



H₂ NELLA TRANSIZIONE ENERGETICA

L'idrogeno può essere usato per sostenere un sistema energetico rivoluzionario, capace di integrare le fonti rinnovabili e privo di emissioni di gas-serra, nella prospettiva di contenere il riscaldamento globale. Le celle a combustibile e gli elettrolizzatori rappresentano la chiave di volta di questo nuovo sistema energetico pulito, attualmente in fase di ricerca, sviluppo e implementazione.

L'idrogeno fu identificato come un elemento chimico a sé stante già nel lontano 1766 dallo studioso inglese Henry Cavendish. Quest'ultimo si rese conto che l'idrogeno era infiammabile e che il prodotto della sua combustione era nient'altro che la comune acqua. Già dai primi anni del 19° secolo il lavoro di pionieri quali William Nicholson and Anthony Carlisle dimostrò che era possibile usare l'energia trasportata dall'elettricità per scindere l'acqua nei suoi elementi costituenti: l'ossigeno e, appunto, l'idrogeno. Il cerchio venne chiuso già nel 1842, quando lo studioso gallese William Robert Grove riuscì ad ottenere corrente elettrica dalla reazione elettrochimica diretta fra idrogeno e ossigeno in una *batteria voltaica a gas*, l'antesignana delle moderne celle a combustibile [1]. A dispetto di questi precoci sviluppi, l'uso dell'idrogeno come combustibile termico o elettrochimico non ebbe molto successo nel quadro della Rivoluzione Industriale, vista l'abbondante disponibilità di combustibili fossili (ad esempio carbone e petrolio), molto economici e facili da trasportare ed utilizzare. Si segnala però che già nel 1875 il genio visionario dello scrittore francese Jules Verne aveva intravisto la possibilità di usare l'idrogeno per ottenere energia. Nel suo romanzo *L'isola misteriosa*, Verne fa dire a Cyrus Smith, uno dei protagonisti: "...io credo che l'acqua sarà un giorno adoperata come combustibile, che l'idrogeno e l'ossigeno che la compongono, adoperati da soli o simultaneamente, daranno una sorgente di calore e di luce inesauribile..." [2]. Oggi, nel 21° secolo, questa visione sta diventando realtà. Il riscaldamento globale è una delle maggiori minac-

ce per il nostro futuro, causando gravissimi danni alla salute umana, alle attività economiche ed all'ambiente naturale. Tale riscaldamento innalza notevolmente la frequenza di eventi climatici estremi (tra cui siccità ed inondazioni) e mette a repentaglio la biodiversità. Una delle cause principali del riscaldamento globale è l'aumento della concentrazione di gas-serra nell'atmosfera, con particolare riferimento alla CO₂ ottenuta bruciando combustibili fossili al fine di ottenere l'energia necessaria a sostenere lo stile di vita e lo sviluppo economico dell'umanità. Risulta quindi chiaro che ogni strategia che miri a combattere il riscaldamento globale deve implementare una massiccia ristrutturazione dell'intero sistema oggi utilizzato a livello globale per convertire e distribuire l'energia, rinunciando all'uso di combustibili fossili e puntando, invece, ad un massiccio sfruttamento delle cosiddette *fonti rinnovabili*, con particolare riferimento all'energia fornita da sole e vento. L'intera comunità internazionale è concorde nel riconoscere la necessità di far sì che il riscaldamento globale non superi i due gradi rispetto ai livelli pre-industriali per contenere i danni all'ambiente e garantire all'umanità un futuro sostenibile [3]. L'Unione Europea (UE) ha recentemente varato un ambizioso piano, noto come *Green Deal europeo*, che si propone di rendere il nostro continente a *impatto zero sul clima* entro il 2050 [4]. Il Green Deal europeo si articola in numerose azioni tese a ridurre le emissioni di gas-serra, investendo in tecnologie di avanguardia in numerosi campi fra cui l'efficientamento energetico, la mobilità e lo sviluppo sostenibile. Il Green Deal europeo ricopre un ruolo cruciale an-

