

GRUPPO DI LAVORO IDROGENO
PRIME INDICAZIONI per una
STRATEGIA ITALIANA RICERCA IDROGENO (S I R I)

(OTTOBRE 2020)



Ministero dell'Università e della Ricerca

SOMMARIO

1	Contesto Europeo	3
2	Contesto italiano	4
3	Visione e ambizioni	5
4	Partnership	5
5	Strumenti e Iniziative di Coordinamento.....	6
6	Strategia Italiana Ricerca Idrogeno.....	6
6.1	Produzione di “Idrogeno pulito”	6
6.1.1	Elettrolisi e sistemi elettrochimici integrati	6
6.1.2	Altre tecnologie di produzione di idrogeno	8
6.1.3	L’idrogeno per sistemi energetici “verso 100% da fonti rinnovabili” Errore. Il segnalibro non è definito.	
6.2	Trasporto, stoccaggio e distribuzione dell’idrogeno a basso costo	9
6.2.1	Sistemi di trasporto, stoccaggio e reti di distribuzione.....	9
6.2.2	Stazioni di rifornimento di idrogeno a basso costo	12
6.3	Usi finali	12
6.3.1	Mobilità a idrogeno pulita e competitiva	13
6.3.2	Applicazioni stazionarie e cogenerazione per l’ambiente costruito	16
6.3.3	Produzione di energia elettrica.....	16
6.3.4	Applicazioni industriali.....	17
6.4	Cross-cutting.....	17
6.4.1	Formazione e pubblica consapevolezza.....	17
6.4.2	Sicurezza, ricerca pre-normativa	17
6.4.3	Formazione ed educazione	17
6.4.4	Tutela della proprietà intellettuale.....	18

1 Contesto Europeo

Nel Luglio 2020 la Commissione Europea ha definito la **strategia Europea per la transizione ad un sistema energetico decarbonizzato**¹ considerando la produzione ed uso su larga scala di idrogeno tra gli aspetti prioritari. Il documento strategico presentato dalla Commissione Europea pone l'attenzione sulla produzione e l'uso di idrogeno verde, ma considera anche altre forme di idrogeno necessarie alla transizione. Il documento rappresenta un riferimento necessario rispetto al quale individuare le specificità dell'Italia su cui puntare per una strategia nazionale, seppur integrata con quella Europea.

La roadmap indicata prevede che tra il 2020 ed il 2024 siano installati in Europa 6 GW di elettrolizzatori per produrre idrogeno con energia rinnovabile, producendo 1 Mt di H₂ verde che sostituisca quello attualmente in uso nel settore chimico, facilitando anche l'introduzione del vettore idrogeno in altri settori industriali e per la mobilità sostenibile. In questa fase è prevista la creazione consistente di cluster locali di H₂ e "Hydrogen Valleys". La seconda fase (2025-2030) prevede 40 GW di elettrolizzatori e 10 Mt di H₂ verde per estenderne l'applicazione al settore acciaio e alla mobilità pesante (TIR, navi, treni). Nella terza fase, oltre il 2030 l'obiettivo per l'idrogeno rinnovabile è quello di raggiungere la maturità per essere applicato su larga scala. Gli investimenti previsti fino al 2030 sono dell'ordine di 24-42 miliardi di euro per gli elettrolizzatori, di 220-340 miliardi di euro per connettere la produzione di energia rinnovabile ed altri 160-200 miliardi di euro per gli utilizzi nei settori applicativi.

La **Strategia su Ricerca e Innovazione**² (SRIA) della Clean Hydrogen for Europe Partnership è articolata in sette obiettivi strategici e tre attività orizzontali con obiettivi di crescita dal 2 al 14% al 2050. I tre pillar in cui è strutturata la roadmap sono (i) produzione, (ii) stoccaggio, trasporto e distribuzione e (iii) usi finali. La SRIA riporta dettagliate analisi e previsioni per ognuno degli obiettivi strategici, come obiettivi della partnership rispetto a quanto realizzato da FCH2-JU.

Secondo questa SRIA nel periodo 2020-2030 i principali settori di maturità sono quelli relativi alla mobilità sostenibile, alle applicazioni industriali nei settori chimico e siderurgico ed alle applicazioni in edilizia per la produzione di calore ed energia elettrica. Sono in fase di validazione le applicazioni degli elettrolizzatori per il bilanciamento della rete, il power-to-gas, l'immissione di H₂ nella rete gas (blending con gas naturale) e l'accumulo su base giornaliera e stagionale del surplus di energia rinnovabile. Altri campi importanti di validazione riguardano l'utilizzo delle fuel cell in sistemi CHP e Micro CHP (combined heat and power) e la produzione di idrogeno da gassificazione dei rifiuti solidi urbani (idrogeno circolare).

Dal punto di vista degli obiettivi di ricerca, nel programma quadro Horizon Europe (2021-2027) sono state definite le priorità da diversi gruppi di lavoro declinati nei seguenti argomenti principali:

Produzione: RM01 – Electrolysis, RM02 - Other modes of production, RM03 - Role of electrolysis

Accumulo e distribuzione: RM04 - Bulk storage, RM05 - Gas grid, RM06 - Liquid carriers, RM07 - Non gas grid distribution, RM08 - Key technos for distribution

Usi finali:

- Applicazioni nei trasporti: RM09 – HRS, RM10 - Building blocks, RM11 - Trucks and large vans, RM12 Waterborne, RM13 - Aviation, RM14 – Rail, RM15 – Coaches
- Applicazioni industriali: RM17 - Turbines and burners, RM18 - H₂ in Industry
- Applicazioni in edilizia: RM16 - Stationary FC

Cross-cutting: RM19 - Cross-cutting, RM20 - Supply chain, RM21 - H₂ Valleys,

Le istituzioni di ricerca italiane (CNR, ENEA, FBK, numerose Università) sono membri di Hydrogen Europe, e sono attive in progetti di ricerca in tutti questi settori.

Il documento di riferimento per la **realizzazione della dorsale europea della rete di distribuzione dell'idrogeno**³ è stato elaborato dai principali gestori europei delle reti di trasporto e stoccaggio del gas:

¹ Communication COM/2020/301: A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe

² Strategic Research and Innovation Agenda, Clean Hydrogen for Europe, July 2020

³ European Hydrogen Backbone – EHB

Enagás-Spagna, Energinet-Danimarca, Fluxys-Belgium, Gasunie-Olanda, GRTgaz-Francia, NET4GAS-Repub.Ceca, OGE-USA, ONTRAS-Germania, Snam-Italia, Swedegas-Svezia, Teréga-Francia. Nel documento viene delineata la strategia di sviluppo per il trasporto del nuovo vettore energetico che nel 2030 si estenderà per 6800 Km connettendo le hydrogen valley europee. Tale rete è destinata a espandersi nel 2040 fino a raggiungere una lunghezza complessiva di almeno 23.000 km, con un investimento totale stimato tra 27 e 64 miliardi di euro. In particolare, tali investimenti dovrebbero coprire le spese di riconversione a idrogenodotti di parte delle reti gas esistenti (per il 75% della estensione totale della dorsale europea dell'idrogeno) e alle spese di realizzazione di nuovi idrogenodotti di interconnessione (per il restante 25 % dell'estensione della rete EHB). Si prevedono costi di trasporto dell'idrogeno, nella suddetta dorsale europea EHB, compresi tra 0,09 e 0,17 € per Kg di idrogeno trasportato ogni 1000 km. Nella riconversione dei gasdotti a idrogenodotti, alla stessa pressione di esercizio nominale di 85 bar, si prevede di usare i diametri delle condotte esistenti di 48 pollici con una potenza equivalente trasportata in idrogeno di 13 GW e un diametro di 36 pollici per una potenza trasportata di 7 GW. EHB è una iniziativa aperta a tutti gli operatori.

La dorsale italiana regionale dell'Idrogeno entro il 2030 verrà sviluppata a partire da alcuni clusters industriali nel sud Italia (Sicilia e Puglia). Si prevede una graduale espansione della rete verso nord, con l'obiettivo al 2040 di attraversare tutta la penisola e permettere collegamenti transnazionali con interconnessione a sud con il nord Africa e a nord con l'Austria e la Svizzera.

