino, Amburgo, Londra e, soprattutto, Parigi, che adesso conta oltre 500 vetture e adotta un modello a idrogeno come vettura ufficiale delle Olimpiadi del 2024 per gli spostamenti di atleti e organizzatori) l'uso dell'idrogeno per l'autotrasporto leggero non è competitivo con la modalità elettrica a batteria. La Fig. 4 mostra l'efficienza energetica *Tank-to-Wheels* (letteralmente, dal serbatoio alle ruote, ovvero la percentuale di energia trasferita al movimento dopo che è arrivata nella vettura), che sottolinea il primato della tecnologia a batteria. Tuttavia, la tecnologia a idrogeno rimane comunque più efficiente di quella a base di combustibili fossili, per non parlare del fatto che si tratta di una tecnologia

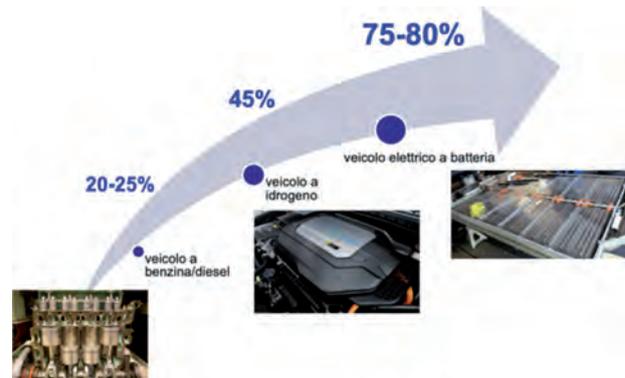


Fig. 4. Efficienza energetica *Tank-to-Wheels* ("dal serbatoio alle ruote") di tre diverse tecnologie disponibili per il trasporto leggero su strada.

pulita. Inoltre, consente già oggi autonomie superiori a 600 km e tempi di rifornimento inferiori a 5 minuti.

È comunque in altri settori dove l'idrogeno può diventare il combustibile sostenibile di riferimento, come nel trasporto pesante su strada, su rotaia, marittimo e aereo, ovvero in tutti quei comparti dove la tecnologia elettrica a batteria non risulta percorribile e dove le esigenze legate all'idrogeno – ad esempio grandi volumi – non rappresentano un impedimento.

L'ambito dei treni è uno dei più interessanti. La Commissione Europea riporta che oggi il 46% delle ferrovie non è elettrificato. Queste linee sono percorse oggi da treni diesel, spesso con parecchi anni di anzianità e pertanto molto inquinanti. Nell'autunno del 2018 è entrato in servizio in Germania, nella Bassa Sassonia, il primo treno a idrogeno al mondo, della francese Alstom, con un'autonomia di 1000 km (Fig. 5). Nel 2022 è terminato il periodo sperimentale e i treni a idrogeno sono adesso parte a tutti gli effetti del sistema ferroviario tedesco. Nel corso del biennio 2020-21 i treni a idrogeno sono stati introdotti anche in Austria, Polonia, Svezia e Francia. In Italia le prime vetture entreranno in servizio nel 2025 nella tratta Brescia-Edoia, in Lombardia, nell'ambito delle nuove infrastrutture previste per le Olimpiadi Milano-Cortina 2026.

Anche nel campo del trasporto pesante su strada l'idrogeno sta già presentando soluzioni mature. La Hyundai è partita a fine 2020 con le consegne in Svizzera dei primi TIR a idrogeno prodotti in serie ed entro il 2030 prevede di produrre alcune decine di migliaia di veicoli. La strategia dell'idrogeno coinvolge anche gli autobus, con molte città e paesi europei fortemente coinvolti. In Italia nell'estate del 2021 Bolzano ha inaugurato la propria flotta di bus a idrogeno per il trasporto



Fig. 5. Il primo treno a idrogeno al mondo (Germania, 2018) (Fonte: Alstom).

pubblico. Analoga decisione è stata presa più recentemente dal Comune di Bologna.

