
UNIVERSITÀ DI GENOVA
SCUOLA DI SCIENZE SOCIALI
DIPARTIMENTO DI ECONOMIA



Tesi di laurea magistrale in
Management

Idrogeno, il vettore energetico del futuro?

Relatore: Luca Beltrametti

Candidato: Davide Ruatti

Anno accademico
2022/2023

Indice

Abstract	1
Abstract (English)	2
Capitolo I L'idrogeno tra passato e futuro.....	3
1. Le caratteristiche dell'idrogeno	3
2. La transizione energetica	4
3. Evoluzione dell'interesse per l'idrogeno	8
Capitolo II Produzione di idrogeno.....	12
1. Introduzione.....	12
2. L'idrogeno "marrone" e la gassificazione	13
3. Idrogeno "grigio" e lo <i>steam reforming</i> (SMR)	17
4. Idrogeno "blu" e la cattura della CO ₂	20
5. Idrogeno "verde" e l'elettrolisi dell'acqua	27
6. Idrogeno "rosa" e l'energia nucleare	30
Capitolo III Tecnologie di stoccaggio e trasporto dell'idrogeno	34
1. Introduzione.....	34
2. L'idrogeno in forma gassosa.....	35
2.1 Lo stoccaggio di idrogeno tramite compressione (cGH ₂).....	35
2.2 Il trasporto di idrogeno in forma gassosa	40
3. L'idrogeno in forma liquida.....	47
4. L'idrogeno convertito	49
5. I problemi dello stoccaggio di idrogeno	53
6. Conclusioni.....	54
Capitolo IV Motori ad idrogeno e oltre: applicazioni del vettore energetico	59
1. Introduzione.....	59
2. Il settore automobilistico	61

3.	Il settore dei trasporti.....	69
4.	Il settore aerospaziale e la NASA.....	75
	Conclusioni	80
	Riferimenti Bibliografici.....	82
	Ringraziamenti	91

Abstract

Mossa da una profonda preoccupazione per i cambiamenti climatici e dal desiderio di studiare soluzioni sostenibili, questa ricerca indaga sulla fattibilità economica dell'adozione dell'idrogeno e sul suo potenziale nel mitigare l'impatto ambientale.

Questo testo approfondisce il mondo sfaccettato dell'idrogeno. La crisi climatica e la conseguente transizione energetica richiedono un cambio di marcia a tutte le economie del globo. Per questo sono state avviate ricerche e progetti al fine di trovare una variante ai combustibili fossili che riesca a perseguire l'obiettivo di una economia a zero emissioni insieme a quello della sostenibilità economica.

Durante l'elaborato viene condotta un'analisi rigorosa dei pro e dei contro dell'idrogeno, che abbraccia ogni aspetto dalla produzione, allo stoccaggio passando per la distribuzione. Numerosi casi studio sono stati esaminati per valutare l'impatto tangibile dell'adozione dell'idrogeno a livello globale. La ricerca mira a accertare la praticità di integrare questa sostanza nell'economia e valutarne il potenziale contributo alla mitigazione dei cambiamenti climatici.

In conclusione, questa tesi non solo fornisce una dettagliata esplorazione dell'idrogeno, ma sottolinea anche l'urgenza di adottare soluzioni energetiche sostenibili di fronte ai cambiamenti climatici.

Abstract (English)

Motivated by a deep concern for climate change and a desire to explore sustainable solutions, this research investigates the economic feasibility of adopting hydrogen and its potential to mitigate environmental impact.

The text delves into the multifaceted world of hydrogen. The climate crisis and the subsequent energy transition demand a shift in direction for all global economies. Consequently, research and projects have been initiated to find an alternative to fossil fuels that can achieve the goal of a zero-emission economy alongside economic sustainability.

Throughout the paper, a rigorous analysis of the pros and cons of hydrogen is conducted, covering every aspect from production to storage and distribution. Numerous case studies have been examined to assess the tangible impact of adopting hydrogen globally. The research aims to ascertain the practicality of integrating this substance into the economy and evaluate its potential contribution to mitigating climate change.

In conclusion, this thesis not only provides a detailed exploration of hydrogen but also emphasizes the urgency of adopting sustainable energy solutions in the face of climate change.

Capitolo I

L'idrogeno tra passato e futuro

1. Le caratteristiche dell'idrogeno

L'idrogeno, l'elemento più abbondante dell'universo e il più leggero della tavola periodica, si presenta allo stato puro come gas e può essere trovato nelle stelle, dove agisce come combustibile nella fusione nucleare (Fonte: Sorgenia 2023). Sulla Terra, tuttavia, si trova solo in combinazione con altri elementi, come nell'acqua, composta da due molecole di idrogeno e una di ossigeno. Inoltre, l'idrogeno è presente negli esseri viventi e nei composti organici. Quindi per essere utilizzato bisogna che venga prodotto e per essere prodotto è necessario consumare energia.

Per semplificarne la comprensione, nonostante l'idrogeno sia un gas trasparente, a seconda del metodo di produzione e dalla quantità di emissioni di CO_2 che richiede il processo, gli viene assegnato un nome diverso che si associa a un colore. A tal proposito, si distinguono alcuni principali colori: l'idrogeno "marrone", derivato dal metano; l'idrogeno "grigio", estratto da fonti fossili; l'idrogeno "blu" anch'esso estratto da fonti fossili ma accompagnato da impianti di cattura di anidride carbonica; infine, l'idrogeno "verde", ottenuto dall'acqua attraverso l'utilizzo di fonti di energia rinnovabile e "rosa", ottenuto utilizzando l'energia nucleare.

L'idrogeno presenta un notevole vantaggio ambientale in quanto, durante il processo di combustione, genera solo acqua come sottoprodotto eliminando completamente le emissioni di anidride carbonica. Inoltre, un altro aspetto significativo è la sua elevata densità energetica, il che significa che contiene una quantità considerevole di energia rispetto al suo peso. Un chilogrammo di idrogeno, infatti, racchiude circa 120 megajoule¹, una densità energetica specifica quasi tre volte superiore a quella della benzina. (Cavuoto M. C., 2022).

¹ Il megajoule (MJ) è un'unità di misura dell'energia nel Sistema Internazionale (SI). Rappresenta un milione di joule, dove il joule è l'unità di base per misurare l'energia

La sua versatilità emerge attraverso la sua applicazione in diversi settori, inclusi l'industriale e dei trasporti. In aggiunta, può fungere da mezzo di stoccaggio per l'eccesso di energia prodotta da fonti rinnovabili, consentendo il suo utilizzo in successivi momenti di maggiore necessità.

Tuttavia, nonostante questi vantaggi, la diffusione globale dell'idrogeno è limitata da alcune motivazioni riconducibili a difetti significativi. I diversi tipi di idrogeno, in particolare quelli derivati da fonti fossili, presentano una resa energetica finale inferiore rispetto all'energia impiegata nel loro processo di creazione. Inoltre, la produzione, lo stoccaggio e la distribuzione dell'idrogeno risultano attualmente più costosi rispetto ad altre fonti energetiche, rappresentando una sfida cruciale. Infine, una delle sue caratteristiche è la permeabilità² e, a causa di quest'ultima, l'idrogeno è difficile da stoccare e trasportare in modo efficiente, richiedendo l'adozione di metodologie specializzate per prevenire dispersioni.

In conclusione, l'idrogeno offre innegabili vantaggi in termini di versatilità e impatto ambientale, ma le problematiche legate all'efficienza, ai costi e alla produzione sostenibile costituiscono un ostacolo significativo che, una volta superato, potrebbe aprire la strada alla sua diffusione su scala globale.

2. La transizione energetica

Il termine "cambiamenti climatici" si riferisce a: "*modifiche a lungo termine nelle temperature e nei modelli meteorologici*" (UNRIC³). Sebbene tali cambiamenti siano stati una costante nella storia del nostro pianeta, ciò che caratterizza il presente è identificato come eccezionale, in quanto è principalmente causato dalle attività umane e si manifesta con movimenti estremamente più rapidi rispetto a quelli dei processi naturali.

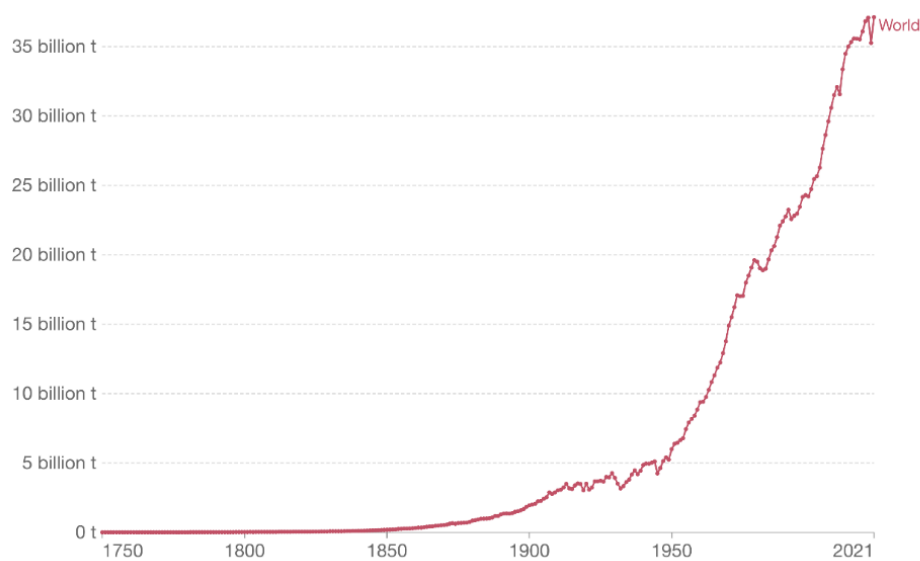
² Permeabilità dell'idrogeno: le molecole di idrogeno sono molto piccole e possono diffondere attraverso le pareti dei materiali più facilmente rispetto alle molecole di altri materiali. Questo fenomeno può portare a perdite significative di gas se l'idrogeno viene trasportato tramite tecnologie non adatte.

³ UNRIC: United Nations Regional Information Centre. In generale, l'UNRIC lavora per promuovere la consapevolezza e la comprensione dei temi globali affrontati dalle Nazioni Unite, incoraggiando il dialogo e la partecipazione a livello locale. Tra le sue attività ci sono la diffusione di materiali informativi, la collaborazione con i media, l'organizzazione di eventi e l'interazione con le diverse parti interessate per favorire una maggiore comprensione delle questioni internazionali affrontate dall'ONU.

Durante la Rivoluzione Industriale, l'umanità ha iniziato a sfruttare i combustibili fossili, come carbone, petrolio e gas, per scopi industriali ed energetici, contribuendo al rilascio massivo di tonnellate di CO_2 nociva nell'atmosfera. I livelli di anidride carbonica sono diventati addirittura 150 volte superiori a quelli del periodo precedente alla rivoluzione industriale.

Tabella 1.1

Emissioni globali di CO_2 dal 1750 al 2021



Fonte: museoscienza.org (2023)

Ad oggi, tra i principali responsabili delle enormi emissioni di anidride carbonica in atmosfera, troviamo la Cina con il 30,9%, gli Stati Uniti con il 13,5% e l'India con l'7.3%. Il dato preoccupante che emerge è che solo i primi 10 produttori di CO_2 nel mondo rappresentano addirittura il 68.3% delle emissioni globali. Ciò rende evidente che la responsabilità e il potere di cambiare le cose sono concentrati nelle mani di pochi. (Lu M., 2023)

Tabella 1.2

Emissioni di CO2 dei principali stati del mondo nel 2021

Rank	Country	Region	Total Emissions (%)
#1	 China	Asia	30.9%
#2	 U.S.	North America	13.5%
#3	 India	Asia	7.3%
#4	 Russia	Europe	4.7%
#5	 Japan	Asia	2.9%
#6	 Iran	Asia	2.0%
#7	 Germany	Europe	1.8%
#8	 Saudi Arabia	Other	1.8%
#9	 Indonesia	Asia	1.7%
#10	 South Korea	Asia	1.7%
#11	 Canada	North America	1.5%
#12	 Brazil	South America	1.3%
#13	 Türkiye	Europe	1.2%
#14	 South Africa	Africa	1.2%
#15	 Mexico	North America	1.1%
#16	 Australia	Oceania	1.1%
#17	 UK	Europe	0.9%
#18	 Italy	Europe	0.9%
#19	 Poland	Europe	0.9%
n/a	 Rest of World	Other	21.7%

Fonte: *visualcapitalist.com (2023)*

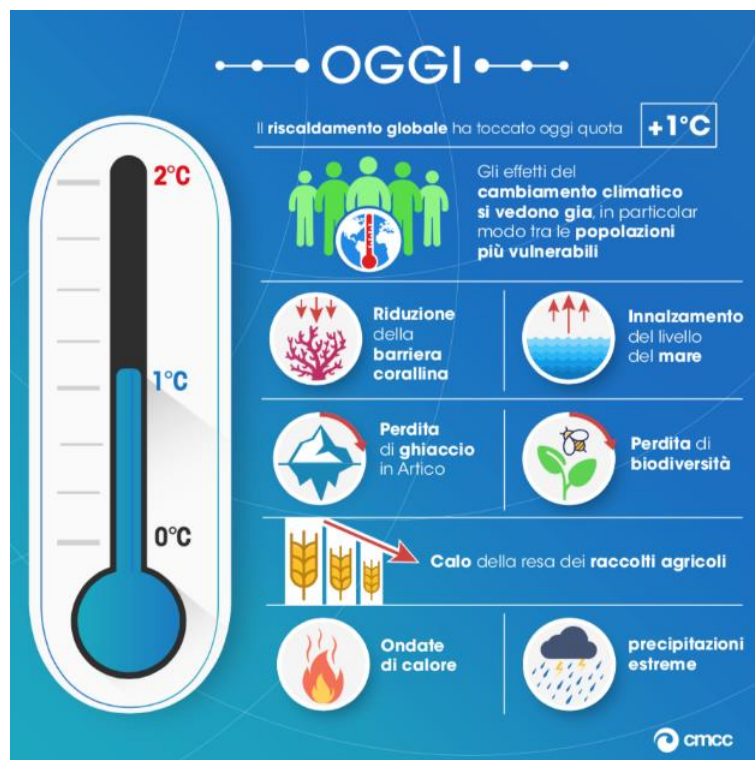
La conseguenza principale di questo fenomeno è che la temperatura della Terra è ora più calda di 1,1 °C rispetto al secolo precedente, accompagnata da una serie di disastri ambientali sempre più frequenti, tra cui siccità, incendi, innalzamento del livello del mare, inondazioni e scioglimento dei ghiacci polari. Riuscire a limitare l'innalzamento delle temperature a 1,5 °C eviterebbe il verificarsi degli effetti climatici più dirompenti.

Per questo, l'essere umano ha iniziato a elaborare strategie e tecnologie che permettano di invertire questo trend. Il concetto che riassume tutto ciò è quello della

"transizione energetica". Con questo termine si intende il profondo mutamento del panorama globale nel settore dell'energia, caratterizzato dallo spostamento dei sistemi di produzione e consumo da fonti tradizionali basate su combustibili fossili, come petrolio, gas naturale e carbone, a risorse energetiche rinnovabili come energia eolica e solare.

Figura 1.3

Effetti del riscaldamento globale



Fonte: IPCC Italia (2018)

È essenzialmente un cambiamento dal ricorso a fonti di produzione non rinnovabili a energie rinnovabili, ritenute più efficienti e meno impattanti dal punto di vista ambientale. L'obiettivo è ridefinire l'intero sistema di produzione, distribuzione e consumo di energia, promuovendo principi come il risparmio energetico, l'economia sostenibile e l'adozione diffusa di energia verde.

L'idrogeno, con la sua versatilità straordinaria, emerge come un protagonista chiave nella transizione verso fonti energetiche sostenibili. La sua adattabilità si manifesta principalmente ricoprendo il ruolo di “vettore energetico”.

Con vettore energetico si intende “[...] un composto in grado di trasferire l'energia: in altre parole, questo permette di accumulare l'energia proveniente da una fonte energetica esterna, sia essa primaria che secondaria⁴, e di trasferirla nel tempo, rilasciandola poi al momento opportuno” (IBT Group, 2022).

3. Evoluzione dell'interesse per l'idrogeno

Nel giugno del 2019, su indicazione del G20 sotto la presidenza del Giappone, l'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA) ha pubblicato un rapporto per analizzare la situazione attuale dell'idrogeno e delinearne il percorso per lo sviluppo futuro. Questo rapporto si concentra sul percorso che accomuna l'umanità e l'utilizzo di questo elemento, con particolare attenzione al 2018.

Viene sottolineato che la domanda di idrogeno è in continua crescita dal 1975, risultando addirittura triplicata secondo i dati riferiti al 2018. Tuttavia, l'aspetto negativo di questa tendenza è che la sua produzione deriva per una grande percentuale dall'utilizzo dei combustibili fossili generando, nel 2018, emissioni di CO_2 pari a 830 milioni di tonnellate, equiparabili a quelle prodotte dalla somma di Regno Unito e Indonesia.

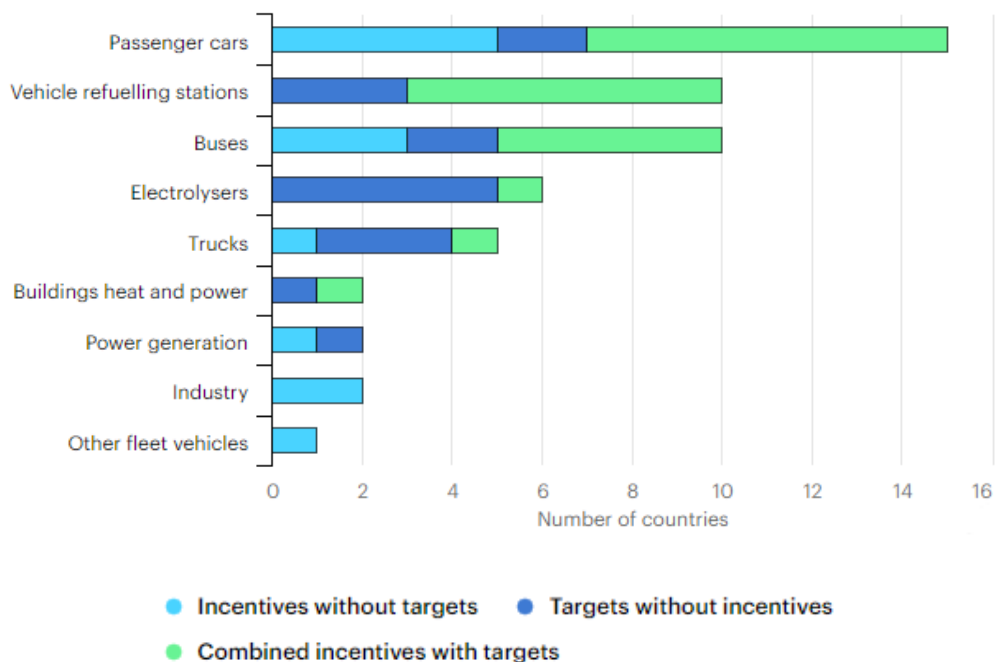
È interessante notare che, dal punto di vista geopolitico, molti stati nel mondo abbiano creato programmi per sostenere lo sviluppo e la diffusione delle tecnologie per l'utilizzo di questo elemento. Come evidenziato dalla tabella che segue (Tabella 1.4), sono stati prefissati 53 obiettivi principalmente direzionati al settore automobilistico (15 obiettivi), alle stazioni di rifornimento per veicoli (10 obiettivi) e al settore del trasporto

⁴ Le fonti energetiche primarie sono risorse naturali che esistono nella loro forma originale, come il petrolio grezzo e il gas naturale, e includono anche fonti rinnovabili come l'energia solare e idrica. Invece, le fonti energetiche secondarie sono ottenute attraverso la trasformazione delle fonti primarie. Ad esempio, la benzina è una fonte energetica secondaria poiché deriva dalla lavorazione del petrolio greggio, e l'idrogeno può essere estratto dall'acqua o da combustibili fossili, rappresentando così una fonte energetica derivata da un processo di trasformazione.

pubblico, nello specifico degli autobus. I restanti sono dedicati, per la maggior parte, al settore energetico.

Tabella 1.4

Obiettivi delineati per lo sviluppo dell'idrogeno nel 2018



Fonte: Agenzia Internazionale dell'Energia (2019)

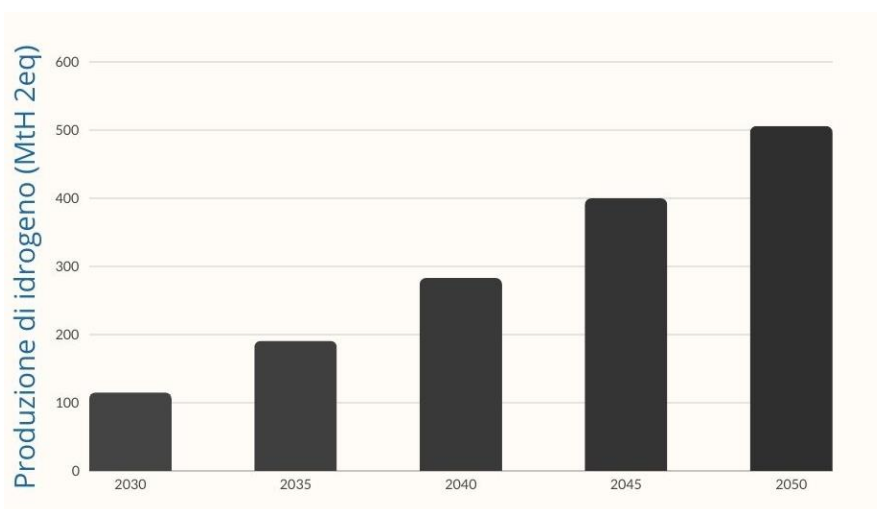
Nel 2018 si stimava che il gas naturale fosse la fonte primaria nella produzione di idrogeno, rappresentando addirittura i tre quarti del totale di idrogeno prodotto globalmente. Questa situazione ha portato a squilibri economici, con paesi importatori di gas naturale che hanno risentito di costi maggiori rispetto a paesi con prezzi inferiori all'acquisto, come gli USA e la Russia, che hanno avuto minori difficoltà nello sviluppare infrastrutture e politiche finalizzate allo sfruttamento dell'idrogeno.

Negli ultimi anni, secondo le previsioni anche nei decenni a seguire, un trend positivo è emerso grazie alla riduzione dei costi dell'elettricità rinnovabile. L'idrogeno verde, prodotto da fonti energetiche sostenibili, sta attirando sempre più interesse a livello globale. Tuttavia, la quantità di energia necessaria per la sua produzione, misurata in

TWh⁵, risulterebbe eccessiva rispetto alle attuali disponibilità di energia da fonti rinnovabili: se l'intero approvvigionamento mondiale di idrogeno dovesse derivare dall'energia elettrica, sarebbe richiesto più del doppio della produzione energetica dell'Unione Europea.

Tabella 1.5

Produzione di idrogeno verde dal 2030 al 2050



Fonte: deloitte.wsj.com (2023)

Secondo il rapporto dell'IEA, l'idrogeno, nonostante venga utilizzato in molti settori, non è ancora sfruttato appieno come protagonista nella transizione energetica; questo perché la sua diffusione presenta numerosi ostacoli legati, per esempio, all'elevato costo di produzione utilizzando fonti di energia a bassa emissione di CO_2 , un ritmo lento di sviluppo e diffusione di infrastrutture dedicate a questo elemento, al ritmo lento di sviluppo delle infrastrutture dedicate e alle enormi emissioni di CO_2 associate alla sua produzione da gas naturale o carbone oppure un apparato normativo inadeguato che ne limita lo sviluppo.

⁵ Il Wh è l'unità di misura dell'energia elettrica; nello specifico, TWh è l'abbreviazione di terawattora, cioè un multiplo del Wh.

L’Agenzia Internazionale dell’Energia, nel 2019, ha affermato che: *“la cooperazione internazionale è vitale per accelerare la crescita dell'idrogeno pulito e versatile. se i governi lavorassero in modo coordinato, questo potrebbe aiutare a stimolare gli investimenti in fabbriche e infrastrutture che ridurrebbero i costi e consentirebbero la condivisione di conoscenza e di migliori pratiche.”*⁶.

Alla luce di questo pensiero, l’IEA suggerisce sette raccomandazioni per incentivare l’adozione dell’idrogeno.

La prima riguarda l'inserimento dell'idrogeno nelle strategie energetiche a lungo termine di nazioni, regioni, comuni e aziende. In secondo luogo, si dovrebbe stimolare la domanda di idrogeno pulito per creare un sistema che supporti una maggiore efficienza dell'intera filiera produttiva. Si suggerisce anche di attuare politiche di supporto per gli investitori che finanziano con enormi rischi i *“first mover”*⁷ del settore dell'idrogeno e coloro che si dedicano alla ricerca e sviluppo di nuove tecnologie per ridurre i costi. Un altro aspetto fondamentale riguarda l'armonizzazione e standardizzazione dell'apparato normativo nei diversi mercati e il monitoraggio costante dei progressi in riferimento agli obiettivi prefissati.