Il **piano decennale per lo sviluppo dell'infrastruttura Europea del gas**⁴, pur rimarcando l'importanza della transizione verso il gas naturale, sottolinea la necessità di effettuare la decarbonizzazione del gas, aumentando sia la produzione di energia rinnovabile, che di biometano ottenuto da CO₂ (power-to-gas), con l'idrogeno visto nel lungo termine (2050) come vettore energetico.

2 Contesto italiano

Il documento **H₂ ITALY 2050**⁵ per primo delinea una filiera nazionale dell'idrogeno in ottica di decarbonizzazione della nazione. Nel documento viene evidenziato che nel 2050 l'idrogeno sarà in grado di soddisfare un quarto della domanda finale di energia, previsione confermata anche dalla Commissione europea che stima tale percentuale tra il 18% e il 24%. Un punto saliente dello studio è che grazie alla sua importante rete di trasporto nazionale e di interconnessione con altri Paesi, l'Italia può candidarsi a diventare un hub europeo dell'idrogeno e in particolare agire come "ponte" tra l'Europa e il continente africano.

Il documento osserva che lo sviluppo della filiera dell'idrogeno riguarda un ampio spettro di tecnologie, con diversi livelli di maturità industriale. Pertanto, l'Italia potrebbe adattare o riconvertire molte competenze manifatturiere, tecnologiche e scientifiche per lo sviluppo della filiera idrogeno.

Il **Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC)**⁶, nella versione pubblicata nel Gennaio 2020 dal MISE, ha come obiettivi la decarbonizzazione e l'uso di energie rinnovabili. Nell'ambito del PNIEC, l'Idrogeno ha un ruolo interlocutorio e principalmente di prospettiva. È altresì vero che il PNIEC è stato rilasciato nel Dicembre 2019, prima degli eventi COVID-19 e del lancio della politica di Green Deal che la Commissione Von Der Leyen ha varato a Luglio 2020, in cui l'idrogeno ha acquisito un ruolo significativo nel mosaico di processi e tecnologie per la transizione energetica e la decarbonizzazione.

Il tema idrogeno è presente in 33 citazioni, e collegato soprattutto agli argomenti della decarbonizzazione dei settori industriali ad alta intensità energetica e dei trasporti commerciali a lungo raggio.

L'idrogeno è indicato nel piano tra i gas rinnovabili ("biometano, metano sintetico e a tendere idrogeno"), in prospettiva nel settore trasporti (ma ridotto, attorno all'1%, principalmente in miscela con gas naturale, per il 2030), tra le tecnologie di accumulo ("da impiegarsi a fini di accumulo o immissione nelle reti gas, anche

⁴ Ten-Year Network Development Plan (TYNDP) – ENTSOG & ENTSOE (Luglio 2020)

⁵ H2 ITALY 2050 Una filiera nazionale dell'idrogeno per la crescita e la decarbonizzazione dell'Italia. SNAM e The European House – Ambrosetti.

⁶ PNIEC, specificità e possibile ruolo futuro per idrogeno

previa metanazione") ed in subordine ad altre ("Potranno quindi essere investigate anche altre possibili soluzioni di stoccaggio che prevedano l'utilizzo dei vettori energetici alternativi quali l'idrogeno"). Nel PNIEC non viene quindi identificato un ruolo primario all'idrogeno, ma come soluzione integrativa o stadio intermedio (Power to Gas) ad altri vettori o sistemi di stoccaggio. Riguardo alla filiera dell'idrogeno viene indicato che "occorre innanzitutto investire in ricerca e sviluppo".

Il PNIEC riprende alcuni degli obiettivi più rilevanti della strategia della commissione europea nel settore idrogeno. Tuttavia, le valutazioni quantitative del PNIEC sembrano discostarsi dalla strategia europea in questo campo. È chiaro che le tecnologie ad idrogeno richiedono ancora ampi sforzi di Ricerca e Sviluppo, ma le tecnologie sono sufficientemente mature per impieghi più vasti da un punto di vista quantitativo se sostenuti da appropriati incentivi.

3 Visione e ambizioni

Una strategia italiana per la ricerca sull'idrogeno deve avere obiettivi in sinergia con la strategia europea "A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe", con le azioni relative al Green Deal europeo, con le azioni del Recovery Plan, con le attività previste in ambito Horizon Europe (HE) e, in particolare, con le partnerships relative a Clean Hydrogen for Europe e Clean Energy Transition e Built4People⁷.

Tuttavia, una Strategia Italiana per la Ricerca sull'Idrogeno deve considerare le specificità del paese e le sue opportunità, tenendo conto dei vari gap esistenti. In particolare, lo sviluppo scientifico-tecnologico deve adottare strumenti che favoriscano la creazione di sinergie, interazioni interdisciplinari e incremento della massa critica, attraverso la creazione, ad esempio, di reti di laboratori e infrastrutture di ricerca e deve essere in grado di promuovere la più efficace collaborazione con le industrie italiane nel settore.

Sebbene un piano per l'idrogeno in Italia debba anche considerare aspetti di transizione, una strategia per la ricerca sulla filiera dell'idrogeno deve anche avere una prospettiva a più lungo termine e quindi puntare agli aspetti relativi alla produzione, stoccaggio/trasporto ed utilizzo di H₂ verde (o senza emissione di CO₂), per contribuire in modo importante al processo di decarbonizzazione.

In sintesi, una strategia di ricerca per l'Italia deve quindi puntare ai seguenti obiettivi:

- potenziare la competitività dei prodotti della ricerca italiani e le probabilità di successo nei bandi competitivi europei (Horizon Europe);
- essere in sinergia con le iniziative dell'industria italiana e delle amministrazioni locali, per incrementare il trasferimento dei risultati della ricerca;
- incrementare le risorse destinate ai vari settori di ricerca e sviluppo riguardanti l'idrogeno, ed in particolare alla ricerca di base, per colmare il divario con gli altri paesi europei.

4 Partnership

I ricercatori italiani partecipano attivamente alle varie associazioni europee ed internazionali (Hydrogen Europe, Mission Innovation etc.). In Italia, l'associazione italiana Idrogeno e Celle a combustibile (H2IT) unisce imprese, università, centri di ricerca e altri portatori di interesse attivi sia nella ricerca che nella produzione di componenti e sistemi a idrogeno. Sarebbe tuttavia auspicabile avere un'associazione (o altra iniziativa) nazionale nel settore specifico della ricerca, in grado di mettere a sistema le strutture, le attività e i progetti condotti dagli EPR controllati dal MUR e dalle Università.

Tra le grandi iniziative europee, particolare rilevanza ha la partnership pubblico-privata Clean Hydrogen for Europe, derivazione diretta di FCH2 JU. Tuttavia, esistono altre numerose partnership nelle quali l'idrogeno ha acquistato un ruolo centrale, quali Clean Energy Transition Partnership (CETP), P4Planet, Clean Steel, Waterborn, 2ZERO, Transform EU Rail e Clean Aviation. Nuove Partnership sono state programmate per il 2024 quali SUNERGY che, sebbene ancora in fase di definizione, affronta tematiche legate alla generazione di H₂ (specie tramite l'uso di energia solare) e alla sua conversione sia per generare specifici carriers (ad esempio, ammoniacale) che per l'utilizzo industriale. Notevole interesse per lo sviluppo delle applicazioni

⁷ Strategic Research and Innovation Agenda, Built4People, September 2020

rivestono gli usi finali in edilizia, previsti per esempio dalla partnership Built4People – people-centric sustainable built environment. Sono anche auspicabili, oltre alle iniziative sopra ricordate, iniziative di partnership bi o tri-laterali a livello nazionale.

5 Strumenti e Iniziative di Coordinamento

Programma strategico dedicato

Creare un programma strategico integrato sulla filiera idrogeno, con sottoprogetti che riescano ad affrontare in maniera interdisciplinare e con ampio TRL (da 2 a 6) la possibilità di creare sinergie, collaborazione e massa critica, è una condizione necessaria per sopperire al gap presente attualmente tra la ricerca in Italia (a causa della mancanza di finanziamenti specifici, specie su tematiche di tipo più fondamentale) e quella europea.