I programmi della Commissione Europea assegnano all'idrogeno un ruolo anche nel processo di decarbonizzazione del settore aereo e marittimo, inizialmente attraverso la produzione di combustibili sintetici e di bio-combustibili (già adatti agli attuali motori) e poi, a lungo termine, tramite l'accoppiamento di motori elettrici e celle a combustibile. Questo approccio richiede una completa riprogettazione dei motori e dei mezzi di trasporto. Il principale produttore al mondo, Airbus, ha in programma per il 2035 la prima flotta di aerei a idrogeno per il medio-lungo raggio (progetto ZEROe) (Fig. 6).

Una startup anglo-americana, ZeroAvia, ha già effettuato i primi test di volo con i suoi aerei elettrici a idrogeno e celle a combustibile e dichiara di commercializzare i primi motori a idrogeno per voli regionali entro il 2025-2027. La compagnia aerea easyJet ha recentemente annunciato che l'idrogeno rappresenta la tecnologia più promettente per raggiungere la decarbonizzazione del trasporto aereo. Eni, sempre nello stesso anno, ha annunciato un progetto di mobilità a idrogeno, incluso il trasporto aereo, in partnership con Air Liquide, per potenziare nel suo complesso la filiera dell'idrogeno in Italia.

Anche in campo marittimo gli esempi non mancano e alcuni di questi sono già operativi. Lungo i fiordi meri-

dionali della Norvegia nel 2021 è entrato in servizio il primo traghetto a idrogeno e successivamente il mercato si estenderà anche ad altri ambiti, tra cui quello delle navi da crociera, previsto nel 2024.

#### 4. Metodi di produzione dell'idrogeno: i colori dell'idrogeno

L'idrogeno che viene utilizzato per produrre energia è nella sua forma molecolare,  $H_2$ , che è praticamente assente come tale nella Terra. L'idrogeno molecolare deve quindi essere prodotto a partire dalle molecole che lo contengono, come metano ( $CH_4$ ) e acqua ( $H_2O$ ). L'idrogeno è un gas incolore, ma spesso ci si riferisce a esso con un colore che è associato al suo metodo di produzione. Questo approccio, pulito o meno, diventa di fondamentale importanza per definire l'impatto ambientale nell'intero ciclo di produzione e utilizzo dell'idrogeno. Esistono sostanzialmente due approcci per produrre idrogeno: da fonti fossili e da acqua via elettrolisi (Fig. 7).

Oltre il 96% dell'idrogeno è prodotto oggi direttamente da fonti fossili, principalmente gas naturale (metano). A questo metodo è associato il colore *grigio*. Si tratta, infatti, di un metodo a forti emissioni di gas serra. La quantità di  $CO_2$  che viene prodotta è, in peso, circa 10 volte la quantità d'idrogeno. Se si parte da carbone la



Fig. 6. Rendering di uno dei velivoli a idrogeno in progetto da parte di Airbus (copyright: Airbus).

quantità di gas serra prodotta per chilogrammo di idrogeno diventa addirittura quasi il doppio. Pertanto, tenendo conto dell'attuale produzione mondiale annuale, questo processo immette nell'ambiente quasi un miliardo di tonnellate di  $\text{CO}_2$ , una quantità enorme se si pensa che un paese come l'Italia ne produce complessivamente

una quantità di circa 300 milioni di tonnellate. Si noti che anche la produzione da elettrolisi è in gran parte non pulita, dipendendo dal mix energetico nella generazione di energia elettrica. Questo fa sì che, direttamente o indirettamente, l'idrogeno grigio in realtà arriva a oltre il 98% della produzione attuale.