Infine, vengono identificati quattro punti chiave ritenuti fondamentali per gettare le basi dello sviluppo di questo settore nel prossimo decennio. Questi punti si concentrano sul rendere idonei allo stoccaggio di idrogeno i già presenti porti industriali, sfruttare le infrastrutture del gas per gli approvvigionamenti di idrogeno, sviluppare motori a celle a combustibile competitivi per il settore del trasporto merci e identificare nuove rotte marittime al fine di incentivare la distribuzione internazionale dell’idrogeno.

⁶ Traduzione del testo contenuto al seguente link: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>

⁷ Con first mover ci si riferisce ad un soggetto che per primo entra in un nuovo mercato o settore ottenendo un vantaggio competitivo

Capitolo II

Produzione di idrogeno

1. Introduzione

Secondo un articolo del 2022 su *Elettricomagazine*, la produzione di idrogeno è principalmente legata a fonti fossili, costituendo circa il 98% del totale. Un rapporto del 2019 della *International Energy Agency* (IEA) evidenzia che il gas naturale, responsabile dell'idrogeno grigio, è la fonte preponderante tra le fossili, contribuendo per tre quarti alla produzione mondiale annuale di idrogeno, pari a 70 milioni di tonnellate e corrispondente al 6% del consumo globale annuo di gas naturale.

Il gas naturale è seguito dal carbone, particolarmente rilevante in Cina, contribuendo a circa un quarto della produzione totale di idrogeno, noto come idrogeno marrone. La quota rimanente si divide tra l'idrogeno blu, rappresentante circa l'1.5%, e l'idrogeno verde, costituente circa lo 0.5%.

Figura 2.1

La classificazione dell'idrogeno in colori

	IDROGENO MARRONE	IDROGENO GRIGIO	IDROGENO BLU	IDROGENO TURCHESE	IDROGENO GIALLO	IDROGENO ROSA	IDROGENO VERDE
PROCESSO	Gassificazione	Steam reforming	Steam reforming o gassificazione con CCUS	Pirolisi	Elettrolisi	Elettrolisi	Elettrolisi
FONTE ENERGETICA	Carbone	Gas metano	Gas metano Carbone	Gas metano	Energia elettrica dalla rete	Energia elettrica nucleare	Energia elettrica rinnovabile

Fonte: elettricomagazine.it (2022)

Questi dati sottolineano che la transizione verso una produzione di idrogeno completamente basata sull'idrogeno verde, caratterizzata da un impatto ambientale zero, è ancora un obiettivo distante.

Nonostante ciò, va notato che la produzione corrente di idrogeno contribuisce al 2,2% delle emissioni globali di gas serra, superando persino le emissioni del settore dell'aviazione. Tuttavia, l'adozione diffusa dell'idrogeno verde potrebbe portare a una riduzione del 20% delle emissioni globali di carbonio.

2. L'idrogeno “marrone” e la gassificazione

“In generale, il processo di gassificazione consiste nella parziale ossidazione¹, non catalitica, di una sostanza solida, liquida o gassosa che ha l'obiettivo finale di produrre un combustibile gassoso, formato principalmente da idrogeno, ossido di carbonio e da idrocarburi leggeri come il metano” (Chiacchierini, 1992).

Quindi, la gassificazione è un processo che coinvolge la trasformazione di una sostanza solida, liquida o gassosa attraverso una reazione di parziale ossidazione. L'obiettivo finale di questo processo è produrre un combustibile gassoso. Nel caso specifico, il risultato principale è ottenere un gas che contiene principalmente idrogeno, ossido di carbonio e idrocarburi leggeri come il metano.

La gassificazione al fine di ottenere idrogeno “marrone” può essere realizzata attraverso tre metodi distinti: “*entrained-bed*” (letto trascinato), “*fixed-bed*” (letto fisso) e “*fluidized-bed*” (letto fluidificato). Questi approcci, nel processo di ossidazione parziale, utilizzano aria, ossigeno o vapore.

Il processo “*entrained-bed*” si svolge a temperature superiori a 1260 °C e produce un prodotto composto principalmente da carbonio e idrogeno. Ciò che rende unico questo

¹ L'ossidazione è una reazione chimica in cui un elemento o una sostanza, a causa l'aggiunta di ossigeno, la rimozione di idrogeno o il trasferimento di elettroni in generale, perde elettroni. Un esempio comune di ossidazione è il processo di arrugginimento del ferro, in cui il ferro perde elettroni in presenza di ossigeno e acqua.

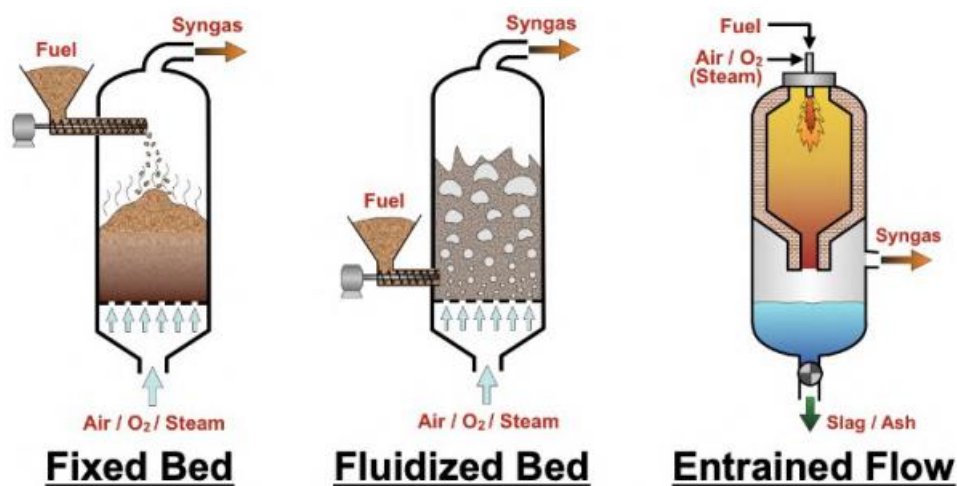
metodo è la sua capacità di eliminare i prodotti "devolatilizzati"² dal combustibile gassoso che risulta alla fine del processo.

Il "*fixed-bed*", al contrario, produce un combustibile gassoso che contiene i prodotti "devolatilizzati" come metano, idrocarburi liquidi e altre sostanze. Durante questo processo, si raggiungono temperature comprese tra 425 e 650 °C.

Infine, il "*fluidized-bed*" rappresenta una via di mezzo rispetto ai due metodi precedenti. Il gas ottenuto ha una composizione intermedia, e le temperature del processo sono moderate, comprese tra 925 e 1040 °C.

Figura 2.2

Tipologie di gassificatori



Fonte: energy.gov

Durante questo processo, si generano impurità come ceneri, ossidi di zolfo e ossidi di azoto. Sistemi in fase di sviluppo, noti come sistemi a caldo, o quelli più consolidati e

² Con il termine "devolatilizzazione" ci si riferisce al processo di rimozione dei composti volatili da una sostanza. Le "sostanze volatili" si riferiscono a sostanze chimiche che hanno una bassa temperatura di ebollizione e quindi tendono a vaporizzarsi o evaporare facilmente a temperature ambiente.

in uso da diversi anni, noti come sistemi a freddo, vengono impiegati per separare queste impurità dal gas prodotto.

In termini più semplici, la gassificazione è il procedimento in cui il carbone viene trasformato in combustibili gassosi, successivamente purificati e infine utilizzati come carburante in processi chimici o nella produzione di fertilizzanti sotto forma di un gas combustibile chiamato “syngas³”.

La gassificazione rappresenta una tecnologia che implica costi considerevoli, tanto da essere classificata tra i processi più dispendiosi, insieme all'elettrolisi. Da notare che solo il 25% del prezzo dell'idrogeno è attribuibile alla copertura del costo delle materie prime necessarie per la sua produzione.

Il carbone è una fonte di energia fossile ed è stato storicamente ampiamente utilizzato per la produzione di energia elettrica e come combustibile in molte industrie. Nonostante i problemi ambientali associati, continua ad essere ampiamente utilizzato. La Cina è stata a lungo il maggior consumatore e produttore di carbone al mondo arrivando a bruciare, ogni anno, tanto carbone quanto il resto del mondo messo assieme⁴ e, nel 2019, a contribuire quasi del 30% alle emissioni globali, pari a circa il doppio delle emissioni del secondo responsabile, gli Stati Uniti.⁵

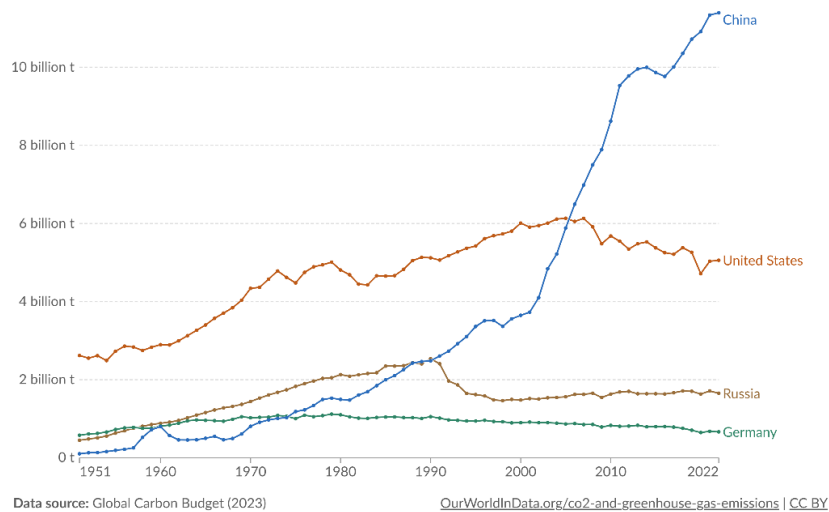
³ Syngas, o gas di sintesi, è un gas composto principalmente da monossido di carbonio (CO) e idrogeno (H₂).

⁴ Martin R., 2015, ulteriori approfondimenti all'indirizzo: <https://www.linkiesta.it/2015/08/come-risolvere-lenorme-problema-della-cina-con-il-carbone/>

⁵ De Blasio N. e Pflugmann F., 2021, ulteriori approfondimenti: <https://www.ispionline.it/it/pubblicazione/cina-superpotenza-dellidrogeno-rinnovabile-30625>

Grafico 2.3

Emissioni annue di CO_2



Fonte: ourworldindata.org (2024)

Ogni anno, secondo uno studio dell'IHME⁶, 1.2 milioni di persone in Cina perdono la vita prematuramente a causa dell'inquinamento atmosferico. Le principali città cinesi, come Pechino e Shanghai, sono caratterizzate da un cielo coperto di smog e le persone sono costrette a indossare mascherine per proteggersi dagli effetti nocivi sulla salute causati dall'elevata presenza di CO_2 nell'aria.

Il cambiamento di direzione di questo trend era essenziale. Nel 2020, il governo cinese ha dichiarato un obiettivo ambizioso: raggiungere la neutralità delle emissioni di carbonio entro il 2060. Questo impegno rappresenta una svolta di grande rilevanza sia per la Cina che per la comunità globale nel suo complesso.

Xi Jinping, il leader cinese, sta concentrando gli sforzi sulla promozione dell'uso dell'idrogeno come parte della strategia energetica della Cina. Lo stato asiatico, considera l'utilizzo del carbone come principale materia prima per la produzione di idrogeno,

⁶ Institute for health metrics and evaluation è un'organizzazione di ricerca indipendente fondata nel 2007 che si concentra sulla misurazione e sulla valutazione della salute a livello globale. L'obiettivo è fornire informazioni affidabili e basate su evidenze per supportare la formulazione di politiche sanitarie e la pianificazione delle risorse.

poiché questo approccio risulta essere economicamente vantaggioso rispetto all'utilizzo del gas naturale. Infatti, i costi associati alla realizzazione di idrogeno dal carbone sono circa il 30% inferiori rispetto a quelli derivanti dal gas naturale.

Nel 2021, sul territorio cinese, si potevano contare circa 1.000 gassificatori. Questo aumento della produzione di idrogeno è parte degli sforzi del paese per ridurre le emissioni e affrontare le sfide legate all'approvvigionamento energetico. Tuttavia, è importante notare che l'uso del carbone in questo contesto solleva grandissime preoccupazioni riguardo alle enormi emissioni di gas serra e al pessimo impatto ambientale.

3. Idrogeno “grigio” e lo *steam reforming* (SMR)

Lo *steam methane reforming* (SMR) è il metodo di produzione di idrogeno su base di combustibili fossili, nello specifico di gas metano, più sfruttato a livello industriale e questo rende l'idrogeno grigio il tipo di idrogeno più prodotto al mondo.

Tre metodologie possono essere implementate con il modello SMR. La più comune coinvolge la reazione tra il gas metano e il vapore acqueo, manifestandosi attraverso un processo endotermico⁷. Gli altri due approcci risultano meno diffusi, il primo impiega l'ossigeno come reagente, noto come "ossidazione parziale" si verifica tramite un processo esotermico⁸. Il secondo, denominato "reforming autotermico", combina i due processi precedenti in sequenza, risultando in una condizione isoterma⁹.

Nello specifico, il primo processo, nonché quello più diffuso, inizia con il metano, il principale componente del gas naturale, e il vapore acqueo. Questi reagenti vengono portati a temperature elevate, tipicamente tra 700 e 1.000°C, in presenza di un

⁷ Il termine "endotermico" si riferisce a un processo o a una reazione chimica in cui il sistema assorbe calore dall'ambiente circostante, il che può portare a una diminuzione della sua temperatura.

⁸ Il termine "esotermico" si riferisce a un processo o a una reazione chimica in cui il sistema rilascia calore nell'ambiente circostante, il che può portare a un aumento della sua temperatura.

⁹ Il termine "isotermico" si riferisce a una condizione in cui la temperatura di un sistema rimane costante. In fisica e termodinamica, l'isoterma è una curva che rappresenta una condizione in cui la temperatura di un sistema rimane invariata durante un processo.

catalizzatore¹⁰. Durante questa reazione chimica, il metano reagisce con il vapore acqueo per formare idrogeno e biossido di carbonio.

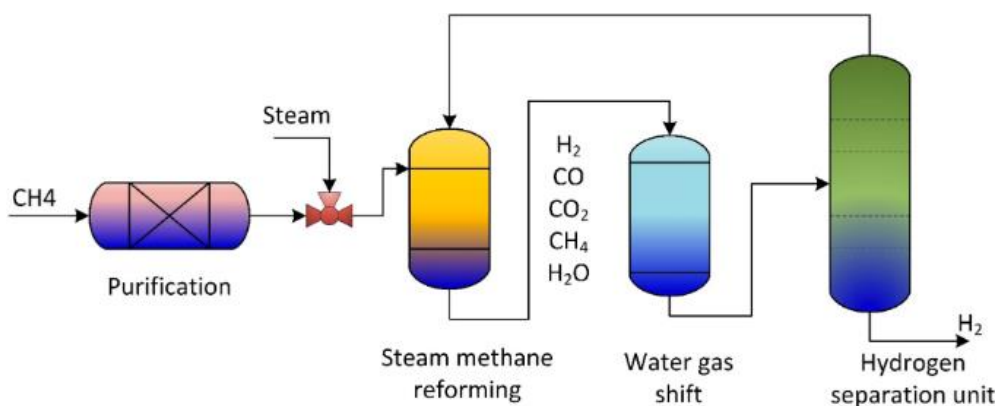
Successivamente, avviene una seconda fase chiamata “*shift reaction*”, nella quale il monossido di carbonio può reagire ulteriormente con il vapore acqueo attraverso il processo di trasformazione ad acqua per produrre più idrogeno e biossido di carbonio.

“Il contenuto energetico dell'idrogeno prodotto è, attualmente, più elevato di quello del metano utilizzato ma l'enorme quantità d'energia richiesta per il funzionamento degli impianti fa scendere il rendimento del processo a circa 65%” (Morgan e Sissine, 1995¹¹).

Il gas risultante è una miscela di idrogeno, biossido di carbonio e monossido di carbonio, e può essere ulteriormente purificato per rimuovere le impurità, inclusa la CO_2 , prima dell'uso finale.

Figura 2.4

Schema di un tradizionale impianto di reformazione del metano per la produzione di idrogeno



Fonte: mdpi.com

¹⁰ Un catalizzatore è una sostanza che accelera la velocità di una reazione chimica senza subire alcuna alterazione chimica permanente durante il processo. Il suo ruolo è quello di abbassare l'energia di attivazione richiesta per far avvenire la reazione. Nel caso del processo di steam methane reforming si parla di nichel o altri materiali attivi.

¹¹ Citazione riportata dal seguente link: <https://www.energoclub.org/page/steam-reforming>

Lo *steam reforming* è ampiamente utilizzato a causa della sua efficienza, i costi risultano nettamente inferiori rispetto a quelli dell'elettrolisi ma anche competitivi rispetto ad altri metodi di produzione tramite combustibili fossili, e della disponibilità di materie prime. Tuttavia, va notato che questo processo comporta la produzione di CO_2 , contribuendo quindi alle emissioni di gas serra, e si stanno esplorando alternative più sostenibili, come l'idrogeno verde prodotto tramite elettrolisi alimentata da energia rinnovabile o l'idrogeno blu.

Questa tecnologia è utilizzata al fine della produzione di idrogeno su larga scala. *“Un reformer di metano di livello mondiale può produrre 200 milioni di piedi cubi standard (MSCF¹²) di idrogeno al giorno. Questa è la quantità equivalente di idrogeno per sostenere un'area industriale o rifornire 10.000 camion. Circa 150 di questi sarebbero necessari per sostituire completamente la fornitura di gas naturale del Regno Unito, e noi usiamo il 2,1% del gas naturale del mondo”* (Pratt. G, 2022)

I problemi associati ai processi di produzione di idrogeno marrone e grigio si manifestano chiaramente, con la principale preoccupazione rappresentata dalle emissioni di CO_2 . In una prospettiva di base, la soluzione apparentemente più semplice consiste nel bruciare meno combustibile o, addirittura, eliminarlo del tutto. Tuttavia, al momento attuale, quest'ultima opzione sarebbe impraticabile in quanto comporterebbe un significativo arretramento della società, riportandola indietro di decenni.

In risposta a questa sfida, emergono due soluzioni. La prima non elimina completamente le emissioni, ma le gestisce temporaneamente, in attesa che la tecnologia della seconda soluzione diventi sufficientemente efficiente, conveniente dal punto di vista economico e diffusa su scala globale. Queste due soluzioni sono la cattura della CO_2 e l'uso dell'idrogeno verde.

¹² L'acronimo "MSCF" sta per "Mille Standard Cubic Feet", che rappresenta una misura di volume di gas naturale.

4. Idrogeno “blu” e la cattura della CO₂

L'idrogeno blu viene generato mediante il processo di riformazione del metano (SMR), al quale vengono integrate le tecnologie di cattura e stoccaggio del carbonio (CCS).

Le tecnologie di CCS¹³ hanno il compito di acquisire le emissioni di anidride carbonica generate da processi industriali o centrali elettriche, per poi trasportarle e immagazzinarle in siti geologici specializzati o altre infrastrutture apposite. L'obiettivo primario di CCS è prevenire il rilascio della CO₂ nell'atmosfera, contribuendo così a mitigare l'effetto serra.

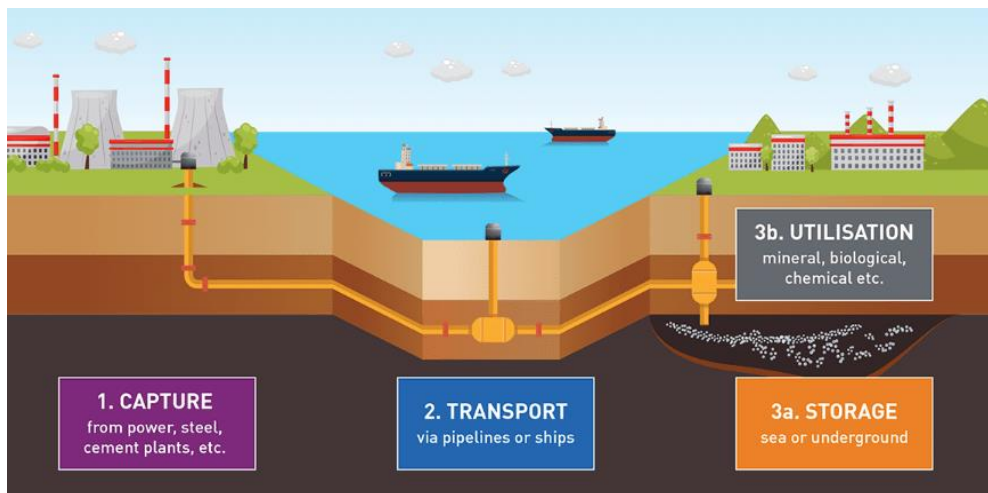
Inoltre, l'acronimo CCUS¹⁴ indica una versione estesa di CCS, che non si limita solo alla cattura e allo stoccaggio della CO₂, ma include anche la sua utilizzazione. Ciò implica che l'anidride carbonica catturata può essere impiegata in diversi settori, come la produzione di materiali, carburanti o altri composti chimici, anziché essere solamente immagazzinata.

¹³ CCS: Carbon Capture and Storage, ovvero cattura e stoccaggio del carbonio.

¹⁴ CCUS: Carbon Capture, Utilization, and Storage, cattura, stoccaggio e utilizzo del carbonio

Figura 2.5

Il processo di CCUS



Fonte: iogp.org

L'obiettivo di CCUS è trovare applicazioni pratiche e utili per la CO_2 catturata, ampliando così l'impatto positivo di questa tecnologia.

Nella maggior parte dei casi, le tecnologie di cattura vengono applicate direttamente ai gas di scarico della combustione, che includono diversi sottoprodotti, tra cui la CO_2 . La metodologia prevalente di cattura coinvolge l'impiego di solventi capaci di assorbire l'anidride carbonica dai gas di combustione, effettuando di fatto una separazione tra i due. Successivamente, la CO_2 è estratta dal solvente attraverso la loro esposizione ad alte temperature completando, così, il processo di isolamento.

Alcuni approcci avanzati nella cattura delle emissioni di anidride carbonica stanno guadagnando terreno, tra cui il metodo "oxy". Questa metodologia prevede la combustione in un ambiente ricco di ossigeno puro, eliminando l'azoto presente nell'aria. In questo modo, i gas di scarico risultano prevalentemente composti da CO_2 e vapore acqueo. Tale semplificazione agevola notevolmente la successiva cattura e separazione dell'anidride carbonica dai gas di scarico, poiché non è più necessario trattare elevate quantità di azoto.

Un altro approccio innovativo si basa sull'uso della criogenia, un processo che sfrutta la condensazione o solidificazione di vari componenti gassosi all'interno dei fumi

di scarico a temperature differenziate. In pratica, i prodotti della combustione sono raffreddati a circa $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, facendo sì che l'anidride carbonica sia la prima a solidificarsi. Questo consente una separazione efficace, con la CO_2 distinta dal rimanente gas di scarico, che rimane allo stato gassoso

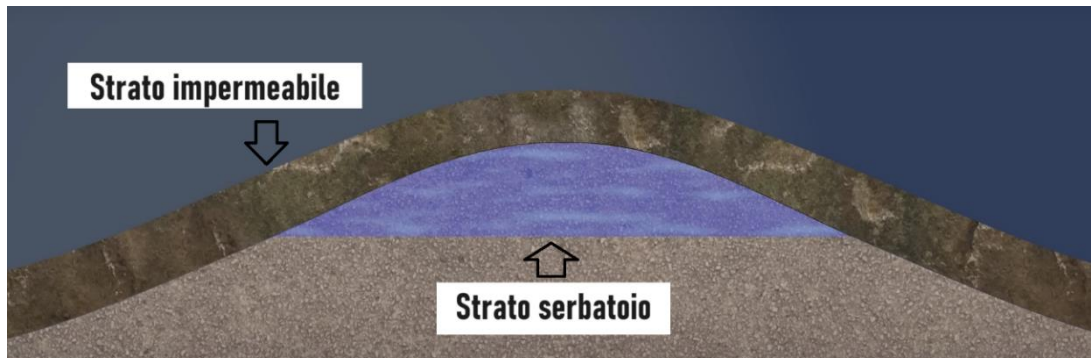
La cattura di anidride carbonica è ancora una tecnologia in evoluzione, e ci sono sfide legate ai costi e all'efficienza del processo. Infatti, per quanto riguarda l'immagazzinare la CO_2 sono previste due opzioni, la prima è conservarla in apposite infrastrutture mentre la seconda l'utilizzo di giacimenti geologici vuoti.