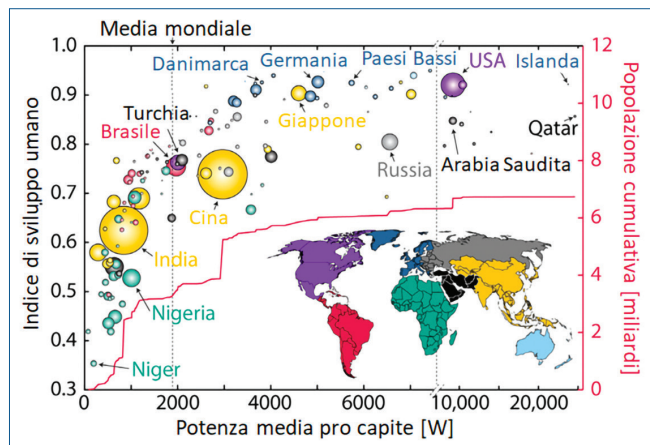


Fig. 1 - Sviluppo umano e utilizzo dell'energia. La sfida: implementare una politica sostenibile di sviluppo e crescita a livello nazionale e mondiale. La dimensione dei cerchi è proporzionale alla popolazione dello Stato corrispondente. (Per gentile concessione del prof. Plamen Atanasov, Università della California, Irvine, USA)

che e soprattutto perché si propone di dimostrare per la prima volta nella storia dell'umanità che è possibile:

- disaccoppiare il grado di sviluppo di una società dalla quantità di energia pro capite consumata;
- sostenere la crescita economica ricorrendo a tecnologie pulite.

Questi risultati, già di per sé molto importanti a livello europeo, si propongono anche di tracciare una nuova strada per guidare la crescita dei Paesi in via di

sviluppo (Fig. 1), con particolare riferimento alle giovani superpotenze economiche del 21° secolo, come la Cina e l'India. In futuro, l'elevata popolazione di tali Stati, molto superiore a quella dell'intera UE, avrà infatti un peso cruciale nel determinare l'impatto dell'umanità sull'ambiente. È, dunque, fondamentale garantire a tutti gli Stati la possibilità di raggiungere un elevato standard di vita ed economico (Fig. 1) senza ripetere gli errori, gli sprechi e i danni all'ambiente che sono stati inflitti negli ultimi due secoli durante la crescita degli attuali *Paesi sviluppati* (fra cui figurano tra gli altri l'UE, gli Stati Uniti ed il Giappone).

Dal punto di vista tecnologico (Fig. 2), l'idrogeno rappresenta una delle soluzioni più promettenti per realizzare la transizione energetica da attuare nell'ambito del Green Deal europeo. L'idrogeno è un ottimo vettore per l'energia nel quadro più ampio della cosiddetta *economia dell'idrogeno* [5]. L'energia prodotta da fonti rinnovabili, con particolare riferimento a quelle intermittenti e non programmabili (fra cui figurano proprio quella solare e quella eolica) può, infatti, essere utilizzata per scindere l'acqua, producendo idrogeno. Quest'ultimo può poi essere immagazzinato per lunghi periodi di tempo prima di essere utilizzato per produrre l'energia necessaria al momento del bisogno, ricorrendo, ad esempio, ad una cella a combustibile. L'idrogeno può anche essere utilizzato per ab-