E' auspicabile la formulazione di un piano strategico nazionale nel settore idrogeno alla stessa stregua dei programmi europei (es. FCH JU) con un workplan, indicatori ed obiettivi specifici (come peraltro esiste in Germania ed in Francia) per facilitare un'ampia partecipazione delle entità nazionali e la messa a sistema delle attività di ricerca nel settore. Ciò potrà facilitare la creazione di laboratori congiunti con le industrie e la creazione di spin off e start up.

Cluster Tecnologico Nazionale H2

I cluster nazionali sono tra le possibilità, ma occorre un cambiamento per renderli più aperti e competitivi, per realizzare gli obiettivi sopra delineati.

Grande Infrastruttura di ricerca distribuita

Creare una rete di laboratori, capace di mettere a sistema l'esistente sia in termini di capacità che di strumentazione, può essere una strategia vincente, se adeguatamente supportata da finanziamenti e da una governance adatta allo scopo. È opportuno creare delle facilities nei centri che hanno già un elevato livello di specializzazione favorendo un'ampia accessibilità sulla base di programmi condivisi.

6 Strategia Italiana Ricerca Idrogeno

6.1 Produzione di "Idrogeno pulito"

6.1.1 Elettrolisi e sistemi elettrochimici integrati

6.1.1.1 *Visione 2030*

La diffusione su larga scala dei sistemi di produzione dell'idrogeno pulito (H₂ verde) è legata alla riduzione dei costi dei sistemi di elettrolisi, al miglioramento dell'efficienza di conversione ed alla disponibilità di potenza elettrica da RES (Renewable Energy Sources) ad un costo competitivo e in quantità significativa e non alternativa alle altre esigenze di elettrificazione degli usi finali. Esiste un potenziale di produzione RES che può essere sfruttato a questo riguardo. La produzione di serie e in taglia significativa, il miglioramento della durabilità e dell'affidabilità degli elettrolizzatori, la riduzione dei costi operativi e di investimento sono necessari per garantire gli obiettivi europei di raggiungere costi di produzione dell'idrogeno verde ad alta purezza (5N) inferiori a 2-3 €/kg. L'integrazione efficace e diretta dei sistemi elettrochimici con i sistemi di produzione di energia rinnovabile rappresenta un obiettivo importante sia nell'ottica di produrre in maniera integrata direttamente vettori di H₂ (es. NH₃) in ambiti geografici/temporali differenziati rispetto a quelli di utilizzo che nell'ottica della produzione ed accumulo locale di H₂ per uso temporalmente sfalsato.

6.1.1.2 *Ricerca di base (TRL 2-3)*

Lo sviluppo e l'impiego di nuovi materiali, di nuove tecnologie e di nuovi processi, lo studio del riciclo a fine vita dei componenti sono azioni prioritarie per ridurre l'impatto, i costi e aumentare la vita utile di tutte le tecnologie di elettrolisi. Un ottimale comportamento dinamico del sistema di elettrolisi è anche fondamentale per il bilanciamento di rete. Lo sviluppo di soluzioni innovative per lo sfruttamento dell'O₂ generato è una necessità per ridurre i costi ed aumentare l'efficienza. Le priorità di ricerca sono di seguito elencate:

- per gli elettrolizzatori alcalini (AEL):

Sviluppare un design dello stack più compatto senza materiali critici, migliorare l'efficienza, raggiungere un'elevata densità di corrente con ridotte perdite ohmiche, facilitare il management di soluzioni caustiche concentrate (7 M KOH), migliorare la purezza dell'idrogeno prodotto e il comportamento dinamico.

- per gli elettrolizzatori PEMEL:

Ridurre il contenuto di metalli preziosi (Ir, Pt) nei catalizzatori e sviluppare catalizzatori privi di materiali critici; sviluppare membrane ed elettroliti nuovi / avanzati. Sostituire i piatti bipolari a base di titanio (recentemente incluso nella lista EU 2020 dei critical raw material) con metalli meno costosi e più facilmente lavorabili o sviluppare coating innovativi per mantenere le stesse caratteristiche di resistenza alla corrosione.

- per gli elettrolizzatori SOEL:

Sviluppare nuovi elettroliti ceramici operanti a temperature più basse e catalizzatori nanostrutturati; sviluppo di sistemi efficienti e stabili operanti ad alta pressione, diminuire i costi attraverso la riduzione dei materiali critici in particolare di terre rare, di Co etc. Ridurre le temperature di funzionamento dagli attuali 750-800 °C a 600 °C per migliorare la resistenza alla corrosione, la durata e l'impiego di acciai ferritici a basso costo. Migliorare il comportamento dinamico in particolare la stabilità ai cicli redox e termici. Sviluppare celle reversibili per la poligenerazione (fuel, elettricità e calore di alta qualità) e per applicazioni power-to-X-to-power. Sviluppare la gestione termica e dei flussi di massa nei sistemi di co-elettrolisi per la produzione di syngas e successiva conversione.

- Tecnologie emergenti

Sviluppare processi di elettrolisi a membrana polimerica a scambio anionico (AEMEL) ed elettrolisi ceramica a conduzione protonica (PCCEL). Indagare sulla possibilità di elettrolisi dell'acqua non pura. Sviluppare hydrogen pumps polimeriche per la compressione elettrochimica ad alta efficienza. Sviluppare materiali e dispositivi innovativi di fotoelettrolisi o fotoelettrocatalitici, basati su materiali non critici, per la conversione diretta di energia solare in idrogeno o carrier di idrogeno. Mettere a punto tecnologie innovative come la produzione di idrogeno mediante sono-fono-catalisi dell'acqua (energia solare + sollecitazione meccanica a ultrasuoni).

6.1.1.3 Ricerca Industriale e Sviluppo (TRL 3-5)

Per lo sviluppo industriale di nuovi prodotti basati sulle tecnologie e i processi già validati sono necessarie attività di ricerca orientate al perseguimento di obiettivi diversificati:

- Incremento dell'efficienza e robustezza dello stack;
- Semplificazione del BoP per rendere il sistema più economico e facilmente interfacciabile alla rete elettrica
- Scaling up di stack e sistemi produttivi, messa a punto di tecnologie di lavorazione adeguate alla realizzazione di elettrolizzatori di alta potenza;
- Sviluppo di componenti innovativi per ottimizzare e ridurre le perdite e i costi;
- Sviluppo di strumenti di monitoraggio, diagnostica e controllo degli elettrolizzatori;
- Sviluppo di stack ad alta pressione al fine di ridurre/evitare la successiva fase di compressione;
- Sviluppo di sistemi reversibili (electrolysis/fuel cell) e co-elettrolisi (syngas);

6.1.1.4 Dimostrazione (TRL 5-7)

La fase di dimostrazione dovrebbe prevedere il perseguimento dei seguenti obiettivi:

- Dimostrazione di tecnologie di elettrolisi di grande potenza (multi-MW) che soddisfino target di costo, performance, durata, dinamicità e impiego dell'idrogeno negli usi finali (es. HRS, P2G, industria etc.);
- Sviluppo di processi di automazione della produzione e di controllo della qualità;
- Dimostrazione di impianti di elettrolisi direttamente alimentati da RES e per il bilanciamento della rete.