Innanzitutto, l'implementazione di infrastrutture comporta sfide evidenti. Dal punto di vista fisico, la richiesta di spazio diventa sempre più critica all'aumentare della necessità di depositi, rendendo sempre più complesso mantenere tutto entro certi limiti dimensionali. Inoltre, i costi legati alla gestione e manutenzione delle infrastrutture crescono progressivamente allargando la portata di tali necessità. Questi due fattori rendono molto difficile praticare questa via.

L'obiettivo, quindi, è individuare depositi sicuri in grado di contenere e stoccare l'anidride carbonica per decine di milioni di anni, a costi contenuti e con basso impatto ambientale. Tali siti esistono in natura nei giacimenti di gas naturale vuoti, in particolare nei giacimenti “profondi”, situati tra 1 e 3 chilometri di profondità dalla superficie. Questi giacimenti presentano una forma a “onda” (vedi figura 7.2) composta da uno strato serbatoio, con rocce microporose capaci di contenere il gas, e uno strato impermeabile sopra di esso, solitamente di argilla o sale, che funge da coperchio, impedendo la risalita naturale dei gas.

Figura 2.6

Rappresentazione di un “giacimento profondo”



Fonte: geopop.it

Una volta esaurito il giacimento di gas naturale, può iniziare la sua seconda vita, distinta dalla prima, attraverso l'iniezione di CO_2 tramite una tecnologia che sfrutta degli “iniettori”. Tuttavia, questa pratica comporta rischi e sfide, soprattutto in relazione alla pressione. È essenziale non superare la pressione del giacimento durante la sua prima vita, quando era pieno di gas naturale, evitando di oltrepassare le condizioni naturali e scongiurando il rischio di movimenti sismici indotti.

In Italia, a largo di Ravenna, Snam¹⁵ ed ENI stanno sviluppando il progetto "Ravenna CCS" per migliorare la sostenibilità e la competitività dei distretti industriali italiani attraverso la cattura e lo stoccaggio di anidride carbonica nei giacimenti esauriti nel Mar Adriatico. Le grandi capacità di questi siti rendono l'hub di Ravenna uno dei siti più grandi al mondo di stoccaggio della CO_2 ed il principale del Mediterraneo¹⁶.

Questo progetto, diviso in fasi, inizia nel 2024 con l'obiettivo di catturare 25mila tonnellate di CO_2 dalla centrale Eni e iniettarle nei giacimenti. La fase industriale, a partire

¹⁵ Snam è una società specializzata nell'infrastruttura energetica, con un focus particolare sul gas naturale. Gestisce una vasta rete di gasdotti e infrastrutture di stoccaggio del gas naturale. Snam svolge un ruolo chiave nella trasmissione e distribuzione del gas naturale in Italia e in Europa. La sua rete di gasdotti è una delle più estese e avanzate del continente.

¹⁶Fonte:

<https://eni.com/ravenna-ccs/it-IT/progetto/ravenna-hub.html#:~:text=I%20numeri%20del%20progetto&text=Nella%20Fase%20industriale%2C%20dal%202026,Ravenna%20e%20del%20Nord%20Italia.>

dal 2026, mira a stoccare 4 milioni di tonnellate di CO_2 , equivalenti all'1,22% delle emissioni totali prodotte dall'Italia.

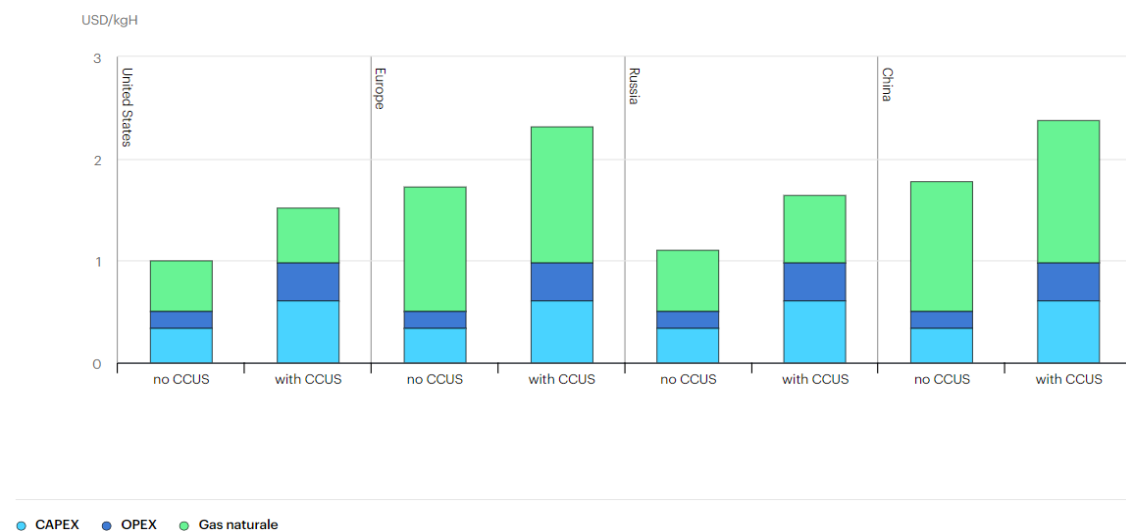
La capacità complessiva dei giacimenti è stimata in 500 milioni di tonnellate, equivalente a dieci volte le emissioni annuali di CO_2 prodotte da 400 milioni di auto diesel Euro 6, ovvero dieci volte il numero attuale di auto in circolazione in Italia. A partire dal 2030, la capacità dei giacimenti permetterà di incrementare lo stoccaggio a 16 o più milioni di tonnellate all'anno, in base alle richieste del mercato.

L'idrogeno blu, nonostante le sue prospettive interessanti, presenta aspetti critici che meritano approfondimento.

Nel rapporto del 2019, l'IEA ha analizzato i costi di produzione dell'idrogeno blu e grigio nel 2018, con un focus su quelli sostenuti in particolari aree geografiche (grafico 8.2).

Grafico 2.7

Costi di produzione dell'idrogeno utilizzando il gas naturale in regioni selezionate, 2018



Fonte: iea.org (2018)

Emergono notevoli variazioni nei costi a seconda dell'area geografica considerata, ma un dettaglio intrigante emerge. Per quanto riguarda i CAPEX¹⁷ e gli OPEX¹⁸, risultano uniformi per tutte le regioni, con la sola distinzione tra i processi con e senza cattura di CO₂. Nei processi senza cattura di anidride carbonica, i CAPEX ammontano a 0.34 USD/kgH, mentre gli OPEX sono di 0.17 USD/kgH. Al contrario, nelle produzioni con CCUS, i CAPEX salgono a 0.61 USD/kgH, e gli OPEX a 0.37 USD/kgH. Dunque, la variabile che influisce sui costi totali della produzione di idrogeno in entrambe le modalità è il prezzo del gas naturale.

Nonostante si possa pensare che la Russia sia il principale produttore di gas naturale al mondo, in realtà si posiziona al secondo posto. Nel 2020, su una produzione globale di 4014 bcm¹⁹, gli USA si collocano al primo posto con una produzione di 949 bcm, rappresentando il 24% del totale mondiale. La Russia segue con 722 bcm, pari all'18% del totale mondiale.

Essendo gli USA e la Russia i principali produttori mondiali di gas naturale, risulta ovvio che in questi paesi la produzione di idrogeno sia meno costosa. Infatti, i costi indicati nel grafico 7.2 sono rispettivamente di 0.49 USD/kgH²⁰ e 0.60 USD/kgH per la produzione senza CCUS, e 0.54 USD/kgH e 0.66 USD/kgH con CCUS. Al contrario, i paesi importatori, come la Cina e i paesi europei, subiscono costi notevolmente più elevati: 1.27 USD/kgH e 1.22 USD/kgH per la produzione senza CCUS, e 1.34 USD/kgH e 1.4 USD/kgH per la produzione con cattura di anidride carbonica

In coerenza con i dati ottenuti dal rapporto IEA sui costi della produzione di idrogeno grigio con CCUS per USA e Russia (1.52 e 1.64 USD/kgH, rispettivamente), un

¹⁷ I CAPEX (Capital Expenditures - Spese di Capitale) sono le spese di capitale che si riferiscono agli investimenti significativi fatti da un'azienda per acquisire, migliorare o estendere gli asset a lungo termine. Gli investimenti di CAPEX hanno un impatto a lungo termine sulle capacità operative e sulla redditività dell'azienda.

¹⁸ Gli OPEX (Operating Expenses - Spese Operative) sono le spese operative che si riferiscono ai costi associati alle attività quotidiane necessarie per mantenere in funzione un'azienda. Sono spese correnti e ricorrenti che una società sostiene per svolgere le sue normali operazioni e mantenerne la produttività.

¹⁹ Con bcm si intende l'abbreviazione di "billion cubic meters" in inglese, che tradotto in italiano significa "miliardo di metri cubi". Viene utilizzato come unità di misura per quantificare il volume di gas naturale o di altre sostanze gassose. Un bcm rappresenta quindi un miliardo di metri cubi di gas.

²⁰ USD/kgH significa "dollari statunitensi per chilogrammo di idrogeno". È un'unità di misura utilizzata per indicare il costo della produzione di idrogeno, espressa in dollari statunitensi per ogni chilogrammo di idrogeno prodotto.

articolo di Pratt G. del 2022 sottolinea che il costo stimato per la produzione di idrogeno blu è di circa 1,50 dollari per chilogrammo, inferiore del 50% rispetto a quello dell'idrogeno verde. La convenienza economica è influenzata anche dal prezzo del gas naturale, che nel 2022 ha raggiunto due picchi notevoli: 8.145 dollari a maggio e 9.127 dollari ad agosto. Tuttavia, attualmente, i prezzi sono molto più abbordabili, arrivando a 2.132 dollari nel gennaio 2024²¹. Ciò posiziona l'idrogeno blu come opzione più vantaggiosa rispetto alla sua controparte verde, che mira a zero emissioni di anidride carbonica.

Dal punto di vista delle emissioni di CO_2 , Pratt G. fa riferimento a uno studio di ricercatori statunitensi che analizza l'impatto ambientale dell'estrazione e combustione del gas naturale, confrontandolo con l'intero ciclo di vita dell'idrogeno blu. L'efficienza delle tecnologie coinvolte rende l'estrazione e l'utilizzo diretto del gas naturale come combustibile più sostenibile del 20% rispetto a tutti i passaggi necessari per la produzione, il trasporto, lo stoccaggio e l'utilizzo dell'idrogeno blu.

È importante considerare anche che il processo produttivo dell'idrogeno blu richiede un notevole dispendio di energia, principalmente da gas metano. Secondo i dati forniti da Pratt G., solo il 70-75% del calore potenziale presente nel gas naturale all'inizio del processo rimane effettivamente nel prodotto idrogeno. Ciò implica che, nel caso in cui l'idrogeno venisse utilizzato per riscaldare un edificio, sarebbe necessario il 25% in più di gas naturale rispetto a quello utilizzato direttamente per il riscaldamento.

Per concludere, l'idrogeno blu si distingue per notevoli vantaggi in termini di costi e riduzione delle emissioni di CO_2 rispetto all'idrogeno verde. Tuttavia, emergono sfide evidenti, come l'efficienza energetica del processo produttivo e l'impatto ambientale complessivo. Ciò rende cruciale l'integrazione di questo tipo di processo durante la transizione verso una produzione completamente basata sull'idrogeno verde, in attesa di miglioramenti nell'efficienza e nella riduzione dei costi del processo produttivo di quest'ultimo.

²¹ Dati estratti dal seguente link: <https://it.investing.com/commodities/natural-gas>

5. Idrogeno “verde” e l’elettrolisi dell’acqua

La produzione di idrogeno verde coinvolge generalmente il processo di elettrolisi dell'acqua, un metodo che utilizza l'energia elettrica per separare le molecole d'acqua (H₂O) nei loro componenti fondamentali: idrogeno (H₂) e ossigeno (O₂). Secondo i dati riportati da Rodriguez R. L. nel 2023, questo processo costa circa 3-7 dollari al kg con un'efficienza vicina all'80%.

Nel processo produttivo si utilizza un dispositivo chiamato elettrolizzatore, che è costituito da due elettrodi immersi in acqua, uno è il catodo, caricato negativamente, e l'altro è l'anodo, caricato positivamente. Gli elettrodi sono solitamente realizzati in materiale conduttivo, come platino, e vengono posti in una soluzione di acqua e elettrolita²².

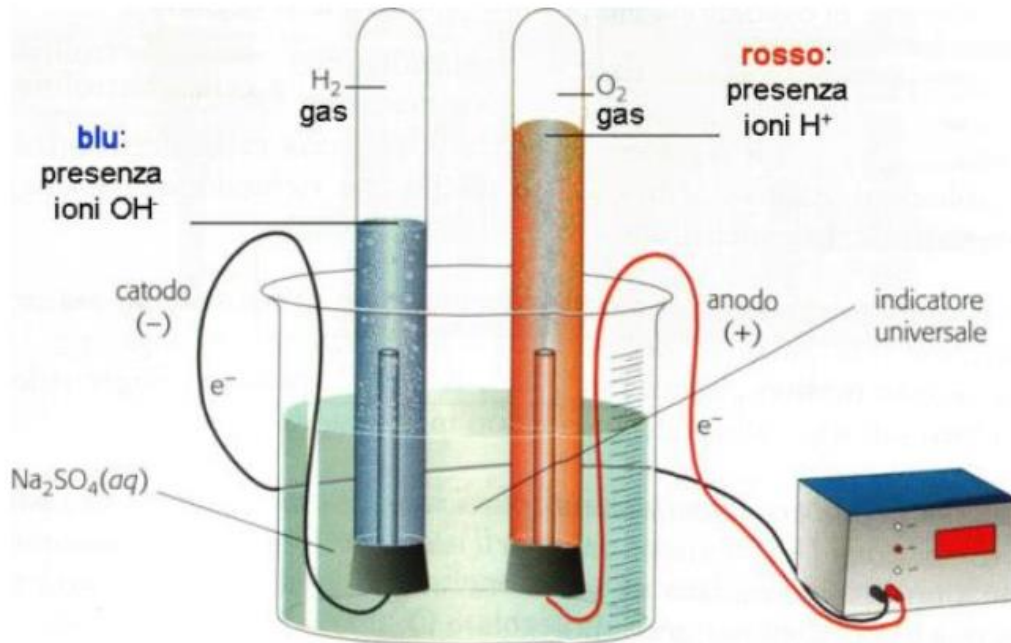
Per alimentare l'elettrolizzatore, si utilizza elettricità proveniente da fonti rinnovabili come l'energia solare o eolica. Questo è ciò che rende "verde" il processo, poiché l'elettricità utilizzata è priva di emissioni di carbonio.

Quando l'elettrolizzatore è alimentato, l'elettricità fluisce attraverso l'acqua. Nel processo, l'acqua si decompone in idrogeno e ossigeno. Il primo viene raccolto e mentre il secondo può anche essere rilasciato in atmosfera.

²² L'elettrolita è una sostanza che, in determinate forme, può condurre l'elettricità. Nel contesto della produzione di idrogeno verde mediante elettrolisi, l'elettrolita è utilizzato con lo scopo di facilitare la separazione dell'acqua in idrogeno e ossigeno.

Figura 2.8

Rappresentazione di un elettrolizzatore



Fonte: energoclub.org

L'idrogeno verde è considerato sostenibile poiché l'intero processo non produce emissioni di carbonio, a condizione che l'elettricità utilizzata provenga da fonti rinnovabili. Questo lo rende una risorsa cruciale nella transizione verso un'economia a basse emissioni di carbonio.

Ovviamente, anche questo modello di produzione presenta delle sfide e delle problematiche. Secondo Rodriguez R. L., queste sarebbero principalmente tre.

La prima riguarda il rischio ad un'adozione precoce. Con questa affermazione si riferisce al rischio associato all'adozione anticipata della produzione di idrogeno verde. La "curva di costo dell'idrogeno verde" si riferisce alla relazione tra la capacità di produzione di idrogeno e i relativi costi. L'inclinazione della curva indica quanto i costi diminuiscano all'aumentare della capacità produttiva.

Il rischio di investimento sorge dal fatto che, con l'adozione precoce, ogni nuova unità di capacità aggiuntiva per la produzione di idrogeno tende a generare idrogeno a

costi inferiori. Questo mette a rischio le capacità preesistenti, che potrebbero trovarsi in una posizione meno competitiva sulla curva dei costi. In altre parole, le installazioni già esistenti potrebbero diventare meno competitive in termini di costi rispetto alle nuove strutture, che beneficiano dei progressi tecnologici e dell'apprendimento derivante dall'esperienza.

La diffidenza negli investimenti potrebbe derivare dalla consapevolezza che le tecnologie e i processi legati alla produzione di idrogeno verde sono ancora in evoluzione e che l'adozione precoce potrebbe comportare il rischio di essere superati da tecnologie più avanzate e costi più bassi nel breve termine. Gli investitori potrebbero preferire aspettare che la tecnologia si sviluppi ulteriormente e i costi diminuiscano prima di impegnarsi in modo significativo.

Come seconda principale problematica identifica l'incertezza legata alle prospettive della domanda futura e l'assenza di un mercato strutturato senza infrastrutture adeguate.

La richiesta di idrogeno verde in futuro è incerta. Poiché questa tecnologia è ancora in fase di sviluppo e l'adozione a livello globale non è ancora ampia, è difficile prevedere con precisione quanto sarà la domanda futura di idrogeno verde. Questa incertezza può scoraggiare gli investimenti e la crescita del settore.

Inoltre, attualmente, mancano strutture di mercato ben definite e infrastrutture di distribuzione e stoccaggio per l'idrogeno verde. Questo crea difficoltà sia per le aziende del settore che per i governi. Senza un mercato stabile e infrastrutture adeguate, è più difficile sviluppare progetti di produzione su larga scala e garantire una distribuzione efficace dell'idrogeno verde.

Infine, attualmente, l'idrogeno, soprattutto quello prodotto attraverso processi non sostenibili come il grigio e il blu, ha un costo più elevato rispetto ai combustibili tradizionali ad alta emissione di carbonio come il carbone o il gas naturale. Questo rende l'idrogeno meno competitivo sul mercato dell'energia.

La regolamentazione riguardante le emissioni prodotte durante la generazione di idrogeno non è ancora ben definita. Questo crea incertezza sia per le aziende del settore che per i governi, che devono ancora stabilire standard e normative chiare per la produzione e l'uso dell'idrogeno.

Sebbene l'idrogeno grigio e blu non siano considerati soluzioni sostenibili a lungo termine a causa delle loro emissioni di carbonio, sono comunque visti come passi necessari per sviluppare l'intera catena del valore economica dell'idrogeno. Questo significa che, nonostante i loro svantaggi, ad oggi, possono ancora svolgere un ruolo transitorio nell'introduzione e nell'adozione dell'idrogeno come fonte energetica alternativa.

Dunque, nonostante l'idrogeno grigio e blu non siano soluzioni a lungo termine, sono ancora ritenuti necessari per costruire l'infrastruttura e l'adozione dell'idrogeno come fonte energetica alternativa, mentre si lavora per sviluppare soluzioni più sostenibili.

Nonostante le attuali emissioni di anidride carbonica generate dal settore produttivo dell'idrogeno siano equiparabili a quelle dell'industria dell'aviazione, costituendo il 2,2% delle emissioni globali di gas serra, l'idrogeno verde emerge come una svolta cruciale verso una società senza emissioni. Questa prospettiva si basa sulla sua capacità di ridurre del 20% le emissioni globali di CO_2 .

Tuttavia, il principale ostacolo in questo percorso è rappresentato dai costi di produzione, principalmente legati al prezzo degli elettrolizzatori ma le prospettive sono incoraggianti. Nel recente quinquennio, i prezzi di tali dispositivi si sono abbattuti del 50%, e le previsioni indicano che questa tendenza potrebbe persistere fino al 2030, con una prospettiva di ulteriore riduzione compresa tra il 40% e il 60%.

6. Idrogeno “rosa” e l’energia nucleare

L'idrogeno rosa è ottenuto attraverso un processo simile a quello dell'idrogeno verde utilizzando l'elettrolizzatore. La differenza principale risiede nell'approvvigionamento dell'energia elettrica necessaria al processo produttivo: a differenza dell'idrogeno verde, che si basa su fonti rinnovabili come il solare o l'eolico, l'idrogeno rosa attinge l'energia da fonti nucleari.

Il processo di produzione di energia nucleare comprende due principali approcci: la fissione nucleare e la fusione nucleare.

La fissione nucleare è un processo in cui i nuclei di elementi pesanti, come l'uranio o il torio, si rompono in due frammenti più leggeri quando vengono colpiti da neutroni. Questa rottura rilascia energia e altri neutroni che possono a loro volta causare ulteriori rotture in una reazione a catena, producendo energia in modo costante in un reattore nucleare.

D'altra parte, la fusione nucleare è il processo che si verifica nel sole e nelle stelle, in cui due nuclei di elementi leggeri, come deuterio e trizio, si uniscono per formare nuclei più pesanti, come l'elio, rilasciando una grande quantità di energia.

In breve, la fissione è la rottura di nuclei pesanti, mentre la fusione è l'unione di nuclei leggeri, entrambe processi che generano energia²³.

L'energia nucleare non è diffusa in tutti i paesi del mondo, e la sua storia è caratterizzata da momenti tumultuosi. Le prime teorie legate a questa forma di energia risalgono ai primi anni del Novecento, culminando nel 1939 con la creazione del progetto Manhattan negli Stati Uniti. Inizialmente, l'impiego di questa forma di energia era finalizzato a scopi bellici, con il progetto Manhattan che portò alla creazione della bomba nucleare durante la Seconda guerra mondiale.

Dopo il conflitto, l'attenzione si spostò dalla produzione di armi all'utilizzo pacifico dell'energia nucleare. La prima centrale nucleare fu costruita nel 1954 in Unione Sovietica, dando inizio a un periodo di costruzione di numerose altre centrali negli anni '50 e '60 per rispondere alla crescente domanda energetica mondiale.

Gli anni '70 segnarono il primo intoppo con l'incidente di "*Three Mile Island*" negli Stati Uniti nel 1979, causato da un malfunzionamento del sistema di raffreddamento di un reattore. Nonostante la maggior parte delle emissioni radioattive fosse confinata all'interno dell'edificio del reattore, una piccola quantità di gas radioattivi fu rilasciata nell'atmosfera senza causare danni diretti o indiretti alla popolazione.

²³ Ulteriori approfondimenti alla seguente pagina web: <https://www.mase.gov.it/pagina/fissione-e-fusione-nucleare#:~:text=La%20fissione%20nucleare%20%C3%A8%20un,allontanandosi%20con%20elevata%20energia%20cinetica.>

Il secondo e più grave incidente si verificò a Chernobyl, in Unione Sovietica, nel 1986. Un surriscaldamento incontrollato del nocciolo del reattore portò a un'esplosione che rilasciò quantità massicce di materiali radioattivi nell'atmosfera e nell'ambiente circostante. Successivamente, si sviluppò un incendio con ulteriori ripercussioni sul territorio che circondava la centrale. L'incidente di Chernobyl causò elevate emissioni radioattive, superando di gran lunga quelle di tutti gli altri incidenti nucleari.

Il rilascio di radiazioni ha avuto conseguenze devastanti sulla salute umana e ambientale. Molti soccorritori e lavoratori coinvolti nelle operazioni di emergenza sono stati esposti a dosi letali di radiazioni. Inoltre, vaste aree sono state contaminate dalle radiazioni, influenzando l'agricoltura, la fauna selvatica e la vita quotidiana delle persone nella regione. Le radiazioni si sono diffuse a livello globale, con particelle radioattive che sono state rilevate in molte parti del mondo.

Le problematiche legate all'energia nucleare, accentuate dagli incidenti catastrofici come quelli verificatisi a *Three Mile Island*, Chernobyl e Fukushima, hanno innescato una diffusa preoccupazione a livello globale. In risposta, alcuni paesi, tra cui Italia e Germania, hanno optato per la chiusura di tutte o una parte delle loro centrali nucleari, motivati da rischi e sfide intrinseche a questa forma di produzione energetica.

Le criticità associate all'energia nucleare includono non solo il rischio di incidenti catastrofici, ma anche questioni quali l'esaurimento limitato della materia prima, l'uranio, la generazione di rifiuti radioattivi a lunga durata e gli elevati costi e tempi di costruzione delle centrali nucleari.