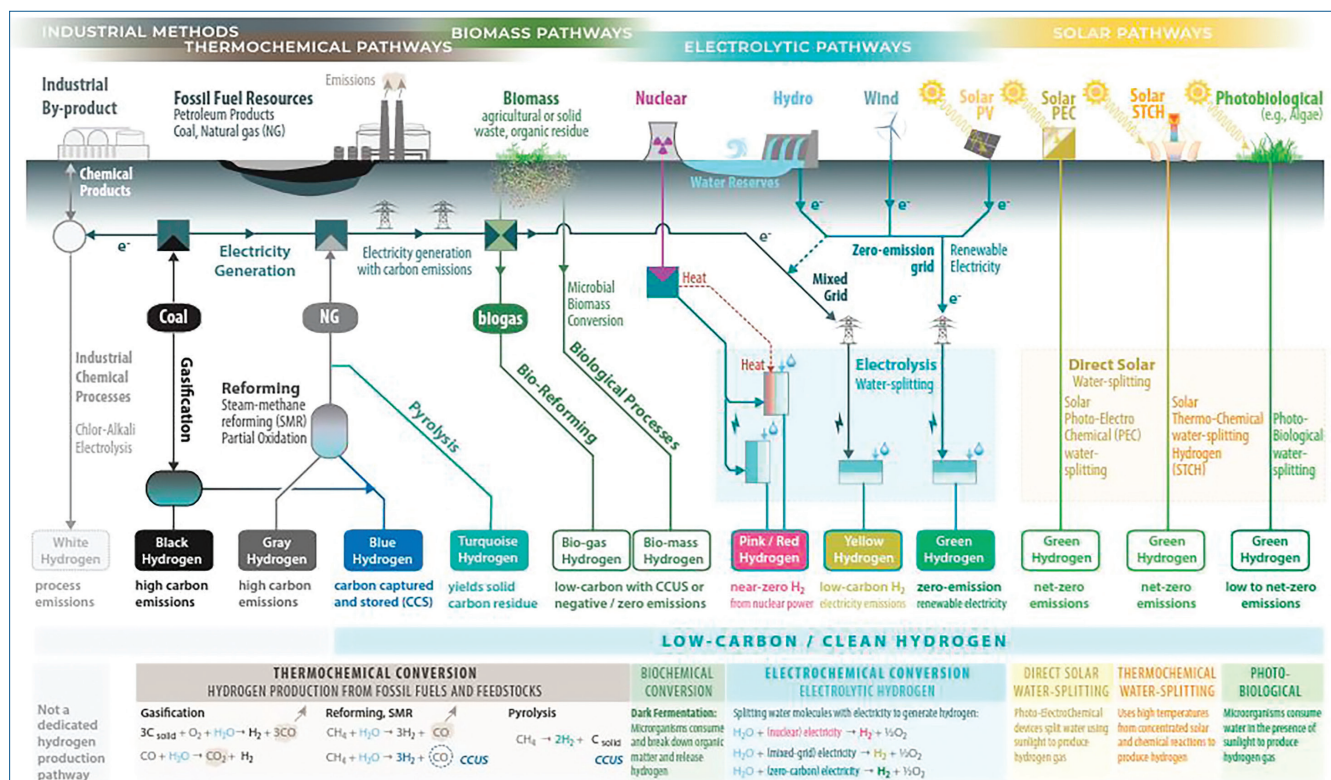


Fig. 2 - Panoramica sulle varie metodologie con cui l'idrogeno viene prodotto. A ciascuna metodologia produttiva corrisponde un certo "colore" dell'idrogeno. Riprodotta con permesso da [7]/IOP Publishing, Ltd.



battere le emissioni di gas-serra prodotte da numerose attività economiche, fra cui, ad esempio, l'industria siderurgica e numerose industrie chimiche [6]. L'idrogeno presenta numerose proprietà di notevole interesse applicativo. Per prima cosa, nel momento in cui l'idrogeno viene impiegato per ottenere energia, esso non rilascia CO₂ nel punto di utilizzo. Un kg di idrogeno contiene la stessa energia di 3,7 L di benzina, e con esso:

- i) un'automobile può percorrere circa 100 km;
- ii) è possibile coprire il fabbisogno energetico di una normale abitazione per 1-2 giorni.

Una bombola capace di contenere 1 kg di idrogeno pesa circa 20 kg ed occupa un volume pari a circa 25 L. Ad oggi, la produzione di 1 kg di idrogeno costa fra i 2 ed i 10 euro, a seconda del processo utilizzato. Quest'ultimo risulta di importanza cruciale per valutare l'impatto ambientale dell'idrogeno prodotto [7].