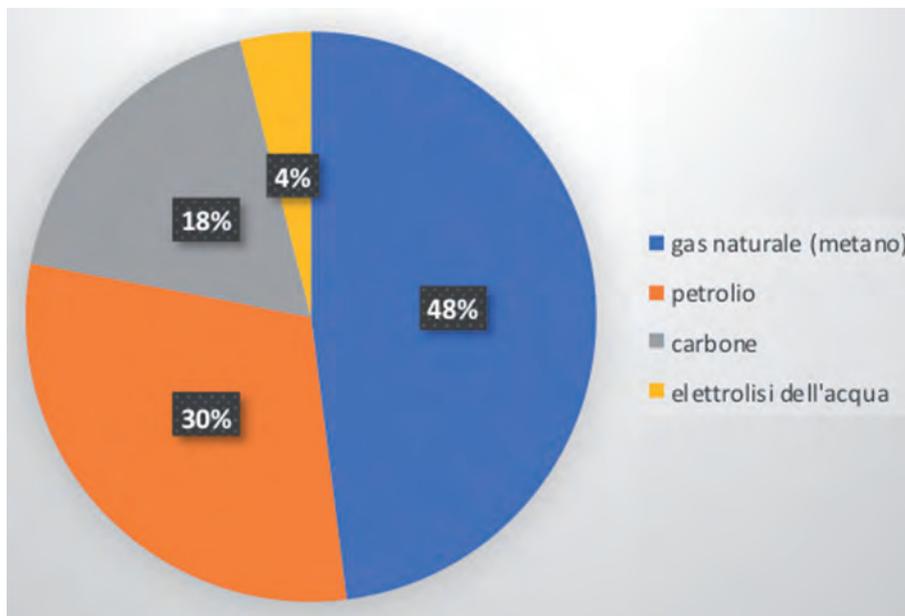


Fig. 7. Fonti di produzione idrogeno: 96% fonti fossili, 4% elettrolisi dell'acqua.

I piani strategici internazionali prima descritti prevedono la graduale sostituzione con altre tipologie di produzione. Nel breve-medio termine si punta all'*idrogeno blu*, il quale si differenzia da quello grigio per il fatto che la CO<sub>2</sub> prodotta viene catturata. È il metodo al quale stanno puntando per i prossimi anni molte imprese del comparto energetico ma, pur avendo una certa giustificazione nel transitorio perché limita l'emissione di gas ad effetto serra, non rappresenta una soluzione ottimale in quanto la cattura della CO<sub>2</sub> è un processo complesso e non sempre efficiente. Inoltre, ancora più importante, continua a tenere intrecciata la tecnologia dell'idrogeno alle fonti fossili, con tutto ciò che questo implica in termini di disponibilità, fluttuazioni di prezzo, tensioni internazionali e dipendenza dai paesi produttori.

Il terzo colore, l'*idrogeno verde*, è associato all'elettrolisi dell'acqua utilizzando energia elettrica da fonti rinnovabili. Dei metodi descritti è quindi l'unico pulito lungo l'intero ciclo di vita. I principali problemi legati alla produzione dell'idrogeno verde sono il costo, attualmente almeno 2-3 volte superiore a quello dell'idrogeno blu o grigio, e la disponibilità di energia elettrica rinnovabile per assicurare l'intera produzione.

Per quanto riguarda il primo punto Snam, la società attiva nel trasporto, stoccaggio e rigassificazione del metano in Italia, prevede che al 2030 il costo dell'idrogeno verde possa eguagliare quello dell'idrogeno grigio, grazie al ribasso del costo dell'elettricità da fonti rinnovabili e all'aumento delle fonti fossili [8]. La recente crisi energetica, e in particolare del gas naturale, e il rilancio delle fonti rinnovabili dovrebbe catalizzare questo processo.

Per quanto riguarda invece la disponibilità di elettricità da fonti rinnovabili è possibile effettuare alcune stime. Tenendo conto che il contenuto energetico di 1 kg di idrogeno LHV è di 33.3 kWh e ipotizzando un'efficienza media di conversione energetica degli elettrolizzatori alcalini del 65% (in realtà le nuove generazioni a membrana a scambio protonico, PEM, e a ossidi solidi, SOEC, consentono di raggiungere e superare l'80% di efficienza), si ricava che per produrre 1 kg di idrogeno è necessario utilizzare circa 50 kWh di energia elettrica. Pertanto, si stima che già da subito sarebbe possibile convertire in idrogeno verde il 10% della produzione mondiale con un fabbisogno di 350 TWh, corrispondente a meno del 5% della quantità di energia elettrica da fonti rinnovabili prodotta nel mondo nel 2020 (7500 TWh) e coincidente, per intenderci, con l'incremento di energia rinnovabile registrato nel corso del 2020 rispetto all'anno precedente. Un traguardo, quindi, a portata di mano. Anche per l'Italia si prevede che per convertire il