Tuttavia, in ambito di produzione di idrogeno e transizione energetica, si osserva un crescente interesse e progressi. Alcuni vantaggi evidenziati riguardano la produzione di elettricità senza emissioni dirette nell'ambiente, un aspetto sottolineato da Gandelli S. nel 2022. Nonostante il processo di estrazione e raffinazione dell'uranio contribuisca ad un impatto ambientale nella sua filiera produttiva, questo impatto non si traduce direttamente in emissioni che alimentano il cambiamento climatico.

Un ulteriore vantaggio dell'energia nucleare è la produzione continua di energia, eliminando la dipendenza dalle condizioni meteorologiche variabili riscontrata nelle fonti rinnovabili. Inoltre, gli impianti nucleari generano una quantità significativa di energia

utilizzando minori quantità di materie prime rispetto ad altre fonti inquinanti. Secondo i dati forniti da Geopop.it, 1 kg di uranio è equivalente in energia a 60 tonnellate di gas naturale, 80 di petrolio o 120 di carbone.

Capitolo III

Tecnologie di stoccaggio e trasporto dell'idrogeno

1. Introduzione

Il trasporto e lo stoccaggio dell'idrogeno non sono solo una sfida tecnologica, ma una trasformazione profonda del modo in cui il mondo concepisce e gestisce l'intera catena logistica legata alle fonti energetiche. L'avvento dell'idrogeno come vettore energetico chiave richiede un'evoluzione nel modo di concepire questa catena integrando metodologie tradizionali di trasporto e stoccaggio di combustibili con soluzioni su misura per le caratteristiche uniche dell'idrogeno.

Tradizionalmente, il trasporto e lo stoccaggio di combustibili fossili hanno seguito un modello consolidato, con oleodotti e gasdotti, navi cisterna e serbatoi sotterranei. L'idrogeno, tuttavia, presenta sfide e opportunità uniche. La sua bassa densità energetica e la sua diffusione richiedono approcci innovativi per garantire un trasporto sicuro ed efficiente.

L'integrazione delle pratiche tradizionali con quelle specifiche per l'idrogeno diventa essenziale. L'utilizzo di gasdotti già presenti, adattati per il trasporto di idrogeno, rappresenta un'opzione intrigante, sfruttando l'infrastruttura esistente per ridurre i costi e migliorare l'efficienza. Inoltre, l'esplorazione di soluzioni duali, in grado di gestire sia combustibili tradizionali che idrogeno, offre una transizione graduale verso un'economia a basse emissioni di carbonio.

Dal lato dello stoccaggio, l'evoluzione non è meno cruciale. Serbatoi di pressurizzazione, caverne sotterranee e soluzioni emergenti come i materiali solidi assorbenti devono coesistere e integrarsi nelle reti energetiche. Questo richiede un approccio olistico¹ che consideri la diversità delle fonti di idrogeno e le esigenze di immagazzinamento associate.

¹ Inteso come “completo”.

L'idrogeno ha il potenziale di affrontare una delle sfide cruciali che affliggono i sistemi energetici di energia rinnovabile. In particolare, può contribuire a risolvere il problema legato all'intermittenza delle fonti di energia rinnovabile.

Durante periodi in cui viene generata un'eccessiva quantità di energia da fonti rinnovabili, l'idrogeno può essere prodotto tramite l'elettrolisi dell'acqua, separando l'idrogeno dall'ossigeno. Successivamente, l'idrogeno può essere stoccato e utilizzato per generare energia quando la domanda è elevata o quando la produzione di energia rinnovabile è limitata.

Tuttavia, l'idrogeno stesso è difficile da conservare. Questo è dovuto alla sua bassa densità energetica volumetrica rispetto ad altri gas. Questo parametro rappresenta la quantità di energia immagazzinata in un determinato volume di gas. Nel caso dell'idrogeno, la sua bassa densità energetica volumetrica implica che, per immagazzinare la stessa quantità di energia di un altro gas, come il gas naturale, sia necessario occupare un volume maggiore.

In aggiunta, nel caso del suo stato liquido, l'idrogeno richiede la conservazione a basse temperature. Sebbene non corroda i contenitori di stoccaggio, può causare crepe nei metalli in determinate condizioni.

Le tecnologie di stoccaggio dell'energia sono estremamente variegata, ciascuna caratterizzata da peculiarità che influenzano la scelta in base a diversi fattori. Esistono molteplici approcci con punti di forza e debolezza distinti, ognuno dei quali si adatta in maniera unica a specifici contesti operativi e requisiti energetici. La complessità di questo panorama sottolinea l'importanza di selezionare attentamente la soluzione di stoccaggio in base alle esigenze specifiche.

2. L'idrogeno in forma gassosa

2.1 Lo stoccaggio di idrogeno tramite compressione (cGH2)

Il volume dell'idrogeno supera di quasi quattro volte quello del gas naturale, rendendo la compressione essenziale per facilitarne la gestione pratica di stoccaggio e trasporto.

Il metodo predominante per la conservazione dell'idrogeno è la compressione ad alte pressioni.

Questo approccio è ampiamente adottato poiché utilizza tecnologie ormai consolidate in quanto simili a quelle impiegate per il gas naturale già da diversi decenni. Infatti, gli strumenti necessari sono semplicemente un compressore e un recipiente pressurizzato.

L'idrogeno compresso può essere conservato “all'aperto”, in serbatoi appositamente progettati, o nel sottosuolo, sfruttando cavità naturali già presenti o realizzate a tal fine ma con una minore convenienza economica.

Per quanto riguarda la conservazione all'aperto, questa tipologia di stoccaggio è diffusa nel settore dell'*automotive*, nello specifico nelle stazioni di rifornimento ad idrogeno. In questi luoghi, il gas è immagazzinato in differenti tipi di serbatoi: vi sono serbatoi a forma di "sigaro" progettati per una pressione di 45 bar, definiti come "stoccaggio a bassa pressione". Gruppi di bombole o cilindri rappresentano lo "stoccaggio a media pressione", con una pressione compresa tra 200 e 500 bar. Infine, i serbatoi o cilindri compositi, con una pressione variabile tra 700 e 1000 bar, costituiscono lo "stoccaggio ad alta pressione".

Questo approccio a più livelli consente di adattare la pressurizzazione in base alle esigenze di stoccaggio, trasporto e di rifornimento dei veicoli.

A tal proposito, sono state progettate diverse tipologie di serbatoi per la gestione dell'idrogeno gassoso. I serbatoi di “tipo I” sono costruiti in metallo senza saldature, caratterizzati da una struttura pesante e pareti spesse, progettati per resistere a pressioni fino a 250 bar. Questa tipologia trova impiego principalmente nei veicoli a gas naturale compresso (GNC) e in alcune applicazioni stazionarie grazie al loro costo relativamente contenuto.

I serbatoi di “tipo II”, anch'essi realizzati in metallo senza saldature, sono invece avvolti da materiali impermeabili. Possono sopportare pressioni comprese tra 450 e 800

bar, fungendo da *buffer* ad alta pressione² nelle stazioni di rifornimento di idrogeno. Tuttavia, a causa del loro peso elevato e delle dimensioni ingombranti, risultano meno idonei per l'impiego su veicoli.

In sintesi, le prime due tipologie di serbatoi, a causa delle loro caratteristiche di peso e dimensioni, sono più adatte per applicazioni stazionarie, mentre quelli di tipo III e IV sono più leggeri e pensati per un utilizzo automobilistico.

Infatti, i serbatoi di tipo III sono leggeri, con pareti sottili e rivestimenti impermeabili senza saldature. Possono sopportare pressioni fino a 350 bar e sono meno suscettibili al processo di infragilimento da idrogeno³ rispetto ai tipi I e II.

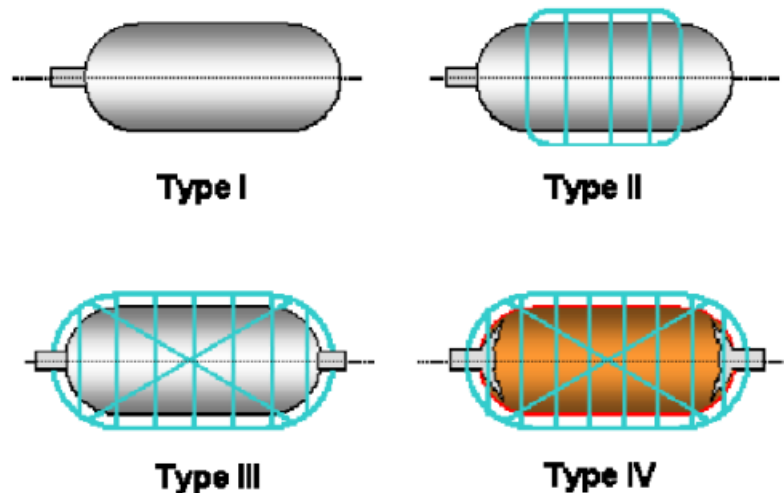
Infine, i serbatoi di tipo IV presentano una struttura simile a quelli di tipo III, ma possono sopportare pressioni fino a 700 bar. Anche questi serbatoi risultano più leggeri e meno influenzati dall'infragilimento da idrogeno come quelli di tipo III.

² Con *buffer* ad alta pressione si intende, nel caso specifico dei serbatoi di tipo II, alla funzione che ha il serbatoio nell'immagazzinare idrogeno a pressioni elevate e rilasciarlo gradualmente durante il rifornimento dei veicoli o in altre situazioni in cui è richiesta una fornitura costante di idrogeno ad alta pressione.

³ Con infragilimento da idrogeno si intende il processo attraverso il quale l'idrogeno può formare piccole bolle all'interno della struttura del materiale, aumentando la pressione interna. Questo aumento di pressione può portare a crepe o fratture nel materiale, rendendolo meno resistente.

Figura 3.1

Illustrazione delle differenti tipologie di serbatoi utilizzati per lo stoccaggio di idrogeno gassoso compresso



Fonte: HyResponder (2021)

Lo stoccaggio di idrogeno in forma gassosa porta con sé anche delle criticità. Il processo richiede un grande dispendio di energia e provoca molti stress sui materiali utilizzati per i serbatoi a causa dei continui cicli di alta e bassa pressione. Inoltre, pressurizzare così tanto un gas porta a sostenerne i relativi rischi di sicurezza e stabilità. I serbatoi, se non progettati correttamente, potrebbero essere difettosi consentendo al gas di uscire e disperdersi. Per questo esistono standard internazionali che definiscono le modalità di progettazione e realizzazione dei serbatoi.

Inoltre, lo stoccaggio di idrogeno compresso può avvenire nel sottosuolo all'interno di cavità naturali.

Lo stoccaggio sotterraneo di idrogeno o UHS (*Underground Hydrogen Storage*), prevede l'iniezione e l'accumulo di idrogeno in serbatoi posizionati sotto la superficie, come giacimenti salini o cavità naturali derivanti dall'estrazione di gas naturale e petrolio degli anni precedenti.

Secondo l'analisi di Thiagarajan S. R. del 2022, questa pratica offre numerosi vantaggi.

Innanzitutto, le strutture di stoccaggio sotterraneo garantiscono una notevole sicurezza, essendo virtualmente immune da eventi come incendi, condizioni meteorologiche avverse, attacchi militari o atti terroristici. Inoltre, offrono una vasta gamma di volumi di spazio accessibile, spaziando da dimensioni ridotte, nell'ordine dei pochi metri cubi, a estensioni notevoli che raggiungono centinaia di metri cubi.

Un elemento distintivo di questa tecnologia è il suo basso costo, sia in termini di spese operative che di investimenti, rispetto ai serbatoi di superficie su larga scala. Un ulteriore punto a favore è rappresentato dalla presenza diffusa di siti di stoccaggio geologico adeguati, permettendo un approccio decentralizzato a questa pratica. Discorso opposto dal punto di vista economico nel caso in cui, invece, non si sfruttino cavità geologiche naturali ma vengano predisposti progetti per la loro creazione.

È essenziale considerare attentamente i potenziali rischi associati allo stoccaggio sotterraneo di idrogeno. Un aspetto di particolare preoccupazione riguarda la possibilità di scatenare terremoti, a meno che non siano implementate procedure rigorose di studi geologici ed ingegneristici. Un elemento critico da monitorare è la pressione, evitando di superare quella presente nel giacimento alle origini, ovvero quando conteneva gas naturale o altre sostanze. Pertanto, è fondamentale avere sistematici monitoraggi sismici per garantire la sicurezza e prevenire eventuali conseguenze indesiderate.

In tutto il mondo, si stanno sviluppando diverse iniziative con l'ambizioso scopo di creare centri di stoccaggio di idrogeno sotterranei tra i più grandi, sicuri ed efficienti. Uno di questi notevoli progetti è “ACES⁴ Delta”, un ambizioso programma di stoccaggio di idrogeno sviluppato a Delta, nello Utah.

Secondo Patel S. nel 2022, questo progetto ha recentemente ottenuto una garanzia di prestito di 504,4 milioni di dollari dal Dipartimento federale di garanzia dei prestiti dell'energia (DOE). Questa iniziativa mira a sviluppare il più grande hub energetico rinnovabile di idrogeno negli Stati Uniti occidentali.

Il progetto è diviso in fasi, la prima fase è denominata “*Advanced Clean Energy Storage I*” e prevede la produzione di 100 tonnellate giornaliere di idrogeno attraverso

⁴ ACES: Advanced Clean Energy Storage Project, in italiano: “Progetto avanzato di stoccaggio di energia pulita”

elettrolizzatori di una società norvegese da 220 MW⁵ alimentati da fonti rinnovabili. L'idrogeno risultante viene immagazzinato in due ampie caverne salate, garantendo uno stoccaggio energetico di 300 GWh⁶ di energia a lungo termine.

Secondo quanto riportato da Patel S., il progetto è collegato al “*Intermountain Power Plant*” (IPP) vicino a Delta, Utah, una centrale alimentata a carbone che verrà ripotenziata con tecnologie fornite dalle Mitsubishi Heavy Industries (MHI)⁷, con l'obiettivo di diventare una centrale da 840 MW entro il 2025. Il successo di questa iniziativa potrebbe avere un impatto notevole sulla riduzione dei costi dell'elettricità e sull'efficacia delle soluzioni di stoccaggio energetico a lungo termine, contribuendo così agli sforzi complessivi di decarbonizzazione.

2.2 Il trasporto di idrogeno in forma gassosa

Per quanto riguarda il trasporto dell'idrogeno in forma gassosa, questo può essere fatto tramite le già presenti e diffuse tubature di gas naturale tramite la commistione dei due gas. Ad oggi, con modeste modifiche, questi gasdotti riescono a sopportare una miscela nella quale l'idrogeno è presente al 10-20% senza subire danni. Altrimenti, per il trasporto di idrogeno puro, si parla di gasdotti riconvertiti o attraverso una rete di gasdotti appositamente costruiti allo scopo.

La riconversione delle condutture di gas naturale comporta spese a causa delle incompatibilità tra le proprietà dei due gas. Tale processo richiede la preparazione delle condutture con materiali resistenti all'infragilimento da idrogeno, impermeabili alle fughe e in grado di sopportare le elevate pressioni richieste per il trasporto dell'idrogeno. Inoltre, è essenziale aggiornare i sistemi di sicurezza, installare booster⁸ per mantenere la pressione necessaria e attuare altre attività necessarie.

⁵ MW: megawatt

⁶ GWh: gigawattora, che è un'unità di misura dell'energia elettrica. Questa unità di misura è spesso utilizzata per misurare la quantità di energia consumata o prodotta in un periodo di tempo specifico.

⁷ Mitsubishi Heavy Industries (MHI) è una società giapponese diversificata che opera in vari settori, inclusi macchinari pesanti, energia, aerospaziale e altri settori industriali.

⁸ Il termine "booster" suggerisce la possibilità che questi dispositivi siano utilizzati per aumentare la pressione del gas all'interno del gasdotto, garantendo così una corretta pressione durante il trasporto dell'idrogeno. Questi dispositivi potrebbero essere coinvolti nel mantenere o aumentare la pressione del gas lungo il percorso del gasdotto, se necessario

Per quanto riguarda l'economicità dell'operazione, come riportato sul sito Enformer nel 2022, “[...] *gli esperti concordano sul fatto che questo lavoro di conversione sarebbe notevolmente più conveniente rispetto alla costruzione di condutture completamente nuove.*”⁹. Nello specifico le stime indicano che la soluzione sarebbe più economica del 75% rispetto alla realizzazione di nuove infrastrutture.¹⁰

Come riportato da Takahashi K. nel 2013, l'utilizzo di gasdotti, in contrasto con altre modalità di trasporto come veicoli su strada o navi, offre non solo maggiore efficienza, ma anche una notevole resistenza agli agenti meteorologici esterni.

Secondo questo documento, nonostante la maggiore efficienza, emergono caratteristiche peculiari di questo metodo di trasporto che incidono sulla convenienza economica. Infatti, l'investimento iniziale per la creazione dei gasdotti è decisamente più elevato rispetto ad altre modalità di trasporto già esistenti. Inoltre, l'impianto di produzione dell'idrogeno deve essere collegato direttamente con meccanismi di regolazione della domanda/offerta. Questo perché è essenziale avere un sistema che e possa mantenere sotto controllo l'efficienza dell'intero sistema e che permetta di affrontare le fluttuazioni nella produzione e nel consumo di gas.

Secondo Takahashi K.: *“Un sistema di trasporto di condutture è costituito da booster installati insieme alle apparecchiature per la produzione di idrogeno, da strumenti utilizzati per rimuovere le impurità dal gas che potrebbero causare il blocco nei tubi durante il trasporto, il corpo principale del gasdotto, apparecchiature per la regolazione della domanda/offerta compresi serbatoi di gas, stazioni booster installate lungo il percorso del gasdotto, regolatori che riducono e regolano la pressione del gas a seconda del luogo in cui viene utilizzato e sistemi di monitoraggio e controllo della pressione e della portata del gas in vari punti lungo la struttura del gasdotto.”*¹¹

Le condutture di idrogeno, come d'altronde anche quelle finalizzate alla movimentazione di altre sostanze, possono essere installate in varie condizioni

⁹ Traduzione fornita personalmente

¹⁰ Dati riportati nell'articolo “Converting natural gas pipelines to carry hydrogen” del 2022 sul blog EnFormer citando i calcoli prodotti da Nederlandse Gasunie, un operatore olandese delle infrastrutture e del trasporto del gas,

¹¹ Traduzione fornita personalmente

geologiche come tra continenti o negli oceani ma *“la scelta del percorso da seguire per la posa deve essere accurata, considerando dettagliatamente le condizioni del territorio, le tendenze di sviluppo, gli aspetti ambientali compresi gli ecosistemi e la geologia, e la previsione della domanda di idrogeno a lungo termine.”*¹² (Takahashi K., pag. 4)

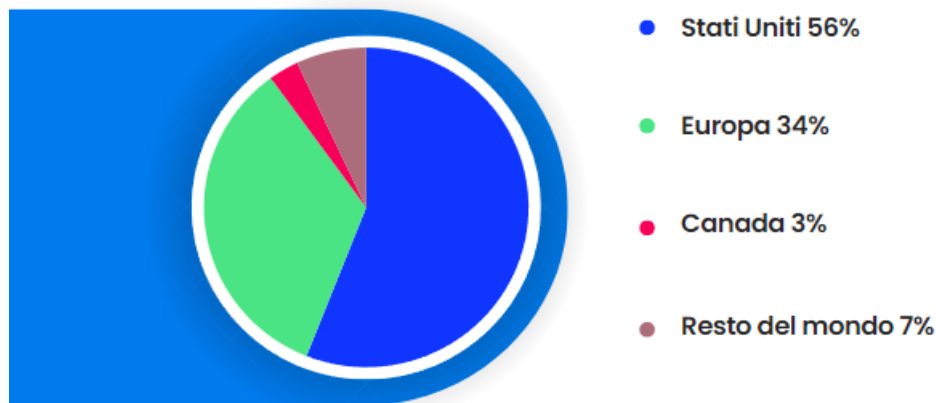
Questo passaggio richiede un'attenta considerazione dell'ambiente in cui verrà installata poiché, attraverso questa decisione, viene determinata la difficoltà di manutenzione e di intervento in caso di malfunzionamento.

Nel mondo ci sono diverse centinaia di chilometri di gasdotti in cui viene trasportato l'idrogeno. Nel 2004, negli Stati Uniti si stimava che ci fossero circa 1.200 km di tubature concentrate nella parte sud-est dello stato mentre, ad oggi, queste sono più che raddoppiate. In Europa, più precisamente negli stati del centro-nord, entrava in funzione nel 1939 un gasdotto di idrogeno lungo 200 km e, ad oggi, se ne stimano poco più di 1.500 km. Le restanti tubature sono distribuite in Canada per quasi 200 km e nel resto del mondo per poco più di 330 km, principalmente situate in Asia tra Giappone, Cina, Corea del sud e altri stati per un totale di 4542 km di gasdotti complessivamente realizzati sul globo.

¹² Traduzione fornita personalmente

Grafico 3.2

Localizzazione dei gasdotti di idrogeno nel mondo



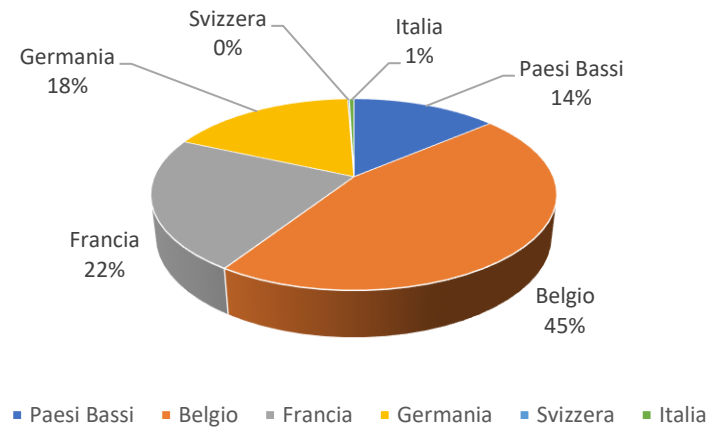
Fonte: H2tools.org (2016)

In Europa sta prendendo forma un progetto estremamente ambizioso focalizzato sul trasporto di idrogeno in forma gassosa. Negli ultimi anni, l'Unione Europea ha incentivato finanziariamente la produzione e la domanda di idrogeno generando, tuttavia, delle implicazioni significative. La conseguenza principale è che, affinché un mercato possa funzionare efficacemente, non è sufficiente soltanto un incontro teorico tra domanda e offerta, ma è fondamentale che ciò si traduca anche in azioni concrete. Da qui ha preso vita il progetto "*The European Hydrogen Backbone*" (EHB), che mira a strutturare il trasporto dell'idrogeno, creando una rete capillare di tubature che si estenda in tutta Europa.

Per avere una panoramica, l'Unione Europea dispone di una rete di gasdotti di idrogeno lunga complessivamente circa 1.500 km. La maggior parte di questa infrastruttura è concentrata in Belgio, che detiene il 45%, seguito dalla Francia con il 22%, dalla Germania con il 18%, e i Paesi Bassi con il 14%. Italia e Svizzera chiudono la lista contribuendo insieme a meno del 2%.