Tradizionalmente, l'idrogeno veniva prodotto mediante processi termochimici (Fig. 2) basati sull'utilizzo di combustibili fossili quali il carbone ed il gas naturale (*idrogeno nero/grigio*) e che rilasciavano nell'atmosfera grandi quantità di CO₂. Tali approcci, sebbene ben noti e consolidati, risultano del tutto inutili nel quadro della transizione energetica anche nel caso in cui la CO₂ prodotta venga sequestrata nel sottosuolo (*idrogeno blu*). È inoltre possibile produrre idrogeno utilizzando l'energia nucleare (*idrogeno rosa*). Sebbene la produzione di tale idrogeno non dia luogo ad emissioni di gas-serra, ad oggi non è ancora del tutto chiaro se l'impatto ambientale associato sia accettabile, con particolare riferimento alle problematiche relative al ciclo di vita della centrale e alla gestione delle scorie. Di notevole interesse risulta, invece, la produzione di idrogeno mediante processi che non danno luogo ad emissioni di gas-serra (Fig. 2), fra cui:

- i) la scissione dell'acqua da parte di agenti biologici;
- ii) la scissione foto-elettrochimica dell'acqua;
- iii) la scissione termochimica dell'acqua;
- iv) l'elettrolisi dell'acqua utilizzando l'energia elettrica ottenuta da fonti rinnovabili (soprattutto solare ed eolica).

L'*idrogeno verde* prodotto mediante questi ultimi processi gioca il ruolo più importante nella transizione energetica (Fig. 2).

Ad oggi, a livello internazionale, sono in atto sforzi considerevoli per abbattere i costi associati alla produzione di *idrogeno verde*. Si segnala l'iniziativa "Energy Earthshot - Hydrogen Shot™" promossa dal Dipartimento dell'Energia del Governo degli Stati

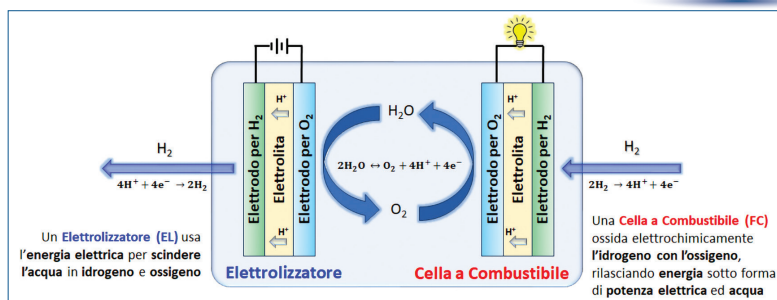


Fig. 3 - Celle a combustibile ed elettrolizzatori, le chiavi di volta dell'economia dell'idrogeno

Uniti [8], che si propone di arrivare a produrre 1 kg di *idrogeno verde* al costo di 1 dollaro entro il 2031. Nel caso in cui questa iniziativa avesse successo, il costo dell'idrogeno diverrebbe competitivo rispetto a quello dei combustibili tradizionali (con particolare riferimento alla benzina). Si sottolinea anche che la densità energetica dell'idrogeno immagazzinato in bombole di ultima generazione a pressione di 700 bar (circa 6-7 MJ/kg) è molto superiore rispetto a quella delle più avanzate batterie al litio (attorno a 0,7-1 MJ/kg), promuovendo ulteriormente la diffusione di veicoli alimentati da celle a combustibile ad idrogeno. A tutt'oggi, le tecnologie necessarie ad utilizzare l'idrogeno in numerose applicazioni (fra cui l'autotrazione, la produzione domestica di energia e l'industria chimica) stanno maturando rapidamente, rendendo possibile una loro implementazione pratica fra il 2025 ed il 2040.