10% di produzione nazionale (480000 t/anno) all'idrogeno verde sono sufficienti 2.5 TWh/anno, corrispondenti a solo il 2% dell'attuale produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili.

Inoltre, è possibile sfruttare la sovrapproduzione di energia da fonti rinnovabili, ovvero l'energia prodotta in eccesso dovuta alle fluttuazioni orarie, giornaliere e stagionali delle fonti rinnovabili che, nei momenti di flessione della domanda, andrebbe persa. Solo in Italia Terna prevede, grazie al crescente ruolo di fotovoltaico ed eolico, un surplus al 2030 di 5 TWh, equivalente a un mese di produzione [9]. Questa quantità sarebbe da sola sufficiente per coprire il 20% dell'attuale produzione nazionale di idrogeno.

Naturalmente il discorso cambia se si vuole convertire in verde il 100% della produzione di idrogeno, a maggior ragione se si considera il previsto aumento della produzione legata agli utilizzi emergenti. In un recente commento su *Nature*, Armaroli e Barbieri hanno stimato che al 2030 la produzione nazionale di idrogeno, per rispondere alle esigenze dell'industria hard to abate (ad es. il polo industriale di Taranto) e alle richieste energetiche legate al trasporto e al riscaldamento, passerà da circa 500 kt/anno a 1630 kt/anno [10]. In tal caso per produrre il 100% di idrogeno verde sarà necessario utilizzare 85 TWh/anno, corrispondente al 30% dell'attuale produzione complessiva di energia elettrica in Italia. Per ottenere questa quantità aggiuntiva di elettricità verde sarebbe necessario installare 75 GW di potenza fotovoltaica, un obiettivo arduo; basta, infatti, pensare che complessivamente in Italia fino ad oggi sono stati installati solo 20 GW. Se da una parte è vero che le previsioni di potenza fotovoltaica installata sono sempre state largamente sottostimate, anche da organismi prestigiosi come la International Energy Agency [11], non vi è dubbio che per raggiungere questi target è necessaria nei prossimi anni una forte accelerazione delle nuove installazioni fotovoltaiche ed eoliche in Italia. Certamente, almeno fino al 2030, la produzione di idrogeno verde sarà limitata anche se, come abbiamo visto, obiettivi del 10% sono raggiungibili senza particolari difficoltà. La strategia europea dell'idrogeno mira a produrre nella UE 1 milione di tonnellate entro il 2024 e 10 milioni di tonnellate entro il 2030 di idrogeno verde.

Infine, esiste un altro metodo, probabilmente il più elegante e sostenibile di tutti dal punto di vista scientifico e tecnico: la fotosintesi artificiale. In questo caso l'idrogeno viene prodotto *direttamente* da acqua e Sole, senza il passaggio intermedio della generazione di energia elettrica, utilizzando dispositivi fotocatalitici o fotoe-

lettrocimici e opportuni materiali (antenne fotoattive e catalizzatori). Il concetto di base è semplice. Opportune antenne molecolari (che possiamo definire, in analogia al processo naturale, “clorofille artificiali”) catturano efficacemente la luce solare e innescano dei processi di trasferimento di elettroni che portano, con la mediazione di opportuni catalizzatori di reazione (ossidazione e riduzione dell’acqua), alla scissione dell’acqua nelle sue componenti, generando idrogeno e ossigeno. Nell’ottobre 2023 la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) ha inserito la produzione di idrogeno verde per via fotocatalitica tra le 10 Tecnologie Emergenti in Chimica del 2023 [12].