Figura 3.3

Chilometri di gasdotti di idrogeno in Europa

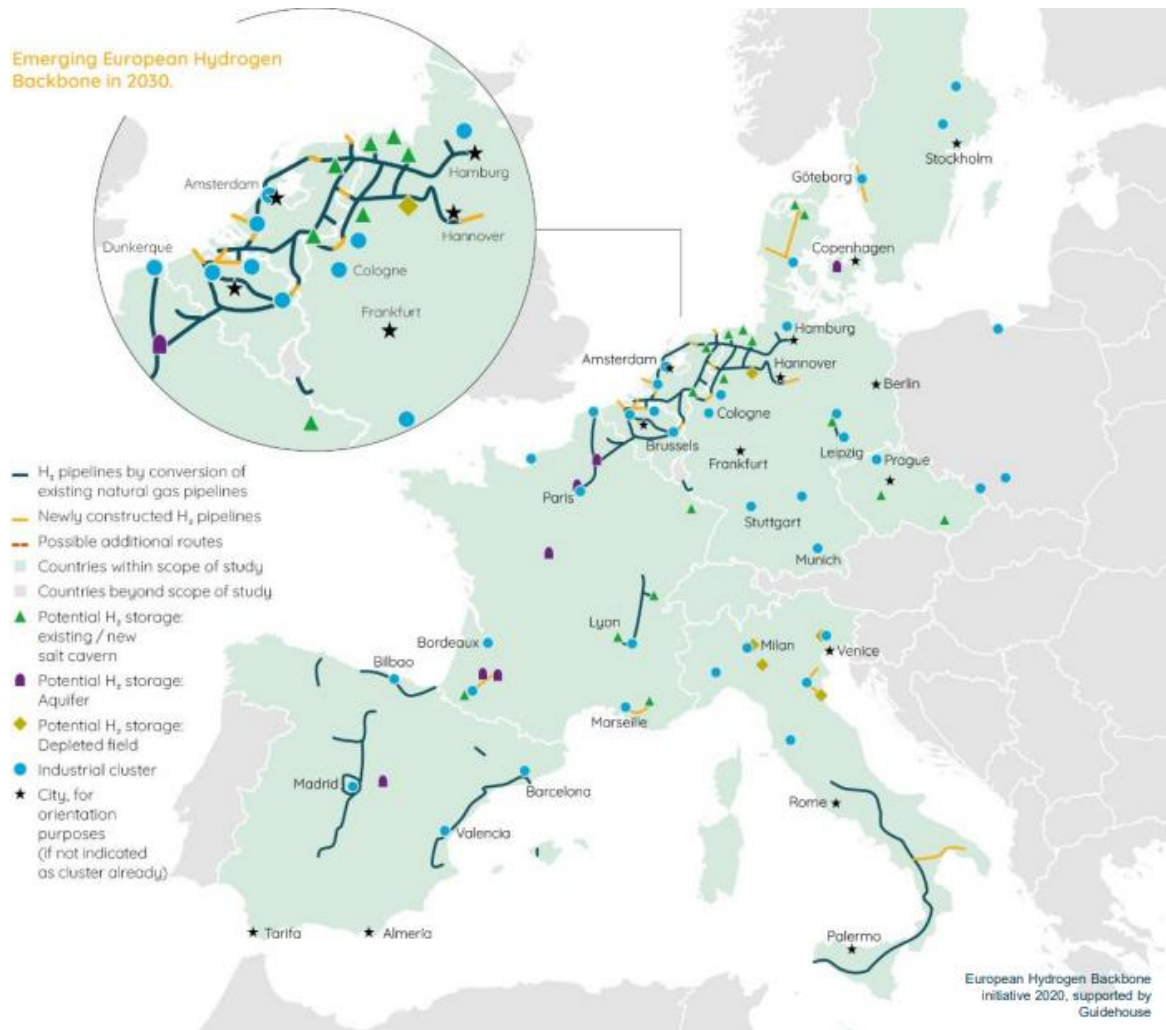


Fonte: H2tools.org (2016)

Il progetto EHB ha l'obiettivo, entro il 2030, di consolidare una rete di gasdotti di lunghezza 6.800 km sul suolo europeo. La logica che segue questo primo step è quello di riuscire a connettere i cluster industriali situati nel nord europa tra Francia, Belgio, Paesi Bassi e Germania.

Figura 3.4

Rete di gasdotti prevista dal progetto EHB entro il 2030

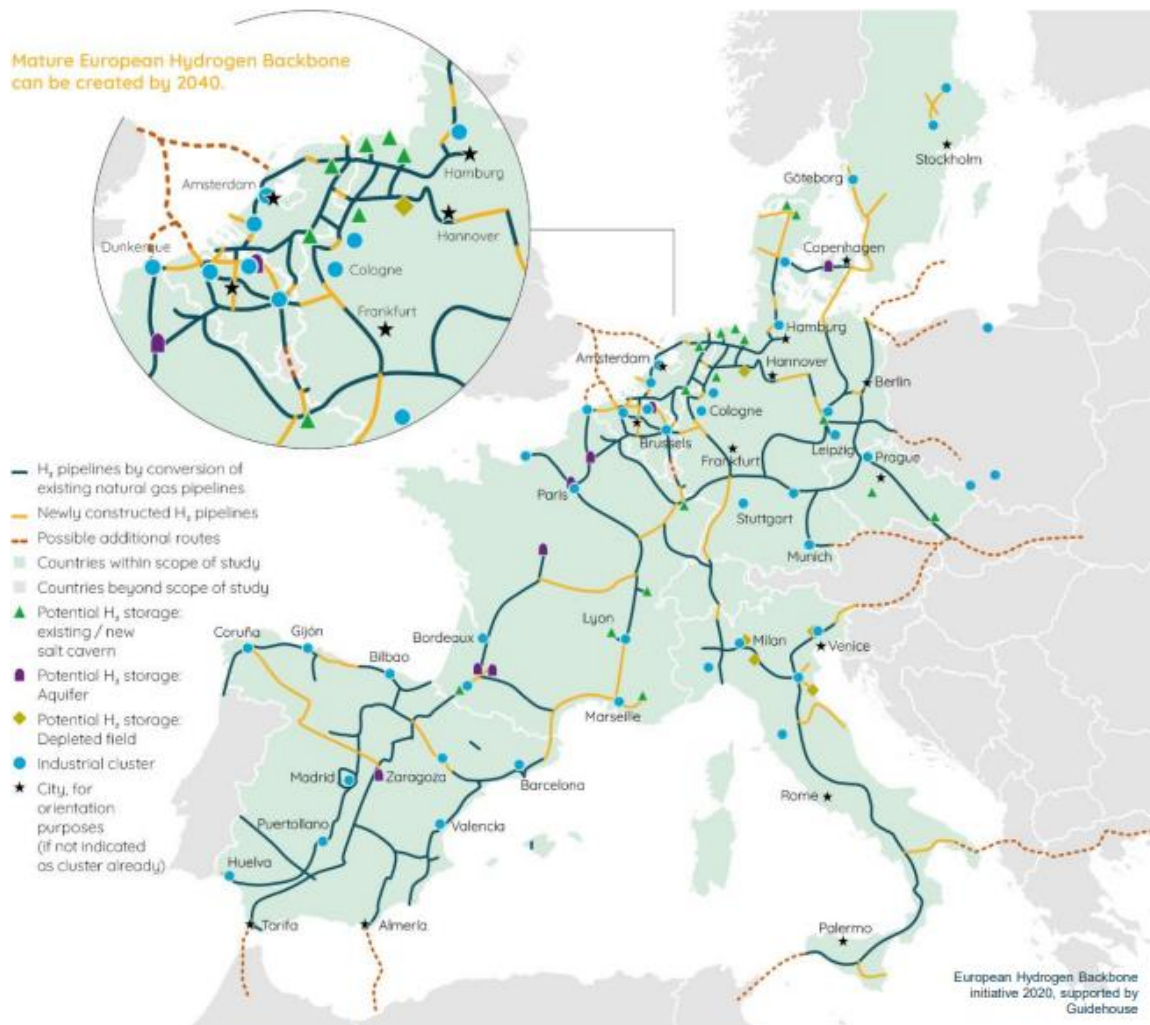


Fonte: Unepfi.org (2020)

Successivamente, entro il 2040, l'obiettivo è quello di ampliare ulteriormente la lunghezza di questa rete di gasdotti facendole raggiungere i 23.000 km, ricavati al 75% dalla riconversione di strutture già operative ed il 25% tramite la creazione di nuove tubature.

Figura 3.5

Rete di gasdotti prevista dal progetto EHB entro il 2040



Fonte: Unepfi.org (2020)

Le stime indicano che le spese per la realizzazione della dorsale siano tra i 27 e i 64 miliardi di euro, e che il costo relativo al trasporto del gas sia compreso tra 0,09 e 0,17 euro per kg ogni 1.000 km, consentendo di trasportare l'idrogeno in modo economico ed efficiente su lunghe distanze in tutta Europa.

L'Unione Europea, però, non è l'unico attore che si muove in questi termini. Yihe X. nel 2023, riporta il pensiero di Li Guohui, vicepresidente dell'azienda statale "China Petroleum Pipeline Engineering Corporation" (CPPEC) secondo il quale, la domanda

totale di idrogeno della Cina crescerà fino a 100 milioni di tonnellate all'anno entro il 2060.

Anche in questo caso c'è enorme bisogno di infrastrutture di trasporto di idrogeno in forma gassosa. Questo perché: *“le risorse di idrogeno del paese tendono a essere localizzate nelle regioni ventose e soleggiate del nord-ovest, del nord-est e del centro-ovest, che sono anche aree chiave per le industrie chimiche e di raffinazione cinesi che consumano H₂, mentre i centri della domanda tendono a trovarsi nelle regioni orientali e meridionali, dando origine alla necessità di spostare l'idrogeno, grigio o verde, verso questi mercati.”*¹³ (Yihe X. 2023)

Per questo motivo, Li Guohui ha espresso un ulteriore obiettivo: installare 6.000 km di condotte per l'idrogeno entro il 2050.

3. L'idrogeno in forma liquida

Il Gruppo MHI partecipa attivamente alla ricerca e allo sviluppo di tecnologie avanzate per lo stoccaggio di idrogeno in forma liquida. Queste iniziative sono condotte in collaborazione con l'industria spaziale, che da anni utilizza l'idrogeno liquefatto come propellente per i razzi. Tuttavia, tali tecnologie sono complesse e presentano costi elevati, limitandone la diffusione.

Attualmente, l'impiego prevalente di idrogeno liquido avviene nell'industria dei chip semiconduttori e come carburante per i missili destinati ai lanci spaziali e, questa forma fluida, è sfruttata molto nel caso in cui ne debbano essere movimentate grandi quantità verso luoghi distanti.

La liquefazione dell'idrogeno richiede il raggiungimento di temperature estremamente basse e, con il tentativo di renderla più efficace, contemporaneamente, si può anche combinare al metodo dello stoccaggio tramite compressione. Dopo il processo di liquefazione, l'idrogeno deve essere conservato in serbatoi pressurizzati ad 1 bar e altamente isolati per mantenere basse temperature e minimizzare l'evaporazione.

¹³ Traduzione fornita personalmente

L'idrogeno si solidifica a -259,16 gradi e passa allo stato gassoso a -252,87 gradi. Questa stretta finestra di temperature rappresenta una delle sfide principali nel suo stoccaggio, poiché anche una leggera variazione può causare l'evaporazione parziale della sostanza comportando perdite significative. Questo aspetto rende il metodo di conservazione e di trasporto dell'idrogeno liquido poco conveniente sia dal punto di vista economico che in termini di efficienza energetica, dato che richiede un notevole dispendio di energia per mantenere temperature così basse.

Il vantaggio principale della forma fluida dell'idrogeno è che ne facilita il trasporto. A differenza di quello gassoso, per la sua movimentazione si può fare affidamento a mezzi di trasporto diversi rendendo il tutto più dinamico ed efficace. Infatti, grazie alla possibilità di utilizzare serbatoi criogeni, si possono sfruttare mezzi su strada, su rotaia o anche via mare come studiato dal progetto giapponese HESC (*Hydrogen Energy Supply Chain*). Questi serbatoi criogeni sono progettati per evitare variazioni di temperatura attraverso un doppio rivestimento isolante.

Esistono diverse forme di serbatoi, tra cui sferici e cilindrici. La forma sferica è preferibile quando si tratta di stoccare grandi volumi, grazie alla sua bassa superficie di trasferimento di calore per unità di volume. Questo significa che la sfera rappresenta la figura geometrica con la minore area superficiale possibile in rapporto ai volumi di sostanza contenuti, riducendo al minimo lo scambio termico con l'ambiente circostante. Tuttavia, i serbatoi cilindrici sono più comuni a causa della loro economicità e facilità di costruzione, anche se presentano una maggiore superficie rispetto a quella della sfera.

Il progetto HESC è nato tramite una joint venture in stretta collaborazione tra Australia e Giappone che ha coinvolto moltissimi attori come Kawasaki Heavy Industries, J-Power, Iwatani Corporation, Marubeni Corporation e altre società.

Il progetto si sviluppa in due fasi: la fase pilota, completata nel 2022, mira a dimostrare la fattibilità dell'intera catena di approvvigionamento, dalla gassificazione, alla liquefazione e lo stoccaggio, fino al trasporto sicuro dell'idrogeno liquefatto dall'Australia al Giappone via nave. La seconda fase prevede lo sviluppo definitivo del progetto con prospettive di valore commerciale multimiliardario entro il 2030.

Il progetto HESC ha attirato l'attenzione dell'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA), che lo ha identificato come un crocevia nel suo rapporto del 2019.

La Suiso Frontier, la prima nave al mondo concepita per il trasporto di idrogeno liquefatto via mare, è stata realizzata in Giappone grazie alle conoscenze della Kawasaki Heavy Industries. Nel contesto del progetto, la società “Latrobe Valley” ha gestito l'estrazione di carbone e biomassa, mentre il “CarbonNet Project” si è dedicato alla cattura e alla conservazione della CO_2 .

Come documentato dalle fonti ufficiali, il progetto HESC mira a trasportare 225.000 tonnellate di idrogeno liquefatto, contribuendo, secondo le stime, a ridurre le emissioni globali di CO_2 di circa 1,8 milioni di tonnellate all'anno, equivalente alle emissioni di circa 350.000 auto a benzina.

4. L'idrogeno convertito

Questo tipo di stoccaggio è basato sull'utilizzo di materiali liquidi o solidi che sono chimicamente in grado di assorbire o reagire con l'idrogeno per legarlo.

Il metodo attraverso il quale si trasporta l'idrogeno tramite composti liquidi è chiamato: “*Liquid Organic Hydrogen Carriers*” (LOHC). In questa tipologia di trasporto e stoccaggio, si utilizza un composto organico liquido come vettore di idrogeno. Questo composto ha la capacità di assorbire idrogeno gassoso attraverso un processo di “idrogenazione”. Successivamente, quando è necessario estrarlo, il composto organico viene sottoposto a un processo di “deidrogenazione”. Questo rilascia l'idrogeno in forma gassosa per essere utilizzato come fonte di energia.

Alcuni elementi, come alcune tipologie di metalli, hanno la capacità di assorbire grosse quantità di idrogeno per poi, in un secondo momento, rilasciarle. Questo processo

di assorbimento porta alla creazione degli “idruri metallici”¹⁴ come il palladio, magnesio, alluminio e alcune leghe o “idruri non metallici”¹⁵, come l’ammoniaca.

Parlando degli idruri metallici, quando esposti all'idrogeno lo assorbono e incorporano al loro interno producendo calore. Questa capacità di assorbire l'idrogeno è notevole e alcuni idruri metallici possono ospitare quantità di idrogeno significativamente superiori rispetto al loro volume originale; infatti: *“la quantità di idrogeno presente in un centimetro cubo di un idruro può superare quello presente in un volume di un centimetro cubo contenente idrogeno liquido”*. (Giordano V. et al, 2016). Per esempio, il palladio può assorbire fino a 900 volte il suo volume in idrogeno. Questo fa degli idruri metallici un'opzione promettente per lo stoccaggio di grandi quantità di idrogeno in modo efficiente ed efficace.

Mentre, per quanto riguarda l’ammoniaca, questa sostanza può essere utilizzata come vettore¹⁶ per l'idrogeno. Ma, come ogni opzione, anche questa ha pregi e difetti.

L’ammoniaca liquida ha la possibilità di immagazzinare una quantità significativa di idrogeno in modo più denso rispetto all'idrogeno liquido. La sua densità energetica in volume, cioè la quantità di energia immagazzinata per unità di volume, è quasi il doppio rispetto all'idrogeno liquido. Ciò rende l'ammoniaca un'opzione interessante per il trasporto e lo stoccaggio dell'idrogeno, poiché consente di ridurre il volume necessario per immagazzinare la stessa quantità di energia.

Inoltre, secondo quanto riportato da Giavarini C. nel 2022, il processo di stoccaggio dell'ammoniaca emerge come meno problematico e meno esigente in termini di condizioni rispetto a quello dell'idrogeno. Questo aspetto rende l'ammoniaca una scelta più vantaggiosa per quanto riguarda la conservazione e il trasporto, soprattutto in confronto con l'idrogeno. Le temperature impiegate per conservare l'ammoniaca liquida

¹⁴ Gli idruri sono composti chimici che contengono idrogeno e un altro elemento. Gli idruri metallici sono formati da idrogeno e metalli.

¹⁵ A differenza degli idruri metallici, gli idruri non metallici sono composti da idrogeno e elementi non metallici.

¹⁶ Con "vettore" ci si riferisce a un mezzo di trasporto o di stoccaggio che consente di trasferire o immagazzinare l'idrogeno in modo più pratico o efficiente rispetto a forme dirette come l'idrogeno gassoso o liquido.

oscillano intorno ai -33 gradi, e la pressione richiesta varia tra 10 e 15 bar, comportando un minor consumo di energia.

Tuttavia, è essenziale considerare gli aspetti critici associati alla combustione e alla sicurezza dell'ammoniaca. La sua infiammabilità richiede temperature più elevate rispetto all'idrogeno, e, per agevolare la combustione, è necessario l'utilizzo di un combustibile ausiliario, rendendo l'innesco più complesso. Nonostante la temperatura di combustione dell'ammoniaca sia inferiore a quella dell'idrogeno, i suoi sottoprodotti risultano essere più tossici.

In sintesi, l'ammoniaca è impiegata come vettore energetico attraverso la conversione iniziale dell'idrogeno in questa sostanza, il suo trasporto e, infine, il rilascio a destinazione.

Come riportato da Willige A. nel 2022, la riconversione a destinazione chiamata “*cracking*” dell'ammoniaca: “*è ancora nella fase iniziale di sviluppo e i tassi di conversione rimangono bassi, nella migliore delle ipotesi circa un terzo*”¹⁷

L'adozione dell'ammoniaca come vettore energetico sta guadagnando sempre più rilevanza, tanto che numerosi paesi stanno investendo in progetti legati a questa sostanza. In una visione futura in cui la società sarà basata sull'idrogeno, nazioni che non possono effettuare investimenti diretti su quest'ultimo vedono nell'ammoniaca un elemento cruciale considerandola come protagonista chiave in questa ipotetica realtà.

Questa tendenza è evidente soprattutto nei paesi come Giappone e Corea del Sud, che, non avendo la possibilità di investire direttamente sull'idrogeno, stanno puntando a diventare intermediari nel suo commercio.

Un esempio concreto è rappresentato dai progetti del gruppo MHI, che è coinvolto nella realizzazione di una nave alimentata ad ammoniaca destinata a trasportare questa sostanza. Infatti, il trasporto di idrogeno convertito in altri materiali può avvenire tramite i mezzi tradizionali utilizzati per la movimentazione generale di prodotti o materie prime.

¹⁷ Traduzione fornita personalmente

Il vantaggio della conversione è che si possono sfruttare sostanze che siano di per sé meno pericolose rispetto all'idrogeno ma anche più facili ed economicamente più vantaggiose da immagazzinare e da trasportare.

A tal proposito, il sito ufficiale del gruppo Mitsubishi Heavy Industries ha evidenziato nel maggio del 2022 la conclusione dell'accordo di cooperazione tecnica tra la sua divisione di costruzione navale "Mitsubishi Shipbuilding" con "Namura Shipbuilding"¹⁸ nella costruzione della nave cisterna "Phoenix Harmonia".

Questa nave, nel settembre 2023, è entrata in servizio e presenta caratteristiche importanti. Secondo il sito ufficiale del gruppo MHI: *"Le prestazioni operative sono state migliorate aumentando la capacità di contenimento del serbatoio del carico dai precedenti 83.000 a 87.000 metri cubi, mentre i miglioramenti tecnici hanno portato a una migliore efficienza del carburante. [...] Inoltre, la VLGC¹⁹ di recente sviluppo è attualmente la più grande tra tutte le navi in grado di trasportare ammoniaca, un punto di vantaggio in vista dell'espansione prevista della domanda per il trasporto di ammoniaca su larga scala, che non emette CO₂ durante la combustione."*²⁰ (MHI, 2023)

Queste iniziative segnalano una crescente importanza dell'ammoniaca nel panorama energetico globale, fungendo da ponte verso un futuro in cui l'idrogeno gioca un ruolo centrale.

In generale, lo stoccaggio tramite materia permette di immagazzinare grandi quantità di idrogeno in materiali di volume più piccolo, a pressione inferiore e a temperature prossime alla temperatura ambiente.

Nonostante ciò, il concetto di stoccaggio basato sui materiali è ancora in una fase di sviluppo, principalmente del notevole dispendio di tempo associato al carico, scarico e trattamento dell'idrogeno.

¹⁸ Namura Shipbuilding è un'azienda giapponese specializzata nella progettazione e costruzione di navi fondata nel 1942.

¹⁹ VLGC è l'acronimo di "Very Large Gas Carrier", che in italiano significa "nave molto grande per il trasporto di gas". Si tratta di navi appositamente progettate e costruite per il trasporto di gas liquefatto in grandissime quantità.

²⁰ Traduzione fornita personalmente.

Nel caso di impiego di elementi metallici nel processo, l'inconveniente economico diventa più evidente, poiché molte materie prime necessarie sono difficili da reperire e comportano costi monetari significativi per la loro acquisizione.

5. I problemi dello stoccaggio di idrogeno

La conservazione dell'idrogeno può avvenire attraverso diverse modalità, ciascuna con i propri vantaggi e svantaggi. Tuttavia, è importante notare che ognuna di queste opzioni comporta rischi legati alla sicurezza, sia per gli impianti e l'attrezzatura utilizzati nello stoccaggio, sia per le persone coinvolte nel processo, responsabili della corretta esecuzione e della sicurezza complessiva.

Nel caso dello stoccaggio gassoso ad alta pressione, uno dei principali rischi è associato alle pressioni elevate. I contenitori devono resistere a forti pressioni, ed eventuali guasti o difetti possono provocare rilasci improvvisi e pericolosi di idrogeno. L'infrangimento da idrogeno, in particolare, può rendere alcuni materiali dei contenitori più fragili, aumentando il rischio di rottura e causando perdite o dispersioni del gas, situazioni potenzialmente pericolose.

Il rischio legato all'infiammabilità dell'idrogeno è un altro aspetto critico. La sicurezza dei combustibili può essere valutata considerando tre variabili chiave: la presenza di una fonte di accensione, l'ossidante e la presenza del carburante stesso. Nonostante questo, l'idrogeno è generalmente considerato più sicuro di molti altri elementi combustibili.

L'idrogeno non è tossico di per sé e la sua leggerezza, a differenza di altre sostanze infiammabili come il petrolio, facilita la dispersione nell'aria, riducendo il rischio di concentrazioni pericolose. Questa caratteristica riduce le probabilità di innescare situazioni più gravi, come incendi o esplosioni.

Tuttavia, l'idrogeno non è privo di rischi. Si infiamma a temperature più basse rispetto ad altri combustibili ed è infiammabile in diverse proporzioni quando mescolato con l'aria. La sua infiammabilità dipende dalla percentuale di idrogeno nell'aria, compresa

tra un limite inferiore di infiammabilità (LII)²¹ e un limite superiore di infiammabilità (LSI)²². Questi limiti definiscono l'intervallo in cui l'idrogeno può bruciare o esplodere in presenza di una fonte di accensione.

Importante sottolineare anche che le fiamme generate dall'idrogeno sono quasi invisibili all'occhio umano, complicando ulteriormente la gestione e il controllo degli incendi ed il prodotto della combustione, a differenza del gas originale, risulta tossico e dannoso per l'essere umano.

6. Conclusioni

I progressi legati alle tecnologie di trasporto e stoccaggio dell'idrogeno sono fondamentali per riuscire a movimentare e conservare l'energia pulita per molto tempo e in lunghe distanze.

Il rapporto "*Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal*" del 2022 di IRENA²³, proiettando uno sguardo al futuro, identifica le modalità precedentemente analizzate, cioè l'utilizzo dell'ammoniaca, del metodo LOHC, dell'idrogeno liquido e dei gasdotti, come le più promettenti per il conseguimento degli obiettivi climatici prefissati a 1.5°C e ne analizzato la strumentazione valutandone la maturità tecnologica.

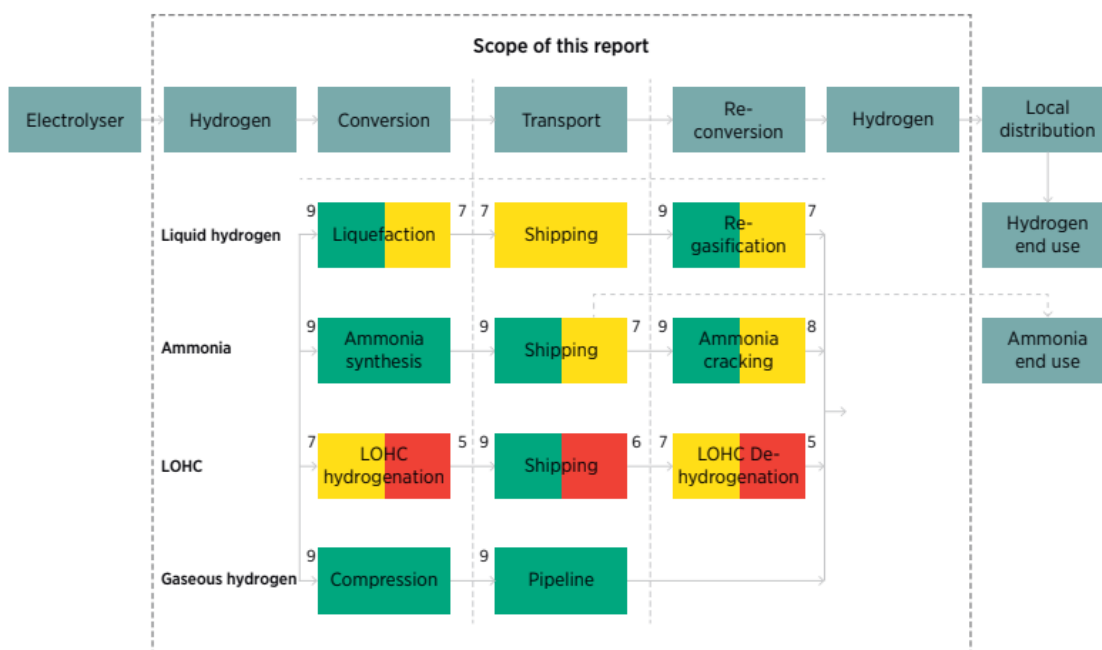
²¹ Questa è la concentrazione minima di idrogeno nell'aria necessaria per supportare la combustione. Al di sotto di questo limite, non c'è abbastanza idrogeno per sostenere una reazione di combustione.