Le due tecnologie che rappresentano la chiave di volta dell'*economia dell'idrogeno* e, più in generale, di un massiccio impiego dell'idrogeno nelle attività economiche sono gli elettrolizzatori e le celle a combustibile (Fig. 3). Gli elettrolizzatori consumano energia elettrica per scindere l'acqua nei suoi componenti fondamentali, l'idrogeno e l'ossigeno. Le celle a combustibile mettono invece in atto il processo opposto: ricombinano in maniera controllata l'idrogeno e l'ossigeno ottenendo energia elettrica e, come scarto, esclusivamente acqua. Il funzionamento di celle a combustibile ed elettrolizzatori non produce gas-serra. Si sottolinea come le celle a combustibile funzionino mediante processi elettrochimici; pertanto, la loro efficienza di conversione energetica (fino a circa il 60%) è molto più alta rispetto a quella delle tecnologie tradizionali che sfruttano invece il calore ottenuto bruciando combustibili fossili quali il carbone e la benzina (qui l'efficienza pratica supera raramente il 20-25% anche in condizioni ideali). Celle a combustibile ed elettrolizzatori sono caratterizzati dalla medesima struttura di base, che comprende uno strato di elettrolita che si frappone tra due elettrodi planari (Fig. 3). All'inter-

faccia tra ciascun elettrodo e l'elettrolita si trova uno strato di elettrocatalizzatore (Fig. 4). Quest'ultimo promuove lo specifico processo elettrochimico che ha luogo all'elettrodo in questione, innalzando l'efficienza di conversione dell'intero dispositivo.

Esistono numerose famiglie di celle a combustibile ed elettrolizzatori, che si distinguono sulla base dei materiali funzionali utilizzati e della temperatura di esercizio [9]. Sistemi operanti ad alta temperatura (tipicamente fra i 600 ed i 1000 °C) presentano notevoli limitazioni dal momento che:

- i) devono essere di grandi dimensioni per operare in modo efficiente;
- ii) dopo un numero molto limitato di accensioni/spegnimenti si danneggiano irreparabilmente.

Sistemi operanti a bassa temperatura (Fig. 4) risultano, invece, molto più compatti e di utilizzo assai più flessibile, capace di adattarsi facilmente al profilo energetico in ingresso (ad esempio, in elettrolizzatori collegati a fonti intermittenti di energia rinnovabile) o alle necessità contingenti di un utente (ad esempio, in celle a combustibile per autotrazione). Il cuore della maggior parte delle moderne celle a combustibile ed elettrolizzatori è il cosiddetto *assemblaggio membrana-elettrodo* (MEA) (Fig. 4); in esso, una sottile membrana di elettrolita polimerico separa due elettrodi porosi coperti da opportuni materiali elettrocatalizzatori. Vi sono due grandi famiglie di celle a combustibile/elettrolizzatori a bassa temperatura:

- i) sistemi basati su membrane a scambio protonico, efficienti e durevoli, ma che richiedono l'utilizzo di elettrocatalizzatori comprendenti metalli nobili quali platino ed iridio;
- ii) sistemi basati su membrane a scambio anionico, che non richiedono l'uso di metalli preziosi, ma

che comprendono membrane ancora primitive e di scarsa durabilità.

Ad oggi, la ricerca è molto attiva per sviluppare celle a combustibile/elettrolizzatori a bassa temperatura capaci di superare le limitazioni appena descritte e di centrare gli ambiziosi obiettivi necessari all'implementazione pratica della transizione energetica. Alcuni di tali obiettivi sono, ad esempio [10]:

- i) ridurre il costo di un elettrolizzatore a 100 €/kW;
- ii) riuscire a sviluppare una cella a combustibile capace di produrre almeno 8 kW per grammo di metallo nobile impiegato negli elettrocatalizzatori.