## 5. Conclusioni

Come abbiamo visto l’idrogeno rappresenta una risorsa estremamente versatile. Funge da materia prima (sintesi dell’ammoniaca), da combustibile (in celle a combustibile per la produzione di energia elettrica e calore) e da vettore e stoccaggio di energia elettrica (ad esempio per bilanciare offerta e domanda di elettricità da fonti rinnovabili). I settori di applicazioni sono molteplici e di primaria importanza, dall’industria pesante fortemente energivora ai trasporti.

Tutti i principali organismi internazionali e nazionali hanno inserito negli ultimi mesi l’idrogeno al centro delle strategie legate alle energie sostenibili. L’occasione per la crescita sostenibile dell’Europa è eccezionale, grazie ai fortissimi investimenti introdotti da “NextGenerationEU” e, in Italia, dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR). Ma è anche un’occasione unica, probabilmente irripetibile. Sfruttarla nel modo corretto è quindi quanto mai indispensabile. Una società sempre più elettrificata, con un ruolo crescente delle fonti rinnovabili, rimane la strada maestra. Ma dobbiamo tenere conto che oggi la domanda energetica si affida ai combustibili per tre quarti del suo fabbisogno. Quindi, almeno per i prossimi decenni e certamente per alcuni settori (ad esempio, il trasporto marittimo e aereo), dovremo ancora ricorrere ai combustibili per produrre energia. Qui entra in gioco l’idrogeno, un combustibile puli-

to e rinnovabile, nella misura in cui viene prodotto da acqua ed energia pulita (idrogeno verde).

In conclusione, elettrico e idrogeno sono alleati per una risposta vincente ed efficace per le esigenze presenti e future della nostra società. A questo riguardo diventa quanto mai essenziale mettere a punto le strategie più attente, sia per quanto riguarda le politiche relative all’idrogeno blu – una soluzione che non può che essere considerata solo transitoria – sia per quanto riguarda la ricerca e sviluppo di nuovi sistemi efficienti di generazione di idrogeno pulito (nuove generazioni di elettrolizzatori e di sistemi di fotosintesi artificiale), accompagnata da un deciso e rapido sviluppo delle fonti energetiche pulite, in particolare fotovoltaico ed eolico.

## NOTE BIBLIOGRAFICHE

- [1] Abboto, A. “Idrogeno. Tutti i colori dell’energia”, Edizioni Dedalo, Bari, 2021.
- [2] Abboto, A., Capriati, V. Abboto A., Capriati V., “La nuova chimica del XXI secolo. Rivoluzione verde e transizione ecologica”, Edizioni Dedalo, 2023.
- [3] Ministero dello Sviluppo Economico, “Piano Energia e Clima (PNIEC); 2020; <https://www.mise.gov.it/index.php/it/notizie-stampa/pniec2030>
- [4] Commissione Europea, “Strategia dell’Idrogeno”; 2020 ([https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-system-integration/hydrogen\\_en#eu-hydrogen-strategy](https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-system-integration/hydrogen_en#eu-hydrogen-strategy)).
- [5] Ministero dello Sviluppo Economico, “Strategia Nazionale Idrogeno. Linee Guida Preliminari”, 2020.
- [6] Abboto, A. “La mobilità elettrica. Storia, tecnologia, futuro”, Carocci editore, Roma, 2022.
- [7] Scott D., Energy density, Lithium-ion battery, Wikipedia (Public Domain).
- [8] Snam, “The hydrogen challenge: the potential of hydrogen in Italy”, 2019.
- [9] Terna, “Contesto ed evoluzione del sistema elettrico”, 2019.
- [10] Armaroli, N., Barbieri, A., “The hydrogen dilemma in Italy’s energy transition”, *Nature Italy, Comment*, 2021 (doi: <https://doi.org/10.1038/d43978-021-00109-3>).
- [11] IEA, “World Energy Outlook”, previsioni al 2020 contenute nei rapporti 2000 e 2010.
- [12] IUPAC, “Top Ten Emerging Technologies in Chemistry” (<https://iupac.org/what-we-do/top-ten/>).