²² Questa è la concentrazione massima di idrogeno nell'aria oltre la quale non c'è abbastanza ossigeno per sostenere la combustione. Al di sopra di questo limite, l'aria diventa troppo ricca di idrogeno per bruciare.

²³ IRENA (*International Renewable Energy Agency*) è un'agenzia internazionale intergovernativa dedicata alla promozione dell'adozione sostenibile e dell'uso efficiente delle energie rinnovabili a livello globale.

Figura 3.6

Catena del valore di ciascuna opzione di trasporto dell'idrogeno



Fonte: IRENA (2022)

I passaggi principali che vengono analizzati da IRENA sono quelli della conversione dell'idrogeno, del suo trasporto e della riconversione a destinazione. Il colore assegnato ad ogni passaggio segue una logica semaforica e dipende dal "livello di maturità tecnologica" (TRL)²⁴. IRENA specifica che il lato sinistro del riquadro si riferisce alla scala ridotta (< 50 tH₂/d)²⁵ e il lato destro si riferisce alla scala necessaria per il commercio globale (> 500 tH₂/d).

A prima vista, si nota che i riquadri dedicati al trasporto di idrogeno gassoso sono contrassegnati in verde e hanno il punteggio massimo. Ciò è dovuto al fatto che, come indicato nelle analisi del secondo paragrafo di questo capitolo, le tecnologie impiegate

²⁴ Il "Technology Readiness Level" (TRL) è una scala numerica utilizzata per valutare il grado di maturità di una tecnologia specifica in base al suo sviluppo, test e applicazione pratica. La scala TRL è composta da nove livelli, che vanno da TRL 1 (la fase concettuale o di ricerca di base) a TRL 9 (la fase di implementazione su larga scala o di produzione).

²⁵ tH₂/d significa tonnellate di idrogeno al giorno.

per la compressione e il trasporto sono già ben note e ampiamente utilizzate per altri tipi di gas. Dunque, affidabili e già mature.

Il secondo metodo di trasporto con le tecnologie più mature è quello che sfrutta l'ammoniaca. L'intera catena del valore è valutata complessivamente come mediamente matura, con punteggi vicini al massimo. L'attenzione principale è rivolta a migliorare la maturità tecnologica e a preparare, per una scala dedicata al commercio globale, le funzioni legate al trasporto via nave e alle operazioni di "*crack*" dell'ammoniaca una volta giunta a destinazione. Tuttavia, è importante sottolineare che entrambi questi aspetti abbiano un'elevata validità anche quando considerati su una scala ridotta.

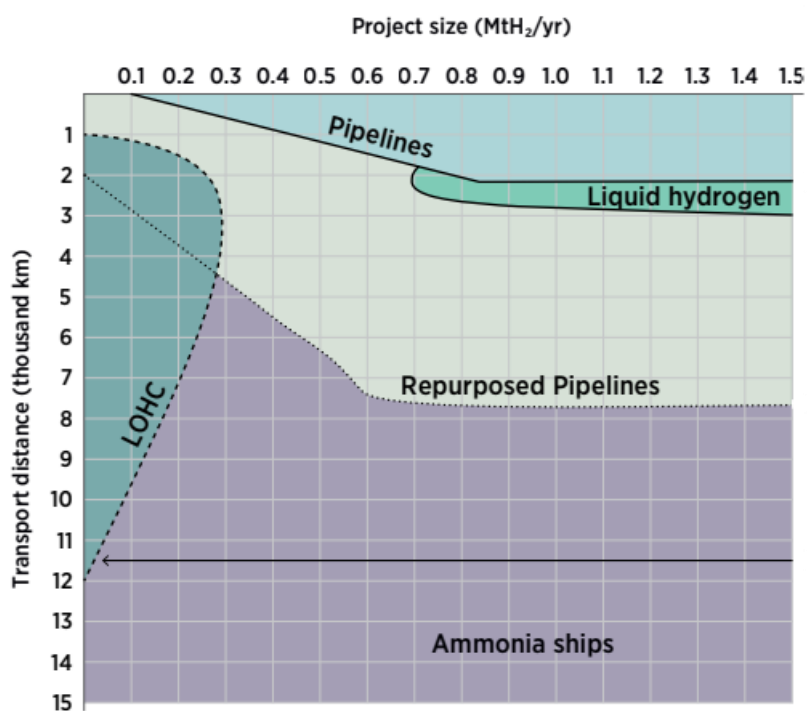
L'idrogeno liquido mostra una maturità sufficiente lungo l'intera catena del valore quando si considera una scala ridotta. Tuttavia, per quanto riguarda una scala più ampia, emerge una leggera immaturità tecnologica complessiva. Queste tecnologie sono ancora in parte in fase di sviluppo, ma si trovano a un passo dal diventare un'alternativa valida nel trasporto dell'idrogeno.

In conclusione, l'utilizzo del metodo LOHC risulta insufficiente per la scala globale, ma mostra potenzialità più promettenti nel "breve periodo" quando applicato su scala ridotta. Nello specifico, il trasporto via nave è completamente maturo, ma è necessario implementare, nelle fasi finali, le tecnologie relative ai processi di "idrogenazione" e "deidrogenazione".

Inoltre, IRENA analizza queste tecnologie in termini di convenienza economica nel 2050, in funzione delle dimensioni del progetto e della distanza di trasporto.

Figura 3.7

Il metodo di trasporto dell'idrogeno più conveniente in termini di costi nel 2050



Fonte: IRENA (2022)

Secondo le proiezioni di IRENA per il 2050, i gasdotti si rivelano una scelta efficace per le brevi distanze, mentre, a parità di dimensioni del progetto, l'idrogeno liquido occupa una posizione di nicchia per quelli leggermente più estesi geograficamente. Questa delineazione riflette l'attuale stato di maturità tecnologica di entrambi i metodi di trasporto. Attualmente, i gasdotti godono di una maturità consolidata e, dunque, si prevede che svolgeranno un ruolo centrale nella maggior parte dei progetti a breve raggio. Al contrario, l'idrogeno liquido, ad oggi non ancora completamente maturo, è destinato a occupare una posizione di nicchia, focalizzandosi su progetti specifici.

Le reti di gasdotti convertite assumeranno un ruolo predominante nelle regioni in cui è possibile rinnovare e utilizzare le vecchie tubazioni. Una rete già estesa e consolidata per altri gas consentirebbe di impiegarla in quasi tutti i progetti entro una distanza di circa 7 mila chilometri.

Il LOHC, come indicato nell'analisi della sua maturità tecnologica, è considerato una tecnologia costosa, orientata principalmente verso progetti specifici e di dimensioni limitate.

Per tutti gli altri scenari, indipendentemente dalle dimensioni del progetto e dalle distanze coinvolte, l'adozione del trasporto navale di ammoniaca emerge come la tecnologia preferita. Si presenta, quindi, come un'opzione versatile e ampiamente sviluppata, destinata a rivestire un ruolo chiave a livello globale entro il 2050.

Capitolo IV

Motori ad idrogeno e oltre: applicazioni del vettore energetico

1. Introduzione

L'idrogeno trova diverse applicazioni, ma la più nota e discussa negli ultimi anni riguarda il settore automobilistico, specialmente grazie ai continui progressi del dispositivo che ne consente l'utilizzo sui mezzi gommati, la cella a combustibile¹. Questa tecnologia è in grado di generare energia elettrica tramite un processo in cui l'idrogeno viene combinato con l'ossigeno per formare acqua. La cella a combustibile, originariamente impiegata nei programmi spaziali, si è diffusa negli ultimi anni nel settore dei trasporti sostenibili (Fonte: Treccani). Tuttavia, le potenzialità dell'idrogeno non si limitano al settore automobilistico e potrebbero anche abbracciare una vasta gamma di nuove applicazioni.

Nello specifico, l'idrogeno potrebbe rivestire un ruolo di grande importanza nei settori definiti "*Hard to Abate*", ossia: "*quei settori industriali caratterizzati da una particolare difficoltà nel processo di decarbonizzazione a causa dell'alta intensità di emissioni di gas serra associate alle loro attività*" (Fonte: Save NRG, 2023). Questi settori includono l'industria pesante, il trasporto marittimo e l'aviazione. Nonostante i tentativi di utilizzare l'energia elettrica, si è riscontrato che tale approccio risulta insufficiente e inadeguato nel sostituire la combustione di combustibili fossili. Di conseguenza, si sta cercando attivamente nuove tecnologie in grado di ridurre le emissioni nei settori *hard to abate*. In questo contesto, l'idrogeno emerge come una solida alternativa ecologica, potendo svolgere un ruolo chiave nella transizione verso soluzioni sostenibili.

Grittani M., nel 2021, ha scritto un articolo che analizza proprio questi aspetti. Documenta che il 98% dell'idrogeno prodotto è utilizzato: "*per produrre leghe ed acciai, vetri, componenti per l'elettronica, così come in tutti quei processi di lavaggio,*

¹ *Fuel Cell* in inglese

mordenzatura, e altre reazioni chimiche che se ne servono come reagente”, cioè è impiegato nella filiera industriale e chimica globale, un mercato da 117.5 miliardi di dollari nel 2019. Si parla di un settore altamente energivoro da 820 milioni di tonnellate di CO_2 annuali, nonché il 2.3% di quelle totali. L'idrogeno “verde”, una volta reso più economico e diffuso, sarebbe un'ottima opportunità per riuscire ad intervenire nel processo di decarbonizzazione di questi settori chimici ed industriali. Al mondo ci sono già molte iniziative con l'intento di sfruttare questa opportunità, come, per esempio, l'acciaieria di Salzgitter Flachstahl GmbH nel centro-nord della Germania che utilizza un elettrolizzatore da 2.2 MW per produrre idrogeno.

Grittani M. porta in analisi altri due settori, quello della navigazione e quello dei voli a lungo raggio.

L'economia globale si basa proprio sulla navigazione a lungo raggio; infatti, l'80% del volume degli scambi e il 70% del loro valore, globalmente, sono riconducibili proprio a questo settore. Da sottolineare che *“il combustibile utilizzato oggi dalla maggior parte delle grandi navi merci è il cosiddetto bunker oil, un idrocarburo ad elevata viscosità con un global warming potential (GWP)² di 4.470”* e quindi, durante la combustione produce scarti con un livello di effetto serra di quasi 4.500 volte superiore di quello della CO_2 .

Questa inefficienza spinge la ricerca verso nuove fonti di energia. Ad esempio, alcune navi passeggeri per brevi tratte stanno già utilizzando l'energia elettrica immagazzinata in tradizionali batterie al litio, come nel caso dei traghetti operanti nel fiordo norvegese di Sognefjord, i quali impiegano pile in grado di alimentare l'equivalente di 1.600 automobili. Tali soluzioni sono state implementate anche in paesi come la Germania e la Cina.

Tuttavia, le batterie attuali, come sottolineato da Grittani M., non offrono ancora un'autonomia sufficiente per percorsi a lungo raggio, e proprio per questa ragione l'idrogeno emerge come un'alternativa importante.

² Il GWP (Global Warming Potential) è un indice utilizzato per valutare l'impatto di un gas serra sull'effetto serra, misurando la sua capacità di intrappolare il calore nell'atmosfera rispetto a quella del biossido di carbonio (CO_2).

Nel 2018, il settore del trasporto aereo ha contribuito alle emissioni di 1.04 miliardi di tonnellate di anidride carbonica, rappresentando il 2.5% del totale di quell'anno. Inoltre, le attività ad alta quota dei velivoli velocizzano ed intensificano gli impatti inquinanti, accentuando l'urgenza di una transizione verso operazioni più ecologiche. Analogamente al comparto navale, gli sforzi di ricerca si concentrano sull'elettrificazione per i viaggi a breve e media distanza, mentre per quelli a lunga distanza si stanno sviluppando soluzioni basate sull'utilizzo dell'idrogeno.

Un progetto significativo che esplora l'integrazione dell'idrogeno nel settore del trasporto aereo è condotto dalla start-up britannico-statunitense "ZeroAvia", in collaborazione con Amazon e Shell, attraverso un investimento di circa 50 milioni di dollari. Nel 2020, ZeroAvia ha completato con successo il primo volo alimentato a idrogeno, seguito nel 2023 dal primo volo passeggeri alimentato ad idrogeno, che ha visto decollare un velivolo con a bordo 19 persone per una durata di 10 minuti, completando tutte le fasi, dal rullaggio, al decollo, al completamento di un circuito e, infine, l'atterraggio (ZeroAvia, 2023). La società ha inoltre programmato di sviluppare entro il 2027 tecnologie in grado di alimentare aerei di dimensioni più elevate, con una capacità fino a 100 passeggeri rappresentando una vera svolta nel settore dell'aviazione sia commerciale sia passeggeri.

Oltre alle applicazioni sopra citate, l'idrogeno sta gradualmente acquisendo importanza in tanti altri settori diversi, tra cui, per esempio l'industria automobilistica, l'aerospaziale e il trasporto pubblico.

2. Il settore automobilistico

La cella a combustibile rappresenta un componente essenziale nel settore dell'*automotive* sostenibile. Un veicolo che utilizza le celle a combustibile (FCV)³ immagazzina il gas in bombole ad alta pressione e, successivamente, lo immette nella cella. Questa tecnologia impiega l'idrogeno come "combustibile", ma per il suo funzionamento richiede anche la presenza di ossigeno. A differenza dei motori a

³ FCV: Fuel Cell Vehicle, cioè veicolo a celle a combustibile

combustione, l'energia viene creata attraverso una reazione elettrochimica, l'idrogeno e l'ossigeno si combinano, generando elettricità e producendo acqua come sottoprodotto. Il suo meccanismo operativo presenta somiglianze con quello delle batterie, ma la distinzione principale tra le due tecnologie risiede nell'autonomia; la cella a combustibile non si scarica, offrendo un vantaggio significativo in termini di durata dell'alimentazione (Fonte: Twi Global).

Negli ultimi anni, le auto elettriche hanno registrato una notevole diffusione su scala globale, principalmente per affrontare le problematiche legate alle emissioni di CO_2 . Tuttavia, l'idrogeno sta emergendo come un possibile concorrente nel panorama dei veicoli a zero emissioni. Secondo quanto riportato da Brambilla G. nel 2023, le differenze sostanziali tra le auto a idrogeno ed elettriche sono molteplici.

Tra i vantaggi delle auto elettriche figura il prezzo di acquisto, in quanto i modelli a cella a combustibile attualmente disponibili sul mercato hanno un prezzo di vendita iniziale che parte dai 65 mila euro contro i 30 mila di un'auto elettrica di fascia media. D'altra parte, le auto a idrogeno presentano aspetti positivi, principalmente in relazione al tempo di rifornimento e l'autonomia. Mentre le auto elettriche impiegano tempi variabili per la ricarica, che vanno dalle 7 alle 12 ore per la ricarica domestica, dalle 2 alle 4 ore con colonnine pubbliche e qualche decina di minuti con la ricarica ultraveloce (Fonte: Sorgenia, 2023), i veicoli a idrogeno richiedono solamente 5 minuti per il rifornimento completo.

Per quanto concerne il rifornimento, il prezzo dell'idrogeno per serbatoi di circa 6 kg si attesta intorno a 13,7 €/kg, portando a un costo totale di circa 70/80 euro per avere un'autonomia di circa 600 km (Gasparini F., 2020). Invece, considerando una batteria di medie dimensioni da 45kWh⁴ e un costo di ricarica nelle colonnine pubbliche italiane di 0.74€/kWh, un veicolo elettrico in Italia spende per un pieno di ricarica, senza tenere conto di eventuali tasse, costi di transazione o tariffe di utilizzo della stazione di ricarica che potrebbero essere applicate, circa 33€ per avere un'autonomia di circa 300 km (Fonte: Leaseplan).

⁴ kWh significa kilowattora, un'unità di misura dell'energia elettrica che misura la quantità di energia consumata o prodotta in un dato periodo di tempo.

A parità di autonomia i costi sono molto simili mentre i tempi di rifornimento sono nettamente diversi. Infatti, bisogna tenere conto che per raggiungere la stessa autonomia ci vogliono due ricariche complete per il veicolo elettrico e che, in caso di coda alla stazione di rifornimento, i tempi si dilatano ulteriormente. Dall'altro lato, però, come riportato da Angi N. nel 2024, i costi di gestione pendono positivamente verso i veicoli elettrici, 0.04 dollari al miglio contro 0.21 dollari al miglio per i veicoli ad idrogeno.

Il costo e il tempo di rifornimento sono soggetti anche all'importante impatto della diffusione delle stazioni di rifornimento, un elemento cruciale per la diffusione sia delle auto elettriche sia di quelle a idrogeno.

Per quanto riguarda i veicoli elettrici, l'Italia, nel 2023 contava 47.228 punti di ricarica di cui solo 5.771 sono di ricarica veloce e l'Unione Europea, nel 2022, stimava di avere operativi 475.122 di cui solo una piccola parte dedicata alla ricarica veloce, causando molto disagi in fase di rifornimento agli acquirenti di questa tipologia di macchine (Godi G., 2023).

Nel 2022, il numero di stazioni di rifornimento di idrogeno nel mondo era di circa 800, con una distribuzione prevalente nei paesi asiatici. La Cina guidava con 250 stazioni, seguita dal Giappone con 161 e dalla Corea del Sud con 141. Nel contesto occidentale, la concentrazione maggiore era in Germania con 93 stazioni, negli Stati Uniti con 54 e in Francia con 21.

Figura 4.1

Numero e localizzazione dei distributori nel mondo nel 2022

China*	250
Japan	161
South Korea	141
Germany	93
United States	54
France	21
Switzerland	13
Netherlands	11
Canada	9
Denmark	7
England	7
Austria	5
Belgium	5
Norway	5
Sweden	4
Australia	4
India	3
Spain	3

Fonte: Statista.com (2022)

Secondo gli ultimi dati del 2023, il numero di stazioni di rifornimento di idrogeno è leggermente aumentato, superando le mille unità. Questa crescita è particolarmente evidente in Cina, Giappone, Corea del Sud, che continuano a trainare gli altri stati, e in alcuni paesi europei come Germania e Francia. Al contrario, stati come Italia e Spagna si trovano in coda alla classifica (Gori G., 2023).

In particolare, la Cina ospita 351 stazioni di rifornimento, corrispondenti al 32,2% del totale globale. Va notato che sono i paesi asiatici a detenere il primato mondiale in

questo settore, poiché il 60% delle stazioni di rifornimento di idrogeno si trovano in quest'area (Cjo Global, 2023).

Dall'altra parte, l'Italia attualmente figura in fondo alla classifica con soltanto due stazioni di rifornimento, collocate a Bolzano e a Mestre (VE⁵). Tuttavia, nel 2023 è stata approvata un'iniziativa volta a incrementare queste stazioni a 38 entro il 2026. Il finanziamento di tale progetto avverrà inizialmente tramite uno stanziamento statale di 103,5 milioni di euro, parte dei 230 milioni totali assegnati attraverso i fondi del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR⁶).

Secondo quanto riportato dal quotidiano "La Repubblica" nel 2023, le nuove stazioni di rifornimento saranno strategicamente posizionate in aree cruciali per i trasporti stradali pesanti. Queste includono l'asse stradale del Brennero, il corridoio est-ovest da Torino a Trieste e i corridoi europei della rete TEN-T⁷.

⁵In provincia di Venezia

⁶ Pnrr è il piano nazionale di ripresa e resilienza, cioè il programma con cui il governo intende gestire i fondi del "Next generation Eu", lo strumento di ripresa e rilancio economico introdotto dall'Unione Europea per risanare le perdite causate dalla pandemia.

⁷ I corridoi europei TEN-T (Trans-European Transport Networks) sono reti di trasporto integrate a livello europeo, progettate per migliorare e ottimizzare la connettività infrastrutturale nei settori dei trasporti su strada, ferrovia, acqua e aria. L'obiettivo principale di queste reti è facilitare lo spostamento efficiente delle persone e delle merci su scala continentale

Figura 4.2

Posizione delle stazioni di rifornimento ad idrogeno in Italia nel 2026



Fonte: NewsAuto.it (2023)

In dettaglio, il primo finanziamento statale per lo sviluppo della rete di distribuzione di idrogeno vede una distribuzione del 77% destinato prevalentemente alle regioni del Nord, con particolare attenzione al Veneto con 27 milioni, Trentino-Alto Adige con 20 milioni, Lombardia e Piemonte. Il restante 23% è rivolto alle regioni del Centro e del Sud. A titolo di esempio, in Puglia saranno investiti 8 milioni, nel Lazio 3 milioni e in Calabria 2 milioni (Fonte: NewsAuto 2023).

Artemi P., nel 2023, pubblica in un suo articolo i dati raccolti da Jato Dynamics⁸ per quanto riguarda le vendite globali delle auto alimentate ad idrogeno. Nel 2021 riporta che queste vendite sono state di 15.500 unità e, come commentato dal Professor Bonalumi D.⁹, decisamente inferiori rispetto a quelle di veicoli che utilizzano altri tipi di carburante ma comunque con un incremento importante rispetto al 2020, nello specifico dell'84%.

⁸ La principale piattaforma online di ricerca e analisi nel settore automotive

⁹ Docente al politecnico di Milano al dipartimento di energia.

L'articolo di Artemi P. procede analizzando i modelli disponibili alla vendita delle vetture ad idrogeno. Queste non sono varie: *“l'anno scorso il 98% delle vendite di auto a idrogeno corrispondeva a due vetture: la Hyundai Nexo e la Toyota Mirai. Il resto proveniva dalle ultime unità ancora sul mercato di Honda Clarity e da pochissimi veicoli Renault, Maxus, Bmw e dalla furgonetta e-Expert Hydrogen di Peugeot. Il settore delle auto a idrogeno in Italia quasi non esiste. Nel corso dei primi 10 mesi del 2022 sono stati immatricolati appena 13 veicoli: 11 Hyundai Nexo e due Toyota Mirai”*

Figura 4.3

Modello di Toyota Mirai



Fonte: Toyota.it

Secondo le informazioni fornite dal sito ufficiale di Toyota, il modello Mirai presenta diverse opzioni di prezzo a seconda della configurazione della vettura. La versione "Pure" è disponibile a partire da 69.800 €, la versione "Essence" da 73.400 € e la versione "Essence+" da 80.450 €. Inoltre, sul sito si annuncia che la tecnologia "Toyota Fuel Cell" è garanzia di un'autonomia di guida fino a 650 km e un tempo di rifornimento di 5 minuti.

Così come la Toyota Mirai, anche la Hyundai Nexo permette un rifornimento completo in 5 minuti e un'autonomia poco superiore ai 650 km. A listino esistono due modelli, la "XLINE" con un costo totale di 78.300 € e la "XCLASS" venduta a 81.300 € (Fonte: Hyundai).

Figura 4.4

Modello di Hyundai Nexo



Fonte: *AlVolante.it* (2018)

Come documenta Artemi P., nel 2024 la casa automobilistica sudcoreana “Hyundai” ha deciso di fare importanti investimenti nel settore: *“investimenti per una decina di miliardi di euro e l’aumento fino a 700mila unità della capacità annuale di produzione di sistemi a celle a combustibile. All’isola di Jeju, in Corea, uno dei più grandi laboratori mondiali della mobilità sostenibile, Hyundai fornirà 1.200 veicoli passeggeri, 300 autobus e 200 camion per la nettezza urbana, tutti a idrogeno, e da quest’anno già si trovano sull’isola stazioni di ricarica portatili.”*

Secondo un articolo di Anfi N. del 2024, questi 2 modelli sono i più venduti al mondo, sia nel 2021 che nel 2022 hanno registrato circa 15 mila vendite annuali. Però, questi dati sono stati spinti soprattutto da *“consistenti incentivi governativi e delle case, come Toyota che in California offriva la Mirai a meno di 18.000 dollari insieme a idrogeno gratis per 100.000 km e Hyundai che offre la Nexo da 60.000 dollari a metà*

prezzo in Corea del Sud.”. Infatti, uno studio di IDTechEx¹⁰ ha previsto che entro il 2044 la quota di veicoli a zero emissioni alimentati ad idrogeno sarà solo del 4%, discorso diverso per i camion che registreranno un 20% della quota totale.