L'UE sta approfondendo sforzi cospicui per promuovere l'uso su vasta scala dell'idrogeno nell'economia, nei trasporti e nel settore energetico. La Commissione coordina numerose istituzioni e programmi comunitari sull'idrogeno. Tra essi spicca la *Clean Hydrogen Partnership* [5], che coinvolge sia enti produttivi (nel partenariato *Hydrogen Europe - HE*) che istituzioni di ricerca (nell'ambito della rete *Hydrogen Europe Research - HER*). A tutt'oggi viene data un'alta priorità allo sviluppo dell'infrastruttura dell'idrogeno, con un massiccio innalzamento della capacità produttiva dell'*idrogeno verde*; si prevede che quest'ultima raggiungerà entro il 2030 la quota di 10 milioni di tonnellate annue [11]. L'UE sta anche ricorrendo ad altri strumenti per favorire l'applicazione pratica transnazionale delle tecnologie basate sull'idrogeno, fra cui gli *Importanti Progetti di Comune Interesse Europeo - IPCEI*. La ricerca europea sull'idrogeno è coordinata da reti quali HER e la *European Energy Research Alliance - EERA* [12], che si propongono di coprire tutti i vari aspetti della transizione energetica includendo tematiche non solo tecnologiche, ma anche sociali. In questo quadro gli Stati membri dell'UE forniscono un

importante contributo, mettendo in campo cospicue risorse (dell'ordine di 5-15 miliardi di euro per Stato fino al 2030) per lo sviluppo dell'economia dell'idrogeno.

Anche l'Italia sta facendo la sua parte in questo settore, mettendo in campo risorse ricavate dal Piano Nazionale di Resistenza e Resilienza (PNRR) [13] e che ammontano a non meno di 4 miliardi di euro fino al 2026 solo per implementare la filiera di produzione e distribuzione dell'idrogeno. L'Italia sta anche rimuovendo le barriere che ostacolano l'implementazione pratica dell'economia dell'idrogeno, ad esempio proponendo una certificazione specifica per l'*idrogeno verde*, sviluppando l'infrastruttura di riforni-

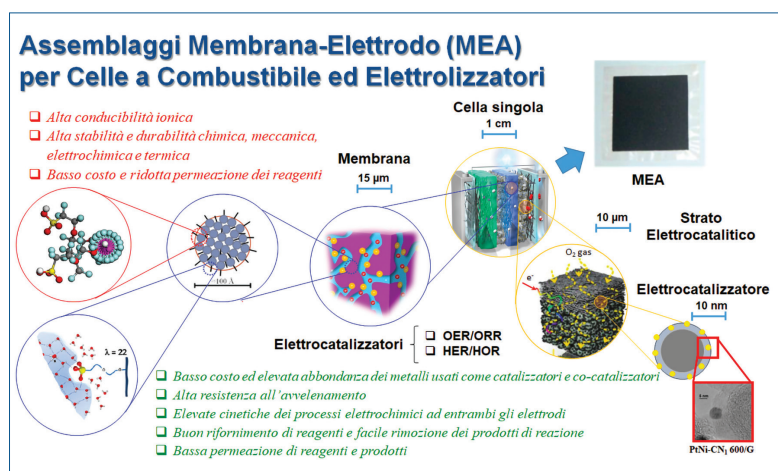


Fig. 4 - Caratteristiche principali degli assemblaggi membrana-elettrodo (MEA) e dei loro componenti funzionali



mento a idrogeno e promuovendo la collaborazione strategica fra i diversi progetti di *hydrogen valleys*. La ricerca sull'idrogeno in Italia è in grande fermento, con numerosi progetti finanziati con fondi ottenuti sia dall'UE (progetti Horizon Europe o sostenuti da altri enti europei come ad esempio EIT Raw Materials) che da enti nazionali (progetti PNRR, FISR e PRIN), senza dimenticare l'importante ruolo delle Regioni. Questi sono tempi interessanti: la vita di tutti noi sta andando incontro a mutamenti continui e radicali. Grazie all'idrogeno potremo però sperare che alcuni di tali cambiamenti ci possano portare a un futuro migliore, lasciando in eredità ai nostri figli un mondo in cui il benessere e lo sviluppo possano coesistere con la salvaguardia del nostro ambiente.