6.1.2 Altre tecnologie di produzione di idrogeno

6.1.2.1 Visione 2030

La produzione di H₂ da fonti rinnovabili intermittenti ha il limite della discontinuità, di tempi di funzionamento limitati e l'aumento dei costi. Per un utilizzo su larga scala, la filiera idrogeno va integrata con produzioni alternative per esigenze continue di utilizzo, in particolare in campo industriale, la generazione di idrogeno deve essere realizzata secondo le linee di seguito indicate:

- da combustibili fossili abbinata a sistemi di cattura della CO₂ prodotta (Carbon Capture and Sequestration - CCS): "Idrogeno blu";
- da metano via pirolisi, ovvero scissione del CH₄ in H₂ e carbone, (Idrogeno turchese);
- da altre tecnologie che possono anche utilizzare fonti fossili ma senza emissioni nette di CO₂ (CCS) come gassificazione di biomasse e/o rifiuti solidi o l'utilizzo di plasma non termico (in alternativa alla gassificazione);
- mediante elettrificazione del processo catalitico di steam reforming di gas naturale con energia elettrica rinnovabile,
- mediante conversione di sostanze organiche di scarto via microrganismi (biotecnologie), reforming catalitico in fase acquosa (APR), gassificazione in acqua supercritica (SCWG);
- mediante uso diretto di energia solare con fotocatalizzatori, foglie artificiali, sistemi tandem, e sistemi che utilizzano luce solare concentrata (CSP) abbinata a cicli termodinamici e a processi di chemical looping;
- da scissione dell'acqua mediante l'effetto combinato e sinergico di sollecitazioni meccaniche (ultrasuoni) e radiazione solare coadiuvata da fotocatalizzatori o tramite la combinazione di magnetismo e elettrocatalisi. In generale, la combinazione di aree scientifiche diverse risulta promettente per sviluppare nuovi processi di scissione dell'acqua.

6.1.2.2 Ricerca di base (TRL 2-3)

- gassificazione di biomasse e rifiuti:

Sviluppo di reattori innovativi, di materiali e processi che migliorino la flessibilità operativa e l'efficienza di conversione, nuove soluzioni per il trattamento del gas di sintesi;

- pirolisi:

Sviluppo di nuovi sistemi di produzione di idrogeno da pirolisi, separando in continuo il carbonio solido prodotto, e valorizzandolo come sottoprodotto.

- produzione biologica:

Nuovi bioreattori con un alto tasso di produzione per impianti di medie e grandi dimensioni; sviluppo di celle microbiche basate su processi, configurazioni, materiali ed elettrodi innovativi; sviluppo di sistemi integrati di separazione

- elettrificazione dello steam reforming:

Nuovi catalizzatori strutturati e reattori catalitici che integrino in modo ottimale la reazione endotermica di conversione di metano a syngas/H₂ con la generazione di calore da energia elettrica rinnovabile, consentendo anche una elevata flessibilità nella gestione di transitori.

- solare diretto:

Sviluppo di nuovi sistemi e dispositivi continui di fotolisi, foto (elettro) catalisi; ricerca su materiali avanzati per cicli termochimici (chemical looping) con elevate cinetiche di conversione; ottimizzazione fluido-dinamica e termica del reattore di riduzione per accoppiamento diretto con concentratori solari; integrazione reattore/collettore solare.

6.1.2.3 Ricerca Industriale e Sviluppo (TRL 3-5)

- gassificazione di biomasse e rifiuti:

Scale up delle tecnologie più promettenti, sviluppo di sistemi ibridi e gassificazione da fonte solare;

- pirolisi:

Sviluppo di processi di produzione di idrogeno da pirolisi con cattura del carbonio solido;

- produzione biologica:

Sviluppo di bioreattori di taglia media;

- elettrificazione dello steam reforming:

Sviluppo di reformer elettrificati di taglia rappresentativa per la produzione di H₂ da gas naturale con emissioni di CO₂ ridotte almeno del 50% rispetto alle tecnologie convenzionali;

- solare diretto:

Sviluppo dispositivi foto(elettro)catalitici con efficienza > 10%; scale up delle tecnologie più promettenti; integrazione di cicli di chemical looping in impianti a concentrazione solare-CSP e in impianti di potenza tradizionali o in processi di ossi-combustione; integrazione in altri schemi di produzione, ad esempio (bio)raffinerie.

6.1.2.4 Dimostrazione (TRL 5-7)

- Dimostrazione di impianti per la gassificazione di rifiuti e biomasse per la produzione di idrogeno e loro integrazione in sistemi produttivi;
- Dimostrazione di impianti con produzione di idrogeno da biogas;
- Dimostrazione di un reattore biologico di taglia reale per la produzione di idrogeno da residui;
- Dimostrazione di un reformer elettrificato di taglia media;
- Dimostrazione di impianti di medie dimensioni per la produzione di idrogeno da luce solare diretta.

6.2 Trasporto, stoccaggio e distribuzione dell'idrogeno a basso costo

6.2.1 Sistemi di trasporto, stoccaggio e reti di distribuzione

6.2.1.1 Visione 2030

Creare un sistema efficiente di trasporto su grandi distanze, stoccaggio per tempi brevi o su base stagionale/annuale, e sviluppare una rete di distribuzione di idrogeno adatta alle varie tipologie di applicazione, sono elementi fondamentali di filiera dell'H₂. Questo è un sistema complesso che deve avvalersi di un insieme coordinato di metodologie e non sviluppare solo alcuni elementi. La R&S in questo settore, accanto a metodologie più consolidate, deve anche includere quelle in fase di sviluppo che consentano di ampliare in futuro il campo di utilizzo dell'H₂.

Per applicazioni quali processi industriali di grande taglia (raffinerie, acciaierie, cartiere, industrie chimiche) è richiesta una fornitura massiva e continua di idrogeno. Questa richiede di integrare idrogeno pulito (prodotto in loco) a sistemi di trasmissione e distribuzione di H₂ (in blend con gas naturale, o in idrogenodotti dedicati) ed a sistemi di trasporto/accumulo che consentano lo stoccaggio sicuro di elevate quantità in grado di assicurare la continuità di operazioni. Tale tipo di stoccaggio può essere effettuato al suolo (più difficilmente, considerati i limiti di sicurezza e gli elevati costi) o con stoccaggi in sottosuolo, oppure attraverso l'uso di carrier liquidi di idrogeno che consentano sia il trasporto che lo stoccaggio sicuro.

6.2.1.1.1 Trasporto e distribuzione via gasdotti

Il trasporto da località remote, collegate da gasdotti, può avvenire attraverso l'iniezione di idrogeno nella rete di distribuzione di gas naturale. Esistono unità dimostrative, ma occorre nella prospettiva di R&S:

- sviluppare adeguati sistemi di iniezione e sistemi capaci di misurare con precisione la concentrazione di idrogeno nel gas naturale (quality tracking);
- adeguare e/o migliorare i componenti del gasdotto per supportare l'aumento del contenuto di idrogeno nella rete gas con particolare riferimento ai leaks e all'infragilimento dell'acciaio prodotto dall'idrogeno a media-alta pressione;
- sviluppare sistemi di separazione dell'idrogeno dal gas naturale efficienti e a basso costo;
- sviluppare nuove reti gas per il trasporto di idrogeno puro;
- valutare l'intercambiabilità dei blending verso gli apparecchi degli usi finali di energia.

Queste attività dovranno essere affiancate da un'attenta analisi dei vincoli legati alla generazione e stoccaggio dell'idrogeno ad alta pressione per applicazioni stazionarie e a bordo di navi, treni e veicoli, al fine di migliorare la sicurezza e superare le barriere legislative.

6.2.1.1.2 Trasporto e stoccaggio via liquefazione

L'idrogeno può essere liquefatto e stoccato all'interno di contenitori criogenici. Oltre ai processi di liquefazione tradizionali sono attualmente in fase avanzata di studio processi di compressione criogenica dell'idrogeno liquido che consentono di ottenere densità di 80 g/l a fronte di un costo energetico confrontabile con quello dell'idrogeno compresso in fase gassosa (30 g/l). Sono già in sviluppo navi per il trasporto di idrogeno liquido.

6.2.1.1.3 Trasporto e stoccaggio via idrati di idrogeno e solidi

Sebbene ancora in fase di ricerca di base, gli idrati di idrogeno ottenuti con l'eventuale impiego sinergico di molecole promotrici (Clatrati idrati di tipo S-2) possono costituire in prospettiva un'interessante tecnologia per il trasporto dell'idrogeno su lunghe distanze con elevato standard di sicurezza e moderati costi di "storage". I clatrati idrati, già sperimentati con successo per lo stoccaggio ed il trasporto del metano, consentono teoricamente di coniugare a ottime densità di stoccaggio (30-40 g/l a pressione atmosferica) un'elevata sicurezza in fase di trasporto (rischio di infiammabilità ed esplosione molto basso).