Dunque, secondo un articolo del 2024 della testata “AutomotiveUp”, le sfide che ostacolano la diffusione delle vetture a idrogeno includono principalmente la carenza di un'infrastruttura di rifornimento adeguata, con poco più di mille stazioni nel mondo, i costi elevati di acquisto e gestione dei veicoli, e l'inefficienza energetica lungo l'intera catena di approvvigionamento. È evidente che per raggiungere una maggiore penetrazione nel mercato sono necessari interventi significativi a livello di sistema anche se per molti, come l'ingegnere Bonalumi D., un mondo interamente ad idrogeno non sarebbe completamente efficiente, infatti: *“Forse affiancare l'idrogeno all'elettricità sostenibile potrebbe essere l'uovo di Colombo per allentare la paura del futuro e decisioni draconiane”* (Artemi P., 2023)

L'idrogeno non ha ancora ottenuto un notevole successo nell'ambito automobilistico, ma ciò non implica necessariamente lo stesso destino quando si parla di altre applicazioni, come il settore dei trasporti o quello aerospaziale.

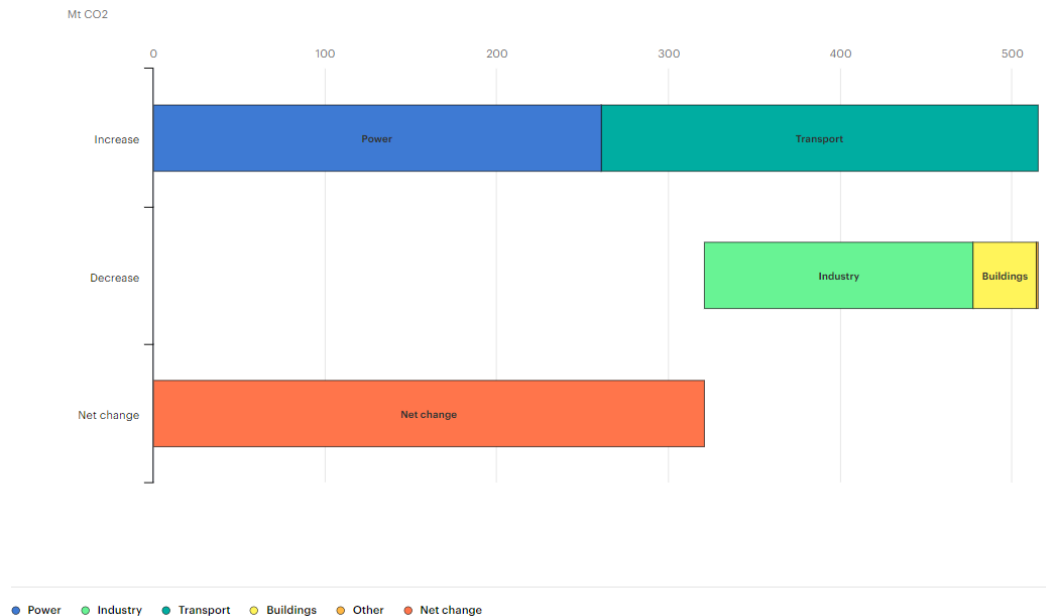
3. Il settore dei trasporti

L'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA), nel marzo del 2023 ha condotto un'analisi sulle variazioni delle emissioni di CO2 nei diversi settori economici tra il 2020 e il 2021. Risulta evidente che, in generale, le tendenze mostrano un aumento netto delle emissioni anziché una diminuzione, andando contro gli obiettivi di un'economia volta a ridurle nel prossimo futuro.

¹⁰ IDTechEx è una società di ricerca e consulenza che fornisce analisi di mercato e informazioni sull'innovazione tecnologica in vari settori

Figura 4.5

Variazione delle emissioni di CO2 per settore tra il 2021-2022



Fonte: IEA (03/2023)

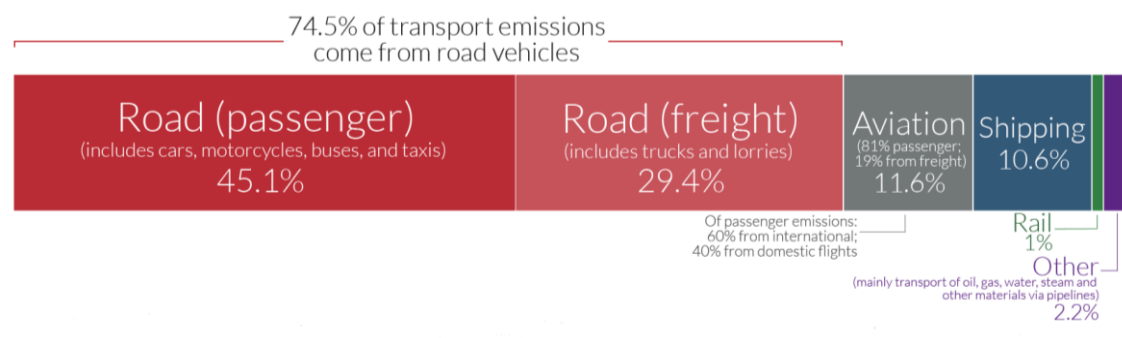
Il settore dei trasporti e dell'energia hanno registrato una significativa crescita, con un aumento rispettivo di 254 Mt¹¹ di CO2 e 261 Mt. Tuttavia, questa crescita netta di 321 Mt è parzialmente compensata dalle riduzioni delle emissioni nel settore dell'edilizia, nell'industria e in altri settori.

Il settore dei trasporti contribuisce in modo significativo alle emissioni globali di CO2, rappresentando il 20% del totale mondiale. Il rapporto della IEA del 2018 quantificava l'ammontare delle emissioni di questo settore a 8 miliardi di tonnellate, di cui il 74,5% veniva generato principalmente dai veicoli su strada. Nello specifico, il 45,1% delle emissioni riguarda le vetture, comprese automobili, motociclette, autobus e taxi, mentre il restante 29,4% è attribuibile a camion e autocarri rappresentando, in definitiva, il 15% delle emissioni globali.

¹¹ Mt significa "mega tonnellata" ed ogni mega tonnellata equivale a 1 milione di tonnellate.

Figura 4.6

Composizione delle emissioni globali di Co2 del settore dei trasporti



Fonte: Ourworldindata.org basato sui dati dell'IEA e dell'ICCT del 2018 (2020)

Inoltre, l'aviazione contribuisce all'11,6% delle emissioni del settore dei trasporti, suddivise tra l'81% per i voli civili passeggeri e il 19% per quello merci, rappresentando quindi circa il 2,5% delle emissioni totali globali. Seguono il settore navale al 10,6% e il trasporto ferroviario e merci che insieme ammontano al 3,2% del totale delle emissioni del settore dei trasporti.

Il rapporto della IEA del gennaio 2023 indica che le emissioni del settore dei trasporti prevedono forti aumenti in tutte le sue componenti. Per mitigare questa crescita viene anche sottolineata l'importanza di adottare tecnologie basate sull'elettrificazione e sull'idrogeno.

Come riportato da Sicuro M. nel 2023, ci sono diverse iniziative in tutto il settore per integrare l'idrogeno come elemento chiave nella decarbonizzazione.

Per quanto riguarda l'aviazione: “[...] il gigante europeo Airbus¹² ha annunciato la volontà di eliminare le emissioni di carbonio dai viaggi aerei entro il 2035 con ZEROe. Secondo l'Environmental and Energy Study Institute “nonostante un significativo miglioramento dell'efficienza degli aeromobili il trasporto aereo di passeggeri è il settore responsabile della crescita di emissioni individuali più elevata e più rapida”.”

¹² Airbus è un'azienda europea tra le principali del settore aerospaziale e della difesa a livello mondiale.

ZEROe è il programma lanciato da Airbus con l'obiettivo di sviluppare un aereo idrogeno-elettrico per i voli commerciali entro il 2035. Il modello scelto per il progetto è l'A380, il più grande e spazioso aereo passeggeri al mondo. (D'Amato E., 2023).

In concorrenza con Airbus nell'innovazione tecnologica c'è la H2Fly, azienda tedesca specializzata nella costruzione di propulsori per aerei elettrici ad idrogeno. Quest'ultima, tramite il velivolo HY4, è riuscita a completare il primo volo pilotato da un essere umano alimentato ad idrogeno liquido. Come riportato da Barontini F. nel 2023, l'idrogeno all'interno del velivolo ha permesso di ridurre il peso e il volume dei serbatoi ma di raddoppiarne l'autonomia fino a 1.500 km.

La testata "Greenreport" nel 2023 ha riportato lo studio "*Analysing the costs of hydrogen aircraft*"¹³, secondo il quale, nel 2035, l'utilizzo degli aerei a idrogeno potrebbe essere più costoso dell'8% rispetto all'uso del cherosene. L'aspetto fondamentale per renderlo più economico è quello di riuscire a tassare il carburante in modo tale che, nelle previsioni, la differenza diventi positiva del 2% a favore dei velivoli ad idrogeno. Parte integrante di questa visione è Airbus con le sue promesse di riuscire a rispettare la promessa per la quale ha definito la data di lancio del proprio velivolo entro il 2035.

Lo studio mostra anche che: "*Il costo totale dell'introduzione di aerei a idrogeno per l'aviazione intraeuropea sarebbe di 299 miliardi di euro entro il 2050. Lo sviluppo di aeromobili a idrogeno rappresenterebbe solo il 5% del costo (15 miliardi di euro). [...] La maggior parte della spesa non sarà sostenuta dal settore. Si basa invece sul più ampio sviluppo dell'economia verde dell'idrogeno, che si sta affermando in parallelo. Oltre la metà dei costi (54% o 161 miliardi di euro) sarà destinata alla produzione di idrogeno verde. Un altro 23% sarà necessario per la liquefazione dell'idrogeno. [...] Altri costi riguardano lo sviluppo di infrastrutture per l'idrogeno negli aeroporti (12%) e la distribuzione del carburante agli aeroporti (6%)*". Importante sottolineare che tale costo deve essere sostenuto sia dall'industria dell'aviazione sia dai suoi utenti.

¹³ In italiano: Analisi dei costi degli aerei a idrogeno.

L'obiettivo entro il 2035 può essere raggiunto ma è necessario che sia accompagnato nel tempo da regolamentazione, dagli investimenti e del calo dei prezzi per agevolarne lo sviluppo e diffusione.

Così come l'aviazione, anche il settore ferroviario sta muovendo i primi passi verso l'idrogeno con treni che raggiungono un'autonomia di 1.000 km, superando di gran lunga i circa 100 km dei treni elettrici. Anche il rifornimento offre grandi vantaggi con una ricarica rapida e consentendo un tempo di utilizzo consecutivo di 18 ore. Queste iniziative sono già operative in Germania, con Regno Unito e Francia nei quali stanno avanzando proposte per sostituire completamente i vecchi modelli di treni con quelli a idrogeno. In Italia, dove addirittura metà delle tratte nazionali non sono elettrificabili, ci potrebbe essere già una riconversione entro il 2030.

In Germania, con l'obiettivo di rendere più ecologiche le tratte ferroviarie, Knut Ringat, CEO di Rhein-Main-Verkehrsverbund (RMV) ¹⁴, ha investito 500 milioni di euro nel 2020 per ordinare 27 treni a idrogeno, sostituendo così i veicoli diesel. Un articolo del 2023 sul blog "Ferrovie.Info", citando il quotidiano tedesco "Die Welt", riporta gli sviluppi di questo progetto. Nonostante i molteplici vantaggi dell'idrogeno, RMV ha dovuto affrontare notevoli sfide sulle sue linee ferroviarie.

All'inizio, nel dicembre 2022, l'azienda fornitrice ha consegnato 6 dei 27 treni, ma la maggior parte di essi ha presentato problemi, soprattutto legati al rifornimento di idrogeno, impedendo il loro utilizzo e causando ingenti disagi agli utenti in attesa della loro corsa.

Nel maggio 2023, sono stati messi in funzione 12 treni a idrogeno, mentre il 13° e 14° erano ancora in fase di test e la consegna dei rimanenti era prevista entro la fine del terzo trimestre dello stesso anno.

Nonostante le difficoltà incontrate, RMV mantiene la sua visione considerando la nuova tecnologia dell'idrogeno come fondamentale e un elemento chiave per il futuro dei

¹⁴ Il Rhein-Main-Verkehrsverbund (RMV) è un consorzio di trasporto pubblico nella regione del Rhein-Main, nel centro-ovest della Germania. Questa area comprende la città di Francoforte sul Meno e le zone circostanti. Il RMV coordina e organizza i servizi di trasporto pubblico, inclusi treni, metropolitane, tram e autobus, al fine di fornire un sistema di trasporto integrato per la regione.

trasporti su rotaia, anche se attualmente risulta ancora in una fase di sviluppo ed immatura.

Anche l'Italia ha iniziato a puntare sull'idrogeno nel settore ferroviario. Con il progetto "*H2iseO Hydrogen Valley*"¹⁵, finanziato dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) con un investimento di 292 milioni di euro, sono stati acquistati 14 treni a idrogeno del valore di 160 milioni di euro.

L'obiettivo principale è lo sviluppo di una filiera economica e industriale dell'idrogeno nella regione di Val Camonica (BG¹⁶). Il progetto si sviluppa in tre fasi: inizialmente, l'acquisto e l'operatività di 6 treni a idrogeno lungo la linea Brescia-Iseo-Edolo gestita da FerrovieNord. Successivamente, entro la fine del 2023, si prevede di mettere in servizio gli altri 8. Infine, a partire dal 2024, verranno introdotti 40 autobus a idrogeno per potenziare ulteriormente l'utilizzo di questa tecnologia sostenibile (Camera.it, 2021).

Infine, oltre ad aerei e treni, c'è anche il trasporto pubblico locale. In Italia ci sono numerosi progetti volti all'acquisto e alla messa in servizio di autobus ad idrogeno, tra cui quello del comune di Bolzano e quello del comune di Bologna.

L'azienda Solaris Bus & Coach¹⁷ sta sviluppando modelli di bus ad idrogeno sempre più sofisticati. Nel 2021 è stato impiegato nel servizio il modello "Solaris Urbino 12 Hydrogen" nella provincia di Bolzano che ne conta già 12 nella sua flotta. La tecnologia di questo modello prevede l'utilizzo di: "*cinque serbatoi con capacità di 312 litri ciascuno, in grado di contenere un rifornimento completo di 37,5 kg di idrogeno aeriforme in appena dieci minuti.*". (Comi G., 2022)

Invece, per quanto riguarda Bologna, come riporta il giornale "BolognaToday" a fine 2022, il comune siglò l'accordo con Tper¹⁸ ed Srm¹⁹ per acquistare: "*127 autobus*

¹⁵ Questo progetto ha tre obiettivi principali: sviluppo di una filiera economica ed industriale dell'idrogeno, con applicazioni a partire dal settore della mobilità, sviluppo di una filiera territoriale dell'idrogeno, avviando la conversione energetica di un territorio e la completa decarbonizzazione di una parte significativa del trasporto pubblico locale

¹⁶ In provincia di Bergamo

¹⁷ Solaris Bus & Coach è uno dei principali produttori europei di autobus e filobus.

¹⁸ Tper sta per Trasporto passeggeri Emilia Romagna, un'azienda di trasporto pubblico.

¹⁹ La SRM – Società Reti e Mobilità S.r.l. è l'Agenzia per la mobilità ed il trasporto pubblico locale del Comune di Bologna e della Città metropolitana di Bologna

alimentati a idrogeno entro il 30 giugno 2026, di cui almeno 34 entro fine 2024, e la realizzazione delle relative infrastrutture di supporto per un investimento di oltre 90 milioni di euro di fondi PNRR ottenuti dal Comune di Bologna.”. Questi bus “Solaris Urbino 12 hydrogen” avrebbero il compito di coprire circa il 12% dei veicoli in servizio sulla rete del trasporto pubblico di Bologna.

4. Il settore aerospaziale e la NASA

Anche il settore aerospaziale investe già da diversi anni nell'utilizzo dell'idrogeno come elemento cruciale per le missioni spaziali. I razzi, tramite una forte spinta dal basso grazie ai propulsori, sono realizzati allo scopo di superare l'atmosfera terrestre per poi arrivare nello spazio. La progettazione e realizzazione dei razzi e dei loro percorsi richiede calcoli ponderati con precisione millimetrica, considerando ogni variabile necessaria per garantire il successo del progetto.

Come riportato da Sibilìa T. nel 2023, un elemento di cruciale importanza in questo contesto è rappresentato dai propulsori, i quali ricoprono un ruolo fondamentale nella generazione della spinta essenziale per il lancio del razzo. Tale spinta deriva dalla combustione di sostanze note come propellenti²⁰, di cui esistono varie tipologie, principalmente categorizzate come solide e liquide, ma con l'inclusione anche di propellenti ibridi e ionici.

Il propellente solido utilizza due materiali solidi, un combustibile e un ossidante²¹ che reagiscono generando calore e gas quando vengono accesi. Il propellente viene tenuto all'interno dei *booster*, piccoli razzi situati al fianco del razzo principale con lo scopo di fornire un'ulteriore spinta nel tentativo di uscire dall'atmosfera. Questi razzi, però, hanno il difetto che una volta accesi non possono interrompere la combustione. Il gas prodotto, quindi, viene espulso con grande forza, fornendo la spinta necessaria per far decollare il

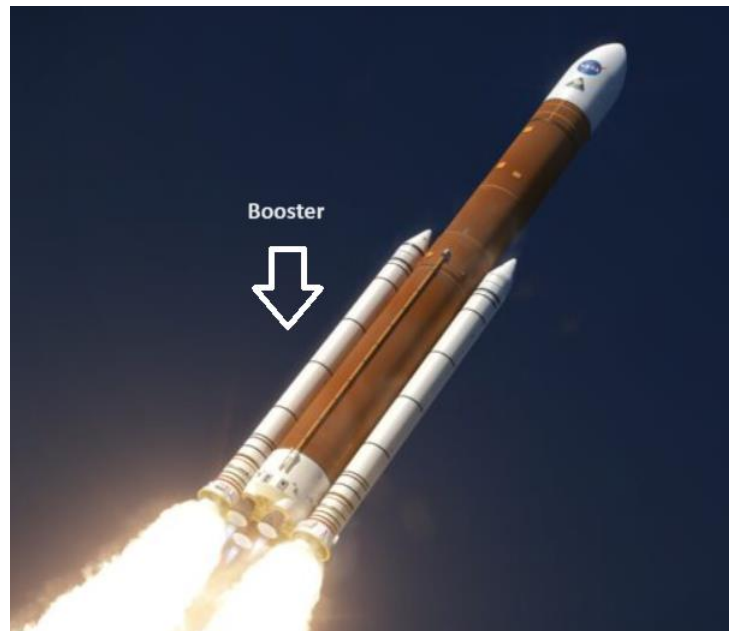
²⁰ Il termine "propellente" si riferisce a una sostanza utilizzata per generare spinta in un veicolo spaziale e ne esistono di diverse tipologie come solido, liquido o gassoso.

²¹ Nel contesto dei propellenti, l'ossidante è la sostanza che fornisce l'ossigeno necessario per la combustione del combustibile. Ad esempio, nel caso dell'idrogeno liquido e dell'ossigeno liquido utilizzati come propellenti in alcune missioni spaziali, l'ossigeno liquido funge da ossidante. Durante la combustione, l'idrogeno e l'ossigeno reagiscono per formare acqua (H₂O), rilasciando energia e generando spinta nel processo.

razzo. Adatto a voli di breve durata, è economico e facile da maneggiare, ma risulta meno potente e ha una durata limitata rispetto ad altri tipi di propellenti.

Figura 4.7

Illustrazione del booster dei propellenti solidi



Fonte: Astrospace.it (2020)

Il propellente liquido comprende, come quello solido, un combustibile e un ossidante, entrambi in forma liquida. Comunemente utilizzate sono sostanze come il kerosene e l'idrogeno, spesso combinati con ossigeno liquido. Questi vengono contenuti in serbatoi e, a differenza dei propellenti precedenti, hanno la possibilità di essere accesi e spenti a piacimento. Anche se più complesso e costoso rispetto ai propellenti solidi, è più potente e versatile, spesso impiegato nei razzi a lungo raggio. Tuttavia, presenta maggiori rischi a causa dell'alta infiammabilità delle sostanze utilizzate.

Sibilia T. conclude descrivendo il propellente ibrido e quello ionico. L'ibrido viene presentato come una via di mezzo tra gli elementi vantaggiosi dei propellenti precedenti. Tramite l'utilizzo di un combustibile solido e un ossidante liquido, risulta più versatile e potente rispetto ai propellenti solidi, mantenendo una complessità e un costo inferiore

rispetto a quelli liquidi e, come quest'ultimi, è molto diffuso nei viaggi a medio-lunga distanza.

Infine, il propellente ionico risulta molto complesso dal punto di vista tecnico, è molto efficiente e promettente ma ancora in fase di sviluppo e quindi non molto diffuso all'interno del settore.

La NASA²², nel 2022, si è trovata ad affrontare le sfide legate all'utilizzo dell'idrogeno come sostanza propellente.

Come evidenziato da Manietti E. (2022), nonostante le ottime prestazioni offerte, l'idrogeno presenta notevoli difficoltà di controllo. A causa delle sue dimensioni estremamente ridotte, la sostanza tende a disperdersi facilmente, sfuggendo dai serbatoi di stoccaggio. In aggiunta, il mantenimento dell'idrogeno allo stato liquido richiede temperature molto rigide, un compito impegnativo soprattutto per serbatoi di grandi dimensioni come quelli dei razzi da 800 tonnellate. Poiché tra il rifornimento e il lancio del razzo trascorrono diverse ore, le temperature tendono a fluttuare, rendendo essenziale l'impiego di rivestimenti significativi per prevenire la dispersione termica e dell'idrogeno stesso.

Il programma Artemis²³ della NASA prevedeva di utilizzare l'SLS (*Space Launch System*), un razzo con costi di sviluppo da 11.8 miliardi di dollari spesi dal 2011, molto pesante ma con capacità senza precedenti. Questo razzo utilizza propellenti liquidi, composti da idrogeno liquido come combustibile e ossigeno liquido come ossidante.

²² National Aeronautics and Space Administration (NASA) è l'agenzia spaziale civile degli Stati Uniti d'America. La sua missione principale è di esplorare lo spazio, condurre ricerche scientifiche e sviluppare tecnologie avanzate per l'avanzamento dell'esplorazione spaziale.

²³ Il programma Artemis è una serie di missioni lunari in corso gestite dalla NASA. Una missione, Artemis 1, è già stata completata alla fine del 2022.

Figura 4.8

Immagine dell'SLS



Fonte: Ilpost.it (2022)

Dato che le pompe di rifornimento rimangono attaccate fino al momento del lancio e che l'idrogeno è quasi impossibile contenerlo al 100% a causa delle sue caratteristiche: *“gli ingegneri della NASA hanno definito un limite di tolleranza per la perdita di idrogeno sulla rampa di lancio [...]”. Se intorno a questo la concentrazione di idrogeno è inferiore*

al 4 per cento si può proseguire con la preparazione del lancio, altrimenti occorre fermarsi perché all'aumentare della quantità di idrogeno disperso aumentano i rischi di un incendio che potrebbe distruggere il razzo.” (Manietti E., 2022).

In relazione al lancio del SLS dal costo che può arrivare fino a 2,5 miliardi di dollari del 3 settembre 2022, la NASA aveva rilevato circa il doppio e in alcuni casi il triplo della concentrazione massima di idrogeno consentita. Nonostante ulteriori tentativi, si dovette rinviare il lancio ma il problema non rappresentava una novità: *“Che l'idrogeno fosse uno dei punti più delicati di SLS era noto da tempo, considerato che lo stesso elemento era stato la principale causa di problemi ricorrenti con gli Shuttle. In media, ogni lancio dello Shuttle fu rinviato una volta e in alcuni casi si arrivò a cinque rinvii per una stessa missione.” (Manietti E., 2022).*

Conclusioni

L'utilizzo dell'idrogeno, soprattutto nella sua forma "verde", potrebbe rappresentare una rivoluzione, nonostante i costi elevati, specialmente nei settori *hard to abate*, cioè quelle attività difficili da decarbonizzare e che contribuiscono significativamente alle emissioni globali di gas serra. Un esempio tangibile di questo approccio è la costruzione della prima acciaieria verde d'Europa in Svezia, a 900 km a nord di Stoccolma, che sfrutterà esclusivamente idrogeno verde.