Ringraziamenti

Lo sviluppo ed il consolidamento del gruppo di ricerca *Chemistry of the Materials for the Metamorphosis and the Storage of Electrochemical Energy* è stato possibile anche grazie ai finanziamenti ricevuti da numerose istituzioni, fra le quali si citano la Commissione Europea (nell'ambito della Graphene Flagship e del progetto Upscaling ALPE sostenuto da EIT Raw Materials), il Ministero dell'Università e della Ricerca (che ha finanziato svariati progetti PRIN e FISR) e l'Università di Padova (con progetti PRAT e progetti strategici come MAESTRA).

Inoltre, si ringraziano i colleghi: Prof. Nicolas Alonso-Vante, Prof. Plamen Atanassov, Dr. Sylvain Brimaud, Prof. Marian Chatenet, Prof. Gerard Gebel, Prof. Steve Greenbaum, Dr. Steve Hamrock, Dr. Greg Haugen, Prof. Andy Herring, Prof. Klaus-Dieter Kreuer, Prof. Pawel Kulesza, Prof. Werner Lehnert, Prof. Sanjeev Mukerjee, Prof. Stephen Paddison, Prof. Peter Pintauro, Dr. Adam Weber, Prof. Thomas Zawodzinski, Prof. Piotr Zelenay e molti altri.

Un particolare ringraziamento va ai collaboratori: Prof. Enrico Negro, Prof.ssa Ketì Vezzù, Dr. Gioele Pagot, Dr. Giuseppe Pace e Dr. Angeloclaudio Nale, e a tutti gli studenti, borsisti e assegnisti che hanno contribuito alle citate attività di ricerca.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Oxford Dictionary of National Biography, <https://www.oxforddnb.com/display/10.1093/ref:odnb/9780198614128.001.0001/odnb-9780198614128-e-11685;jsessionid=770A55DF81FB78253D7966897D9386B2>, ultimo accesso 19 luglio 2023.
- [2] J. Verne, "L'isola Misteriosa", parte seconda -

L'abbandonato, vol. 4, cap. Ed. Guigoni, 1890, cap. 11, pag. 13.

- [3] Consequences of Climate Change, https://climate.ec.europa.eu/climate-change/consequences-climate-change_en, ultimo accesso 19 luglio 2023.
- [4] A European Green Deal, https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en, ultimo accesso 19 luglio 2023.
- [5] European Partnership for Hydrogen Technologies, https://www.clean-hydrogen.europa.eu/index_en, ultimo accesso 19 luglio 2023.
- [6] F. Ausfelder, A. Bazzanella, Hydrogen in the Chemical Industry, in *Hydrogen Science and Engineering: Materials, Processes, Systems and Technology Industrial Utilization of Hydrogen*, J. Wiley, New York, 2016, 19.
- [7] A. Kusoglu, *Interface ECS*, 2021, **30**(4), 44.
- [8] Hydrogen Shot, <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-shot>, ultimo accesso 19 luglio 2023.
- [9] B. Hossain, R. Islam *et al.*, *J. Energy Storage*, 2023, **62**, 106842.
- [10] Hydrogen and Fuel Cell Technologies office, <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-and-fuel-cell-technologies-office>, ultimo accesso 19 luglio 2023.
- [11] Key actions of the EU Hydrogen Strategy, https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen/key-actions-eu-hydrogen-strategy_en, ultimo accesso 19 luglio 2023.
- [12] European Energy Research Alliance, <https://www.eera-set.eu/>, ultimo accesso 19 luglio 2023.
- [13] Italia Domani, il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza, <https://www.italiadomani.gov.it/it/home.html>, ultimo accesso 19 luglio 2023.

H₂ in the Energy Transition

Hydrogen can be used to sustain a revolutionary energy system, capable of integrating renewable sources and free from greenhouse gas emissions, in the perspective to mitigate global warming. Fuel cells and electrolyzers are the cornerstone of this new clean energy system, that is currently under research, development and implementation.