6.2.1.1.4 Trasporto e stoccaggio via vettori liquidi (hydrogen carrier)

La ricerca è ancora in fase di sviluppo, ma vi sono già esempi dimostrativi sia per il trasporto remoto (tra Australia e Giappone, dall'Arabia Saudita), che per uso di H₂ in mobilità (treni). La tecnologia più sviluppata è quella di idrogenazione/deidrogenazione di molecole organiche (liquid organic hydrogen carrier, LOHC) oppure della CO₂ a formare acido formico. E' in fase di sviluppo l'alternativa basata su idruri di Si. In entrambi i casi la quantità massima stoccabile di H₂ (in peso) è attorno all'8%. Lo stoccaggio nella forma di NH₃, liquefacibile a basse pressioni e su cui già esiste un sistema esteso di soluzioni di trasporto/stoccaggio, permette tre vantaggi: i) lo stoccaggio molto più elevato, attorno al 18% in peso; ii) evitare la necessità del trasporto indietro del prodotto una volta rilasciato l'H₂, in quanto l'N₂ può essere prelevato e reimpresso nell'atmosfera (quindi preferibile per applicazioni mobili); iii) la possibilità della sua sintesi diretta da N₂, H₂O ed energia rinnovabile, con miglioramento dell'efficienza. Altre molecole di idrogenazione della CO₂ (metanolo, dimetiletere) non presentano sufficiente reversibilità come carrier di H₂, ma possono essere utilizzate in alternativa all'H₂ in varie applicazioni. Il boroidruro è un carrier inorganico alternativo come i polisilani.

6.2.1.1.5 Stoccaggio via solidi

Lo stoccaggio combinato chimico o fisico dell'idrogeno in materiali solidi quali idruri, MOF o materiali carboniosi è stato intensamente studiato, ma presenta limitazioni sulla quantità stoccabili in peso e/o volume, cinetiche di desorbimento, stabilità.

6.2.1.1.6 Stoccaggio via idrogeno compresso

L'idrogeno compresso (350 e 700 bar) rappresenta una soluzione pratica nel breve-medio termine per la mobilità sostenibile, in particolare per le Hydrogen Refuelling Stations (HRS) e lo stoccaggio on-board di auto, bus, treni, navi etc. È opportuno in questo campo migliorare l'efficienza di compressione e la densità di energia per unità di volume, e sviluppare in parallelo sistemi di compressione elettrochimica ad alta efficienza, come le "hydrogen pumps", in alternativa alla compressione gas.

6.2.1.2 Ricerca di base (TRL 2-3)

6.2.1.2.1 Trasporto e distribuzione via gasdotti

Sviluppo metodologie per garantire il trasporto in sicurezza, valutare la resistenza all'infrangimento dei materiali e dispositivi utilizzati, e migliorare le proprietà dei materiali utilizzati nella rete ed annessi, specie in situazioni di elevate pressioni. Occorre aumentare le concentrazioni di H₂ trasportabile in blending con gas naturale.

6.2.1.2.2 Trasporto e stoccaggio via liquefazione

Sviluppo di tecnologie innovative di compressione, e metodologie migliorate di confronto tra le alternative in relazione ai vari settori di applicazione. Miglioramento efficienza e riduzione dei costi.

6.2.1.2.3 Trasporto e stoccaggio via idrati di idrogeno e solidi

Sviluppo di tecnologie innovative e di promotori per la formazione di idrati di idrogeno. Sviluppo di materiali innovativi che utilizzano idruri a bassa e media temperatura, nonché lo sviluppo di nuove membrane di separazione. Per lo stoccaggio nel sottosuolo, si devono risolvere problematiche di metanazione locale per effetto di microrganismi in presenza di carbonio fossile.

6.2.1.2.4 Trasporto e stoccaggio via vettori liquidi

Riduzione dei costi e miglioramento reversibilità. Sviluppo di nuovi carrier di idrogeno più efficienti ed economici. Sviluppo sintesi diretta (via foto e/o elettrocatalitica) di NH_3 e vettori quali acido formico, miglioramento catalizzatori per generare selettivamente H_2 da questi carrier in condizioni blande. Sviluppo di dispositivi integrati per stoccaggio H_2 via vettori liquidi.

6.2.1.2.5 Stoccaggio via solidi

Sviluppo di nanomateriali innovativi per stoccaggio di idrogeno in solidi. Integrazione di catalizzatori per migliorare le cinetiche.

6.2.1.2.6 Stoccaggio via idrogeno compresso

Per l'idrogeno compresso si rende necessario sviluppare materiali innovativi quali elettrocatalizzatori CRM-free e membrane performanti in grado di sostenere elevate pressioni differenziali per hydrogen pump al fine di realizzare una compressione elettrochimica ad alta efficienza.

6.2.1.3 Ricerca industriale e di sviluppo (TRL 4-5)

6.2.1.3.1 Trasporto e distribuzione via gasdotti

Sviluppo di tecnologie innovative per limitare l'impatto dell'idrogeno sulla rete esistente, e per lo studio degli effetti della contaminazione nelle reti esistenti in presenza di idrogeno. Studio dei materiali per il trasporto di idrogeno puro in reti gas dedicate. Sviluppo di componenti per la rete gas naturale + H_2 ed il suo utilizzo.

6.2.1.3.2 Trasporto e stoccaggio via liquefazione

Sviluppo di materiali innovativi per la realizzazione di serbatoi criogenici. Analisi tecnico-economiche della tecnologia dell'idrogeno crio-compresso. Integrazione efficace tra celle a combustibile e stoccaggio dell'idrogeno a bordo nei veicoli, navi, treni ed aerei. Riduzione prezzi mediante l'impiego di nuovi materiali, nuove architetture, creazione di una value chain.

6.2.1.3.3 Trasporto e stoccaggio via idrati di idrogeno e solidi

Sviluppo di metodologie migliorate per la formazione di idrati di idrogeno. Miglioramento della capacità di stoccaggio dell'idrogeno, della cinetica e del comportamento ciclico, sicurezza nell'utilizzo.

6.2.1.3.4 Trasporto e stoccaggio via vettori liquidi

Individuazione dei vettori preferibili in base ai settori di applicazione. Sviluppo di dispositivi prototipo. Integrazione del trasporto via vettori liquidi nella filiera idrogeno. Sistemi integrati di produzione NH_3 efficienti su scala medio-piccola.

6.2.1.3.5 Stoccaggio via solidi

Sistemi dimostrativi di stoccaggio H_2 con solidi per trasporto navale ed autoveicoli. Riduzione dei costi e miglioramento dell'operabilità.

6.2.1.3.6 Stoccaggio via idrogeno compresso

La compressione gas da 30 bar (pressione del gas prodotto da elettrolizzatori convenzionali) a 700 bar comporta una perdita di efficienza superiore al 15%. È pertanto necessario migliorare i compressori gas in termini di efficienza di compressione ed incrementare la densità di energia per unità di volume implementando soluzioni per ottenere pressioni di stoccaggio più elevate (900 bar).

6.2.1.4 Dimostrazione (TRL 5-7)

6.2.1.4.1 Trasporto e distribuzione via gasdotti

Dimostrazione nella rete esistente con integrata produzione di idrogeno (es. Power-to-Gas, P2G). Progetti pilota di impianti di produzione e reti di distribuzione locali di idrogeno puro. Ripristino e valorizzazione degli

idrogenodotti presenti sul territorio nazionale (ad es. significativo idrogenodotto Terni-Narni). Analisi tecnico-economiche per concentrazioni $H_2 > 20\%$, mappatura degli impianti P2G sulle reti gas.

6.2.1.4.2 Trasporto e stoccaggio via liquefazione

Validazione in progetti dimostrativi per verificare le caratteristiche di sicurezza, durata e adattabilità alle diverse condizioni di utilizzo in veicoli, navi, treni, aerei etc.

6.2.1.4.3 Trasporto e stoccaggio via idrati di idrogeno e solidi

Validazione per stoccaggio a suolo o nel sottosuolo.

6.2.1.4.4 Trasporto e stoccaggio via vettori liquidi

Sistemi dimostrativi integrati per produzione/trasporto da località remote non connesse a gasdotti, e per utilizzo in sistemi mobili. Sviluppo filiere integrate multi-produzione per grandi utilizzi industriali.

6.2.1.4.5 Stoccaggio via solidi

Validazione industriale di stoccaggio H_2 con solidi. Analisi tecno-economica e di sicurezza per determinarne i settori preferenziali di utilizzo.

6.2.2 Stazioni di rifornimento di idrogeno a basso costo

6.2.2.1 Visione 2030

Lo sviluppo di una rete di stazioni di rifornimento, in particolare per applicazioni light and heavy duty per lunghe percorrenze, dovrebbe seguire una logica di hub connesse a rete sulle principali dorsali di trasporto con integrazione di produzione/stoccaggio locale o regionale, anche via carriers liquidi o solidi, valutando le alternative preferenziali in base alle specifiche di utilizzo. Occorre anche ridurre i costi di sistema attraverso la realizzazione e l'integrazione di componenti modulari. Questa attività deve integrarsi con i piani europei sulla tematica.

6.2.2.2 Ricerca di base (TRL 2-3)

Occorre una riduzione significativa dei costi della tecnologia, il miglioramento dell'efficienza complessiva, la riduzione del consumo energetico per la compressione gas, l'implementazione di nuovi sistemi di compressione come, ad esempio, le H_2 pump elettrochimiche.

6.2.2.3 Ricerca Industriale e Sviluppo (TRL 3-5)

Occorre ridurre i tempi di ricarica, migliorare la sicurezza, sviluppare stazioni per molteplici usi (camion, autobus, automobili, ecc.). Occorre individuare con analisi tecno-economiche e LCA le alternative preferibili in relazione a territorio ed utilizzi, creando un ecosistema di idrogeno integrato. Occorre migliorare gli standard di qualità del gas idrogeno, e diminuire i costi di sistema e per i vari componenti.

6.2.2.4 Dimostrazione (TRL 5-7)

Occorre sviluppare sistemi dimostrativi di grande potenza ($> 2MW$), validare la tecnologia su ampia scala con distanza massima tra stazioni inferiore a 400 km, creare una infrastruttura adeguata attraverso l'implementazione progressiva di "Hydrogen Valleys" e "Hydrogen Corridors". Dimostrazione delle prime stazioni hubs sulle principali dorsali del trasporto merci.

6.3 Usi finali

6.3.1 L'idrogeno per sistemi energetici "verso 100% da fonti rinnovabili"

6.3.1.1 Visione 2030

L'idrogeno prodotto a basso costo con elettrolizzatori allacciati alla rete o con sistemi isolati può essere utilizzato in tutti i settori e garantire la decarbonizzazione e il contenimento delle emissioni inquinanti. In tale contesto il vettore Idrogeno assumerà un rilievo importante–nell'ambito dei "Positive Energy District" (fortemente presenti nell'Agenda 2030, nel programma Horizon Europe) che, unitamente alla

implementazione di sistemi energetici di produzione e stoccaggio intelligenti e distribuiti anche per l'edilizia⁸, saranno energeticamente finalizzati, tra l'altro, ad una naturale integrazione e ad una gestione proattiva e sistemica del vettore idrogeno con quelli elettrici e termici (sistemi multienergy e multimodali). L'integrazione dell'idrogeno nell'ambito dei PED si estenderà, al contempo, alla nascita e allo sviluppo di un nuovo modello di sviluppo energetico in ambito urbano che amplierà le possibilità di accesso al Mercato e la capacità di fornire servizi di flessibilità agli operatori di rete da parte del cittadino (*Urban-Prosumer*).

6.3.1.2 Ricerca Industriale e Sviluppo (TRL 3-5)

- sviluppo tecnologico dei componenti impiantistici necessari all'utilizzo dell'idrogeno nel settore residenziale

6.3.1.3 Dimostrazione (TRL 5-7)

- Fornitura di servizi (es. flessibilità) agli operatori di rete (simulazione e dimostrazione), contribuendo a bilanciare il sistema e a consentire un maggiore utilizzo delle energie rinnovabili locali;
- Accoppiamento diretto su scala MW alla generazione rinnovabile (sia in rete che in sistemi isolati);
- Utilizzo di tecnologie digitali emergenti per integrare la generazione distribuita di energia rinnovabile, μ CHP, elettrolizzatori, ricarica BEV in un sistema energetico altamente flessibile e resiliente;
- Definizione di nuovi modelli di business per l'integrazione dell'idrogeno nel sistema energetico.
- Progetti pilota relativi alla realizzazione di Positive Energy District "Hydrogen based", dimostrativi di un approccio globale che, superando il concetto di Hydrogen Valley, integrino più ampi aspetti tecnologici, normativi/legislativi, regolatori, sociali ed economici con l'idrogeno tra i differenti vettori energetici.

6.3.2 Mobilità a idrogeno pulita e competitiva

6.3.2.1 Applicazioni stradali e off-road

6.3.2.1.1 Visione 2030

Il settore della mobilità è stato l'ambito su cui sono state dedicate ampie risorse di ricerca e su cui si possono individuare opportunità di mercato. Infatti, grazie all'elevata densità di energia, l'idrogeno (compreso a 350-700 bar o adsorbito in idruri) utilizzato in celle a combustibile (tecnologia a membrana polimerica) rappresenta una soluzione competitiva rispetto alle batterie soprattutto per i cosiddetti "Heavy Duty Vehicles". Tuttavia, per una larga diffusione dei veicoli a celle a combustibile, il costo dei componenti del sistema di propulsione, delle celle a combustibile e dei sistemi di stoccaggio e rifornimento devono essere ridotti significativamente, mentre devono essere ulteriormente dimostrate affidabilità, disponibilità e durata delle nuove tecnologie sviluppate.

6.3.2.1.2 Ricerca di base (TRL 2-3)

Gli obiettivi della ricerca nel medio-lungo termine dovranno portare allo sviluppo di nuovi materiali e nuove tecnologie per ridurre il costo delle fuel cell. In particolare, la ricerca sarà indirizzata allo sviluppo di nuove membrane polimeriche composite in grado di operare a più alta temperatura, di elettro-catalizzatori a basso carico di metallo nobile, e all'analisi fluidodinamica del sistema. La ricerca per applicazioni *heavy duty* è orientata a sviluppare catalizzatori innovativi per l'applicazione specifica di maggiore durata.

6.3.2.1.3 Ricerca Industriale e Sviluppo (TRL 3-5)

Lo sviluppo di nuovi prodotti basati su tecnologie e processi già validati richiede attività di ricerca diversificate:

- Sviluppo di stack automotive: Miglioramento delle prestazioni, durata e affidabilità per applicazioni Heavy duty; sviluppo di parti e componenti innovativi per ottimizzare il BoP e ridurre i costi; sviluppo di strumenti e componenti per il monitoraggio, la diagnostica e il controllo
- Integrazione delle celle a combustibile: Ottimizzazione di moduli Heavy Duty diversificati per applicazione; sviluppo di sistemi ibridi celle a combustibile/batterie

⁸ Strategic Research and Innovation Agenda, European Construction Technology Platform, November 2019

- Sviluppo serbatoi Sviluppo ed integrazione a bordo di sistemi di stoccaggio innovativi a bassa pressione con tecnologie a idruri metallici o a idrogeno liquido; sviluppo ed integrazione a bordo di sensori di sicurezza a basso costo e affidabili per il monitoraggio delle performance e rivelazione guasti.

6.3.2.1.4 Dimostrazione (TRL 5-7)

Dimostrazione di piccole flotte prototipali di veicoli heavy duty (servizi municipali quali trasporto rifiuti).

6.3.2.2 Applicazioni nel trasporto ferro-tramviario

6.3.2.2.1 Visione 2030

L'utilizzo di treni ad idrogeno in sostituzione dei treni diesel per le tratte non elettrificate di ferrovia è un tema rilevante in diversi paesi europei, se si considera che le tratte non elettrificate riguardano in molti casi il 30% del totale ed i costi per elettrificare alcune linee sono elevatissimi, in particolare, in Italia per la morfologia del territorio. I treni ad idrogeno potrebbero quindi rappresentare una soluzione competitiva già oggi per sostituire i treni diesel rispetto alle batterie, in particolare per l'elevata densità di energia, rapidità di rifornimento ed autonomia. Aspetti critici sono lo stoccaggio a bordo e l'uso di carrier idonei per l'applicazione.

6.3.2.2.2 Ricerca di base (TRL 2-3)

Sviluppo e impiego di nuovi materiali, di nuove tecnologie e di nuovi processi sono azioni prioritarie sia per la realizzazione di celle a combustibile per applicazioni di grande potenza, sia per l'integrazione a bordo di sistemi di stoccaggio idrogeno a bassa (idruri) ed alta pressione. Critico è lo sviluppo di soluzioni innovative per lo stoccaggio di idrogeno.

6.3.2.2.3 Ricerca Industriale e Sviluppo (TRL 3-5)

Sviluppo di nuove architetture di sistema per soluzioni di grande potenza che ne aumentino la vita utile, di BOP ottimizzati per la specifica applicazione e di sistemi e processi per lo stoccaggio idrogeno a bassa pressione in idruri metallici o in forma liquida o, in alternativa, mediante opportuni carrier di idrogeno. È necessario anche sviluppare componenti e tecnologie per la realizzazione di stazioni di rifornimento di capacità adeguata.

6.3.2.2.4 Dimostrazione (TRL 5-7)

Progettazione, sviluppo, certificazione e omologazione di veicoli a idrogeno e per creare infrastrutture appropriate di refuelling basate su elettrolizzatori ad alta pressione e comprendere il potenziale di mercato e le implicazioni normative.

6.3.2.3 Applicazioni nel settore marino e nei terminal portuali

6.3.2.3.1 Visione 2030

L'IMO (International Maritime Organization) ha individuato gli strumenti necessari per garantire la transizione "green" del settore, per ridurre le emissioni nocive (NOx, SOx, PM) e per valutare l'impatto dello shipping in termini di gas serra. Per ridurre le emissioni delle navi è stata considerata l'introduzione dei combustibili alternativi privi o a ridotto tenore di carbonio e l'utilizzo di celle a combustibile alimentate a idrogeno sia come unità di propulsione, sia come APU (Auxiliary Power Units) anche in assetto cogenerativo. L'idrogeno e le celle a combustibile PEM rappresentano le soluzioni più idonee per realizzare piccole navi a zero emissioni (trasporto passeggeri, merci/passeggeri e crociera). Per le navi più grandi, le FC possono essere utilizzate come soluzioni per la propulsione se integrate con sistemi di produzione idrogeno a bordo da diverse tipologie di combustibili.

Per la decarbonizzazione dei porti è già possibile l'immediata applicazione di soluzioni, come quelle delle tecnologie dell'idrogeno, già utilizzate in altri settori (automobilistico, urbano, trasporti, produzione di energia, ecc.) ma non ancora adattate al settore. I terminal portuali possono essere una perfetta dimostrazione di "Hydrogen Valleys", dove testare e validare un ecosistema basato sul vettore idrogeno.

6.3.2.3.2 Ricerca di base (TRL 2-3)

Sviluppo di soluzioni specifiche nella suddetta applicazione, concentrandosi su nuovi stack, sistemi FC e sulla scalabilità modulare della tecnologia. Inoltre, dovrà essere considerato lo sviluppo di idonei sistemi di stoccaggio, vettori alternativi e reforming a bordo.

6.3.2.3.3 Ricerca Industriale e Sviluppo (TRL 3-5)

Le attività di sviluppo saranno orientate a ottimizzare moduli FC di grande potenza, scegliere le tecnologie più indicate e sviluppare sistemi di stoccaggio idrogeno e valutare anche possibili opzioni di reforming a bordo da altri carriers per aumentare la flessibilità operativa. Per le navi di grande taglia, le attività R&S saranno orientate allo sviluppo di stack e BoP modulari e ad alta densità di potenza (celle a combustibile LT e HT PEM, SOFC e MCFC in grado di utilizzare una gamma diversificata di combustibili) e studiare soluzioni di rifornimento idonee nei porti (idrogeno liquido, idruri, altri carriers). Per le operazioni portuali le attività saranno orientate allo sviluppo di nuovi veicoli in grado di assicurare la movimentazione ed il trasporto delle merci nei terminal portuali con veicoli elettrici ibridi (fuel cell/batterie) come gru, trattori portuali a due o a 4 ruote motrici, sollevatori e movimentatori di containers, muletti e carrelli.

6.3.2.3.4 Dimostrazione (TRL 5-7)

Dimostrazione di sistemi di trasporto di taglia medio-piccola e imbarcazioni mercantili per trasporto merci su distanze sotto i 1000 km. Dimostrazione dell'infrastruttura necessaria all'approvvigionamento di carburante e adeguamento dei regolamenti, codici e standard (RCS). Realizzazione di flotte di veicoli per la decarbonizzazione delle operazioni di logistica nei terminal portuali.

6.3.2.4 Applicazioni nel settore aeronautico e nei terminal aeroportuali

6.3.2.4.1 Visione 2030

Le tecnologie a idrogeno saranno utilizzate non solo per la realizzazione di APU da integrare nei velivoli ma anche per la sperimentazione di sistemi di propulsione elettrica a idrogeno per velivoli di corto raggio per la mobilità dei passeggeri (<50 passeggeri) e per il trasporto di merci con specifici droni

Le maggiori prospettive riguardano la produzione di combustibili sintetici ad elevata densità di energia mediante l'utilizzo di idrogeno e tecnologie CCUS.

6.3.2.4.2 Ricerca di base (TRL 2-3)

Ricerca di nuovi materiali e nuovi processi per la realizzazione di membrane, piatti e celle a combustibile di elevata densità di potenza, serbatoi di stoccaggio e di componenti speciali per specifiche applicazioni aeronautiche

6.3.2.4.3 Ricerca Industriale e Sviluppo (TRL 3-5)

Sviluppo di stack da 250 kW scalabili fino a taglie di MW con componenti e BoP ad alta densità di potenza per le applicazioni aeronautiche. Studio dei sistemi di gestione e distribuzione dell'idrogeno a bordo.

Sviluppo di camere di combustione a bassa emissione di NOx e ad alta efficienza per turbine a gas aeronautiche. Sviluppo di catalizzatori, reattoristica e componentistica per produzione di combustibile sintetico, comprensivo delle tecnologie per il recupero della CO₂ e sua valorizzazione.

Ricerca su processi, catalizzatori e reattori per la produzione di combustibile sintetico ad elevata densità energetica. Processi e tecnologie per il recupero/valorizzazione di CO₂ (processi di ab/adsorbimento, permeazione su membrane, conversione catalitica con idrogeno verde).

6.3.2.4.4 Dimostrazione (TRL 5-7)

Sperimentazione di sistemi di propulsione in test di volo reali. Impianti di produzione di idrogeno e/o combustibile sintetico in hub cross-sectorial per la fornitura dei servizi energetici aeroportuali. Sviluppo di nuovi veicoli in grado di assicurare la movimentazione ed il trasporto delle merci nei terminal aeroportuali con veicoli elettrici ibridi (fuel cell/batterie) come aereo-trattori, bus e scale passeggeri, sollevatori e movimentatori di merci, muletti e carrelli.

6.3.3 Applicazioni stazionarie e cogenerazione per l'ambiente costruito

6.3.3.1 *Visione 2030*

Le applicazioni stazionarie e la cogenerazione si svilupperanno particolarmente nel settore terziario e in quello residenziale; ad esempio le celle a combustibile per applicazioni stazionarie (nel settore residenziale e commerciale/terziario) offrono elevate efficienze elettriche (> 60%), elevate efficienze co e tri generative (anche superiori al 90%), flessibilità operativa, emissioni di NO_x, SO_x, CO e polveri sottili nulle (quasi nulle per applicazioni blended) ed elevata vita utile. Possono essere anche alimentate con idrogeno generato internamente da combustibili diversi come biogas, biomasse o altri residui. L'integrazione nel sistema elettrico potrebbe incrementare la capacità di back-up nelle situazioni di interruzioni di produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili intermittenti.

È tuttavia necessaria della ricerca sulle tecnologie e sui modelli di business.

6.3.3.2 *Ricerca di base (TRL 2-3)*

Per tutte le tecnologie di celle a combustibile è necessario sviluppare nuovi materiali, nuovi stack e processi di produzione per ridurre il costo e aumentare la vita utile, l'affidabilità, la flessibilità operativa e la manutenibilità. Per le celle a combustibile ad ossidi solidi, la ricerca va orientata verso la riduzione dei materiali critici, lo sviluppo di guarnizioni per l'alta temperatura e la riduzione delle temperature di funzionamento (fino a 600 °C) per migliorare la resistenza alla corrosione, la durata e incrementare l'impiego di acciai ferritici a basso costo. È necessario migliorare il comportamento dinamico, in particolare la stabilità ai cicli redox e termici.

6.3.3.3 *Ricerca Industriale e Sviluppo (TRL 3-5)*

Supporto alla standardizzazione e alla riduzione dei costi per i componenti del BOP. Sviluppo di tecniche innovative di manutenzione predittiva e teleassistenza. Sviluppo di processi produttivi automatizzati. Sviluppo di prodotti nel settore micro-CHP (residenziale) e mini-CHP (commerciale/terziario) alimentabili in un transitorio tramite biogas, syngas, ammoniaca, gas naturale di rete (blending con H₂) e in prospettiva con combustibili o vettori completamente rinnovabili. Sviluppo di tecnologie di celle a combustibile reversibili.

6.3.3.4 *Dimostrazione (TRL 5-7)*

Campagne di dimostrazione di sistemi di cogenerazione ad alta potenza (100kW- 1MW), micro-CHP (residenziale) e mini-CHP (commerciale/terziario). Dimostrazione di sistemi reversibili integrati con sistemi di generazione da rinnovabili di alta, media/bassa potenza (mini e micro accumuli locali).

6.3.4 Produzione di energia elettrica

6.3.4.1 *Visione 2030*

Le applicazioni industriali su larga scala riguardano l'utilizzo di turbine a gas e celle a combustibile in sistemi ibridi. Sono stimate circa 140 turbine in tutto il mondo alimentate a idrogeno, fino a quasi il 100% e oltre 1 GW di capacità cumulativa delle celle a combustibile con una crescita annuale di 200 MW.

6.3.4.2 *Ricerca di base (TRL 2-3)*

Materiali e componenti per celle a combustibile ad alta temperatura includendo le tecnologie di sistema (balance of plant). Studio di camere di combustione DLN per alimentazioni miste di miscele metano/idrogeno e idrogeno puro.

6.3.4.3 *Ricerca Industriale e Sviluppo (TRL 3-5)*

Sviluppo di sistemi a celle a combustibile ad alta temperatura. Sviluppo di sistemi ibridi con alimentazioni miste di miscele metano/idrogeno e idrogeno puro.

6.3.4.4 *Dimostrazione (TRL 5-7)*

Dimostrazione di 1-2 impianti di potenza, basati su sistemi ibridi celle a combustibile e turbine a gas.

6.3.5 Applicazioni industriali

6.3.5.1 Visione 2030

Le applicazioni industriali sono state indicate dalla comunità internazionale come prioritarie per l'introduzione dell'idrogeno, specialmente green, nel mercato delle "commodities". Per tali scopi è necessario sviluppare soluzioni che prevedano l'impiego dell'idrogeno nei settori della fabbricazione dei metalli e nel settore chimico includendo gli impieghi tradizionali nella produzione di ammoniaca, metanolo, plastiche sintetiche, raffinazione del petrolio e gli impieghi innovativi nella chimica verde. Nel settore della produzione di cemento l'idrogeno potrebbe essere utilizzato nella idrogenazione dell'anidride carbonica catturata dal processo ai fini della produzione di prodotti chimici sintetici. Nel settore dell'acciaio per la produzione di gas di sintesi ricchi in CO per la sostituzione del gas di coke (da carbone), per i trattamenti dell'acciaio, per la valorizzazione della CO₂ emessa, per la produzione di calore ad alta temperatura, per la fusione di scarti di acciaio. L'utilizzo di idrogeno in ambito industriale può inoltre favorire una maggiore circolarità dei processi e simbiosi industriale.

6.3.5.2 Ricerca di base (TRL 2-3)

Catalisi e reattori per la conversione termo-catalitica ed elettro-catalitica. Integrazione di processo *downstream* (sintesi chimica) ed *upstream* (produzione H₂ o syngas H₂/CO) di tecnologie per la produzione di idrogeno e CCUS.

6.3.5.3 Ricerca Industriale e Sviluppo (TRL 3-5)

Definizione di nuovi processi industriali e prototipi che prevedano l'utilizzo di idrogeno. Identificazione della componentistica necessaria.

6.3.5.4 Dimostrazione (TRL 5-7)

Sistemi per la produzione di idrogeno e impiego negli usi finali industriali.

6.4 Cross-cutting

Malgrado siano stati fatti a livello europeo e nazionale notevoli progressi negli ultimi anni sulla normativa, le difficoltà, che tutti i progetti dimostrativi per le tecnologie ad idrogeno hanno incontrato, dimostrano che sono necessari miglioramenti a livello nazionale ed europeo, ed è necessario uno sforzo comune per armonizzare il quadro normativo per tutte le applicazioni.

6.4.1 Formazione e pubblica consapevolezza

I processi e le tecnologie dell'idrogeno hanno bisogno di personale esperto delle varie competenze richieste ma che abbiano anche una visione complessiva delle filiere legate all'idrogeno, quindi in grado di gestire lo sviluppo di nuovi prodotti adatti all'inserimento nelle filiere principali delle catene del valore. Tali competenze sono al momento frammentate in varie discipline delle "STEM". È necessaria la formazione di figure dedicate, soprattutto nel settore ingegneristico, e occorre riqualificare il personale già formato tramite iniziative di aggiornamento tecnologico e di life long learning. Inoltre, occorre formare il personale degli Enti addetti al controllo, sicurezza ed autorizzazione.

6.4.2 Sicurezza, ricerca pre-normativa

Messa a punto delle disposizioni di sicurezza per le tecnologie di produzione e utilizzo di idrogeno, i serbatoi e le torri di stoccaggio ad alta pressione, per i componenti ad alta tensione di elettrolizzatori e fuel cell; la sicurezza per le gallerie nel caso dei treni, la sicurezza aeroportuale e dei porti, i problemi di sicurezza associati alle miscele di idrogeno / gas naturale per la rete gas etc.

6.4.3 Formazione ed educazione

Il miglioramento degli aspetti di formazione ed educazione specie a livello universitario è fondamentale per creare una effettiva filiera dell'idrogeno. Si ritiene molto utile creare un Dottorato italiano, con la

partecipazione di varie Università, Enti di Ricerca e Politecnici, dedicato alla filiera dell'idrogeno. La creazione di smart lab aperti agli studenti per sviluppare piccoli prototipi relativi alla filiera dell'idrogeno può stimolare lo sviluppo di soluzioni innovative e la creazione di start-up.

6.4.4 Tutela della proprietà intellettuale

Tutelare e valorizzare la proprietà intellettuale originatasi dalle attività di ricerca con un adeguato sistema organizzato a livello nazionale di trasferimento tecnologico per la nascita di start-up, spin-off e/o rami di azienda, includendo in tale processo anche la valorizzazione di dottori di ricerca, adeguatamente formati, come Manager sia del trasferimento tecnologico sia per la guida delle nascenti iniziative imprenditoriali.