Generare idrogeno verde e stoccarlo significa riuscire a conservare l'elettricità rinnovabile che, ad oggi, ha il grande difetto di non poter essere immagazzinata. Questo è un enorme problema che affligge la nostra società e, la sua risoluzione, potrebbe a sua volta incrementare la produzione e l'utilizzo delle energie rinnovabili contribuendo, con un effetto esponenziale, alla riduzione di emissioni di CO₂ nell'aria.

Tuttavia, la transizione dall'idrogeno grigio a quello verde richiederebbe di triplicare l'intera produzione globale di energia elettrica generata nel 2019 da pale eoliche e pannelli fotovoltaici. Questo implica la necessità di una forte pianificazione politica, prima ancora che economica e strutturale.

Al di fuori dei settori difficili *hard to abate*, senza una chiara *roadmap* a livello progettuale e legislativo, l'utilizzo dell'idrogeno risulta difficile da giustificare dal punto di vista economico e ambientale.

Nel contesto del trasporto su strada, l'impiego dell'idrogeno si presenta come un'opzione poco conveniente se confrontata con le alternative già presenti sul mercato. Per le batterie delle auto elettriche si sfrutta l'infrastruttura preesistente per la fornitura di energia, facilitando così la distribuzione attraverso la rete e i distributori. D'altra parte, l'idrogeno richiede una filiera produttiva e distributiva lunga e molto energivora per giungere alla pompa di rifornimento. In conclusione, considerando l'intero processo, un'auto a idrogeno consuma il triplo dell'energia rinnovabile rispetto a un veicolo a batteria, risultando anche più costosa.

Lo stesso discorso vale per gli autobus ad idrogeno. Numerosi progetti sono in atto ma non tutti hanno avuto successo. L'anno scorso, il comune di Montpellier in Francia ha annullato l'ordine di 51 bus a idrogeno annunciato nel 2019. Qualche mese fa, inoltre, la

cittadina tedesca di Wiesbaden ha comunicato che smetterà di utilizzare autobus a celle a combustibili dopo un solo anno di attività a causa delle inefficienze.

Il settore sembra essere affetto dal fenomeno di "greenwashing", poiché l'idrogeno, almeno per ora, non sembra ridurre significativamente le emissioni né i costi per i consumatori.

È fondamentale considerare anche gli aspetti geopolitici, poiché la produzione di idrogeno verde richiede l'uso di fonti di energia rinnovabile, spesso concentrate in paesi che dispongono di abbondanti risorse, come l'energia solare in Africa. Utilizzare le riserve d'acqua africane nella produzione di idrogeno, tramite l'elettrolisi, per l'occidente non è eticamente sostenibile, esattamente come tutti quei progetti che vengono avviati all'interno dei paesi in via di sviluppo ma che non contemplano, in fase di definizione, il confronto con le comunità locali.

In conclusione, sebbene l'idrogeno possa rappresentare una soluzione per affrontare le sfide legate alle emissioni di gas serra in futuro, è necessario un impegno economico ed etico considerevole da parte di tutti gli attori coinvolti, dalle aziende ai *policy maker*. Tuttavia, attualmente, l'idrogeno non sembra essere la sostanza del presente.

Riferimenti Bibliografici

- Angi N., AlVolante.it, “Auto a idrogeno: uno sviluppo con il freno a mano”, data di pubblicazione 08/02/2024, <https://www.alvolante.it/news/auto-idrogeno-ipotesi-sviluppo-futuro-392201>
- Artemi P., StyleMagazine.it, “Auto a idrogeno? Udite, udite... andrà (probabilmente) anche sulla luna!”, data di pubblicazione 29/04/2023, <https://style.corriere.it/lifestyle/motori/auto-a-idrogeno-caratteristiche-modelli-vantaggi/3/>
- Astrospace.it, “Space Launch System, il razzo più potente e controverso al mondo” <https://www.astrospace.it/2020/10/16/space-launch-system-il-razzo-piu-potente-e-controverso-al-mondo/>
- Barontini F., Insideevs.it, “Completato il primo volo di un aereo a idrogeno liquido con pilota”, data di pubblicazione 8/09/2023, <https://insideevs.it/news/685762/aereo-idrogeno-liquido-volo-pilota/>
- Barthelemy H., “Hydrogen storage technologies: compatibility of materials with hydrogen”, data di pubblicazione 06/2009, https://conference.ing.unipi.it/ichs2007/fileadmin/user_upload/PAP_01.4.66_barthelemy.pdf
- Blanco B., Energypost, “What’s best for Hydrogen transport: ammonia, liquid hydrogen, LOHC or pipelines?”, data di pubblicazione 5/05/2022, <https://energypost.eu/whats-best-for-hydrogen-transport-ammonia-liquid-hydrogen-lohc-or-pipelines/>
- BolognaToday.it, “Bus a idrogeno in città: i primi in circolazione nel 2024”, data di pubblicazione: 03/12/2022, <https://www.bolognatoday.it/cronaca/bus-idrogeno-tper-2024.html>
- BolognaToday.it, “Via al bando di gara per 127 bus a idrogeno”, data di pubblicazione: 08/03/2023, <https://www.bolognatoday.it/green/mobilita/via-al-bando-di-gara-per-127-bus-a-idrogeno.html#:~:text=Il%20progetto%2Didrogeno%20a%20Bologna,ottenuti%20dal%20Comune%20di%20Bologna.>
- Borrell J., European External Action Service, “La neutralità della Cina in termini di emissioni di carbonio nel 2060: un possibile fattore di cambiamento per il clima”, data di pubblicazione 23/10/2020, https://www.eeas.europa.eu/eeas/la-neutralit%C3%A0-della-cina-termini-di-emissioni-di-carbonio-nel-2060-un-possibile-fattore-di_it
- Brambilla G., Open.online, “Auto, che ruolo avrà l’idrogeno? «Ottimo per il trasporto pesante, ma non sostituirà mai l’elettrica» – Le interviste”, data di pubblicazione 9/03/2023, <https://www.open.online/2023/03/09/auto-idrogeno-alternativa-elettrica-interviste/>

- Camera.it, “Progetto H2iseO”, data di pubblicazione, 06/2021, https://www.camera.it/application/xmanager/projects/leg18/attachments/upload_file_doc_acquisiti/pdfs/000/005/837/Memoria_FNM.pdf
- Cavuoto M. C., “Come si produce l’idrogeno e perché è il combustibile del futuro?”, data di pubblicazione 8/11/2022, <https://energycue.it/come-produce-idrogeno-combustibile-futuro/35462/>
- Cjo Global, “Hoow Many Hydrogen Refuelling Stations Are There in the World”, data di pubblicazione 11/08/2023, <https://www.cjoglobal.com/2023/08/11/how-many-hydrogen-refuelling-stations-are-there-in-the-world/>
- Ciriaco R., Insideevs, “La prima nave porta idrogeno al mondo è arrivata a destinazione”, data di pubblicazione 24/01/2022”, <https://insideevs.it/news/562284/nave-porta-idrogeno-australia-giappone/>
- Comi G., Passionetrasporti.com, “Solaris Urbino H2: il ritorno dell’idrogeno a Milano”, data di pubblicazione 13/04/2022”, <https://passionetrasporti.com/2022/04/13/solaris-urbino-h2-il-ritorno-dellidrogeno-a-milano/>
- Deloitte, “How Green Hydrogen Can Energize the Path to Net Zero By 2030”, data di pubblicazione 11/06/2023, <https://deloitte.wsj.com/sustainable-business/how-green-hydrogen-can-energize-the-path-to-net-zero-by-2030-d453c411>
- De Blasio N. e Pflugmann F., ISPI, “Cina: superpotenza dell’idrogeno rinnovabile?”, data di pubblicazione 28/05/2021, <https://www.ispionline.it/it/pubblicazione/cina-superpotenza-dellidrogeno-rinnovabile-30625>
- Del Zotto L., Rinnovabili.it, “Idrogeno dalla gassificazione di biomasse di scarto”, data di pubblicazione 16/06/2023, <https://www.rinnovabili.it/energia/idrogeno/idrogeno-dalla-gassificazione-di-biomasse-di-scarto/>
- D’Amato E., “Aerei a zero emissioni? Airbus ci sta lavorando”, data di pubblicazione 2/03/2023, <https://moveo.telepass.com/aerei-a-zero-emissioni-airbus-ci-sta-lavorando/#:~:text=Airbus%20ZEROe%3A%20come%20funziona&text=Finalit%C3%A0%20C3%A8%20quella%20di%20sviluppare,spazioso%20aereo%20passeggeri%20al%20mondo>
- EconomyUp, “Auto a idrogeno: che cos’è, come funziona e quali prospettive ha in Italia e in Europa”, data di pubblicazione 19/02/2024, <https://www.economyup.it/automotive/auto-a-idrogeno-che-cose-come-funziona-e-quali-prospettive-ha-in-italia-e-in-europa/>
- Elettricomagazine, “I 7 colori dell’idrogeno: panoramica sui processi di produzione”, data di pubblicazione 24/06/2022, <https://elettricomagazine.it/news-tecnologia/7-colori-idrogeno-processi-produzione/>
- Energoclub, “Fonti primarie e fonti secondarie di energia”, <https://www.energoclub.org/page/fonti-primarie-e-secondarie>

- Energoclub, “Produzione idrogeno: Gassificazione del carbone”, <https://www.energoclub.org/page/gassificazione-del-carbone>
- Energoclub, “Produzione idrogeno : Elettrolisi dell’acqua”, <https://www.energoclub.org/page/elettrolisi>
- En-former, “Converting natural gas pipelines to carry hydrogen”, data di pubblicazione 3/03/2022, <https://www.en-former.com/en/converting-natural-gas-pipelines-to-carry-hydrogen/>
- Enel Green Power, “Il cambiamento climatico: le cause, gli effetti, i rimedi”, <https://www.enelgreenpower.com/it/learning-hub/transizione-energetica/cambiamento-climatico-cause-conseguenze>.
- Enel Green Power, “La transizione energetica”, <https://www.enelgreenpower.com/it/learning-hub/transizione-energetica>
- Energy.gov, “Gaseous Hydrogen Delivery”, <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/gaseous-hydrogen-delivery#:~:text=Gaseous%20hydrogen%20is%20most%20commonly,hydrogen%20are%20called%20tube%20trailers>.
- Energy.gov, “Hydrogen Pipelines” <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-pipelines>
- Eni, “Progetto Ravenna CCS”, <https://www.eni.com/ravenna-ccs/it-IT/progetto/ravenna-hub.html#:~:text=I%20numeri%20del%20progetto&text=Nella%20Fase%20industriale%2C%20dal%202026,Ravenna%20e%20del%20Nord%20ItaliaFutura>
- Ferrovie.info, “Ferrovie: La Germania fa i conti con il "disastro dei treni a idrogeno", data di pubblicazione 19/05/2023, <https://www.ferrovie.info/index.php/it/13-treni-reali/26421-ferrovie-la-germania-fa-i-conti-con-il-disastro-dei-treni-a-idrogeno>
- Futura Network, “Ecco perché l’idrogeno verde sarà protagonista nel sistema energetico integrato Ue”, data di pubblicazione 5/04/2023, <https://futanetwork.eu/clima-ed-energia/692-3809/ecco-perche-lidrogeno-verde-sara-protagonista-nel-sistema-energetico-integrato-ue>
- Frost R., Euronews, “Nucleare: quali paesi Ue sono a favore e quali contrari?”, data di pubblicazione 27/03/2023, <https://it.euronews.com/green/2023/03/27/nucleare-quali-paesi-ue-sono-a-favore-e-quali-contrari>
- Gallavotti B., Museo Nazionale Scienza e Tecnologia Leonardo Da Vinci, “Auto elettriche: sono "la soluzione"?", data di pubblicazione 20/01/2023, <https://www.museoscienza.org/it/fatti-per-capire/auto-elettriche>.
- Gandelli S., Geopop, “Pro e contro dell’energia nucleare spiegati in modo semplice”, data di pubblicazione 22/10/2022, <https://www.geopop.it/pro-e-contro-dellenergia-nucleare-spiegati-in-modo-semplice/>
- Gasparini F., Insideevs, “Quanto costa fare il pieno a un'auto a idrogeno”, data di pubblicazione 08/02/2020, <https://insideevs.it/features/397440/quanto-costa-rifornimento-auto-idrogeno/>

- Gentili A., Legambiente, “L’anniversario del disastro della centrale nucleare di Chernobyl”, data di pubblicazione 26/04/2023, <https://www.legambiente.it/news-storie/inquinamento/lanniversario-del-disastro-della-centrale-nucleare-di-chernobyl/>
- Giavarini C., Rassegna del bitume 101/22, “Vettori energetici per il futuro: idrogeno o ammoniaca?”, data di pubblicazione 2022. https://www.siteb.it/wp-content/uploads/rassegna_del_bitume/rivista_rassegna_del_bitume/riviste/Rassegna_101_22.pdf
- Giordano V., Paternò G.C., “Convegno nazionale valutazione e gestione del rischio negli insediamenti civili ed industriali stoccaggio dell’idrogeno”, data di pubblicazione 2006, <https://conference.ing.unipi.it/vgr2006/archivio/Articoli/265.pdf>
- Godi G., Geopop.it, “Colonnine di ricarica pubblica per auto elettriche, quante ce ne sono e quali sono le tipologie”, data di pubblicazione 8/11/2023, <https://www.geopop.it/colonnine-di-ricarica-pubblica-per-auto-elettriche-quante-ce-ne-sono-e-quali-sono-le-tipologie/#:~:text=Quante%20colonnine%20ci%20sono%20in,contro%20i%20330.000%20del%202021>
- Gori G., Insideevs, “Ora ci sono 1.000 stazioni di rifornimento di idrogeno nel mondo”, data di pubblicazione 16/01/2023, <https://insideevs.it/news/631325/idrogeno-mondo-stazioni-di-rifornimento/>
- Greenreport.it, “Entro il 2035 gli aerei a idrogeno potrebbero essere più economici di quelli tradizionali”, data di pubblicazione 24/05/2023, <https://greenreport.it/news/energia/entro-il-2035-gli-aerei-a-idrogeno-potrebbero-essere-piu-economici-di-quelli-tradizionali/>
- Grittani M., Rinnovabili.it, “Idrogeno, ecco le applicazioni in cui davvero servirà”, data di pubblicazione 04/03/2021, <https://www.rinnovabili.it/energia/idrogeno/idrogeno-ecco-le-applicazioni/>
- HESC, “The world-first Hydrogen Energy Supply Chain (HESC) Project”, <https://www.hydrogenenergysupplychain.com/>
- HESC, “Dawn of Australia’s Hydrogen Industry”, data di pubblicazione 21/01/2022, <https://www.hydrogenenergysupplychain.com/dawn-of-australias-hydrogen-industry/>
- Hydrogen Europe, “Hydrogen europe – tech [overview]” https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2021/11/Tech-Overview_Hydrogen-Storage.pdf
- Hyundai.com, “Hyundai Nexo”, <https://www.hyundai.com/it/it/models/nexo.html>
- Hy Responder, “European Train the Trainer Programme for Responders”, data di pubblicazione 06/2021, https://hyresponder.eu/wp-content/uploads/2023/03/L3_HyResponder_Livello3_ITA.pdf
- IBT Group, “I vettori energetici: cosa sono e perché sono il futuro”, data di pubblicazione 15/02/2022, <https://www.ibtgroup.at/vettore-energetico/>

- IEA, “The Future of Hydrogen”, data di pubblicazione 06/2019, <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- IEA, “Energy Technology Perspectives 2023”, data di pubblicazione 01/2023, <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023>
- IEA, “Change in CO2 emissions by sector, 2021-2022”, data di pubblicazione 03/2023, <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>
- Informazioni marittime, “Nave giapponese in Australia per la prima spedizione di idrogeno al mondo”, data di pubblicazione 25/01/2022, <https://www.informazionimarittime.com/post/nave-giapponese-in-australia-per-la-prima-spedizione-di-idrogeno-al-mondo>
- Investing.com, <https://it.investing.com/commodities/natural-gas>
- InvestVictori, “Hydrogen energy supply chain will put Victoria and Japan at the forefront of hydrogen technologies” <https://www.invest.vic.gov.au/investor-community/investor-success-stories/case-studies-search/case-studies/hesc-case-study>
- IRENA, “Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal”, data di pubblicazione 2022, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Apr/IRENA_Global_Trade_Hydrogen_2022.pdf?rev=3d707c37462842ac89246f48add670ba
- Jafari Raad S. M., Leonenko Y., Hassanzadeh H., ScienceDirect, “Hydrogen storage in saline aquifers: Opportunities and challenges”, data di pubblicazione 18/08/2022, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032122007286>
- Leaseplan, <https://www.leaseplan.com/it-it/mobilita-elettrica/ricarica-auto-elettriche/#:~:text=Quanto%20costa%20un%20pieno%20elettrico,auto%20elettrica%20di%20medie%20dimensioni>
- La Franca G., RCI news, “La miscela metano/idrogeno per le caldaie del futuro”, data di pubblicazione 21/11/2022, <https://www.rcinews.it/2022/11/21/la-miscela-metano-idrogeno-per-le-caldaie-del-futuro/>
- La Repubblica, “Svolta idrogeno: in Italia approvate 36 nuove stazioni di rifornimento”, data di pubblicazione 18/03/2023, https://www.repubblica.it/motori/sezioni/attualita/2023/03/18/news/idrogeno_il_mit_approva_36_progetti_per_le_nuove_stazioni_di_rifornimento-392566551/
- Lu M., Visual Capitalist, “Visualizing All the World’s Carbon Emissions by Country”, data di pubblicazione 8/11/2023, <https://www.visualcapitalist.com/carbon-emissions-by-country-2022/>
- Manietti E., IlPos.it, “Perché è così difficile far partire Artemis 1”, data di pubblicazione 7/09/2022, <https://www.ilpost.it/2022/09/07/artemis-1-rinvio-nasa-idrogeno/>
- Moccia A. Geopop, “Catturare la CO2 e stoccarla nel sottosuolo: quali sono le tecniche usate?”, data di pubblicazione 18/05/2023, <https://www.geopop.it/catturare-la-co2-e-stoccarla-nel-sottosuolo-quali-sono-le-tecniche-usate/>

- Moccia A. Geopop, “Cattura e stoccaggio di CO2: cos’è, perché, pro e contro”, data di pubblicazione 13/10/2021, <https://www.geopop.it/cattura-e-stoccaggio-di-co2-cose-perche-pro-e-contro/>
- Martin R., Linkiesta, “Come risolvere l’enorme problema della Cina con il carbone”, data di pubblicazione 31/04/2015, <https://www.linkiesta.it/2015/08/come-risolvere-lenorme-problema-della-cina-con-il-carbone/>
- MHI group, “Mitsubishi Shipbuilding Concludes Technical Cooperation Agreement with Namura Shipbuilding on LPG powered Very Large LPG/Ammonia Carrier Construction”, data di pubblicazione 05/08/2021, <https://www.mhi.com/news/21080502.html>
- MHI group, “PHOENIX HARMONIA, A Very Large LPG/Ammonia Carrier Constructed by Namura Shipbuilding, Enters into Service “, data di pubblicazione 29/09/2023, <https://www.mhi.com/news/23092902.html>
- Ministero dell’Ambiente e della Sicurezza energetica, “La fissione nucleare”, <https://www.mase.gov.it/pagina/fissione-e-fusione-nucleare#:~:text=La%20fissione%20nucleare%20%C3%A8%20un,allontanandosi%20con%20elevata%20energia%20cinetica>
- Modofluido, “Immagazzinamento e stoccaggio dell’idrogeno: verso un pianeta green”, data di pubblicazione 05/09/2023, [https://modofluido.hydac.it/immagazzinamento-stoccaggio-idrogeno#:~:text=L'idrogeno%20pu%C3%B2%20essere%20conservato,\(stoccaggio%20di%20liquidi%20criogenici\)](https://modofluido.hydac.it/immagazzinamento-stoccaggio-idrogeno#:~:text=L'idrogeno%20pu%C3%B2%20essere%20conservato,(stoccaggio%20di%20liquidi%20criogenici))
- NewsAuto.it, “Mappa distributori idrogeno, 36 nuove stazioni, dove sono”, data di pubblicazione 17/03/2023, <https://www.newsauto.it/notizie/mappa-distributori-idrogeno-dove-sono-2023-414623/>
- Ritchie H., OurWorldInData.org, “Cars, planes, trains: where do CO2 emissions from transport come from?”, data di pubblicazione 06/10/2020, <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-transport#article-citation>
- Patel S., Power, “ACES Delta's Giant Utah Salt Cavern Hydrogen Storage Project Gets \$504M Conditional DOE Loan Guarantee”, data di pubblicazione: 28/04/2022, <https://www.powermag.com/aces-deltas-giant-utah-salt-cavern-hydrogen-storage-project-gets-504m-conditional-doe-loan-guarantee/>
- Pedrotti S., Fercam, “Colori dell’idrogeno: qual è la differenza?”, data di pubblicazione: 11/11/2022, [https://www.fercam.com/it-it/blog/colori-dellidrogeno-qual-e-la-differenza--2-2449.html#:~:text=Idrogeno%20Marrone%20\(o%20Nero\)%3A,all'interno%20della%20crosta%20terrestre](https://www.fercam.com/it-it/blog/colori-dellidrogeno-qual-e-la-differenza--2-2449.html#:~:text=Idrogeno%20Marrone%20(o%20Nero)%3A,all'interno%20della%20crosta%20terrestre)
- Pratt G., Crowcon, “Idrogeno blu - Una panoramica”, data di pubblicazione 21/02/2022, <https://www.crowcon.com/it/blog/blue-hydrogen-an-overview/>
- Putra W. E., LinkedIn, “Hydrogen Pipeline: An Insight of Historical Data and Potential Future Hydrogen Pipeline”, data di pubblicazione 15/12/2023,

<https://www.linkedin.com/pulse/hydrogen-pipeline-insight-historical-data-potential-future-eka-putra-fkbnc>

Rai News, “Three Mile Island. Quarant'anni fa il più grave incidente nucleare negli Stati Uniti”, data di pubblicazione 28/03/2019, <https://www.rainews.it/archivio-rainews/media/Three-Mile-Island-Quaranta-anni-fa-il-piu-grave-incidente-nucleare-negli-Stati-Uniti-72b0034b-5800-4192-b260-4c36e49379cc.html#foto-1>

Rodriguez R. L., Fundspeople, “Idrogeno verde: cos'è e perché si prospetta come un'opportunità di investimento?”, data di pubblicazione 2/10/2023, <https://fundspeople.com/it/glossario/idrogeno-verde-cose-e-perche-si-prospetta-come-unopportunita-di-investimento/#:~:text=L'idrogeno%20verde%20%C3%A8%20davvero,di%20infrastrutture%20entro%20il%202050>

Sabino R., UNIPD, “Analisi delle metodologie e delle problematiche connesse allo stoccaggio dell'idrogeno”, data di pubblicazione 17/11/2023, https://thesis.unipd.it/retrieve/2ce35758-ced4-4b83-8f16-501840f40097/Sabino_Riccardo.pdf

Save ENG, “Efficienza energetica per il settore hard to abate”, data di pubblicazione 23/10/2023, <https://www.savenrg.it/efficienza-energetica-per-il-settore-hard-to-abate/#:~:text=Definizione%20del%20settore%20Hard%20to%20Abate&text=Questi%20settori%20includono%20l'industria,trasporto%20marittimo%20e%20l'aviazione>

Sibilia T., LinkedIn, “Come funzionano i propellenti per i razzi: la scienza dietro la potenza”, data di pubblicazione 4/02/2023, <https://it.linkedin.com/pulse/come-funzionano-i-propellenti-per-razzi-la-scienza-dietro-sibilia>

Sicuro M., lasvolta.it, “Come funzionano i trasporti a idrogeno?”, data di pubblicazione 11/01/2023, <https://www.lasvolta.it/5401/come-funzionano-i-trasporti-a-idrogeno>

Sky TG24, “Il disastro nucleare di Chernobyl, cosa accadde la notte del 26 aprile 1986”, data di pubblicazione 26/04/2022, <https://tg24.sky.it/mondo/approfondimenti/chernobyl-disastro-storia>

Sorgenia 2023, “Idrogeno: che cos'è”, <https://www.sorgenia.it/guida-energia/idrogeno-che-cose>

Sorgenia 2023, “Tempi di ricarica auto elettriche”, <https://www.sorgenia.it/guida-energia/tempo-di-ricarica-auto-elettriche/#:~:text=Quelle%20a%20corrente%20alternata%20hanno,base%20alla%20capacit%C3%A0%20della%20batteria.>

Statista Research Department, Statista.com, “Number of hydrogen fueling stations for road vehicles worldwide as of 2022, by country”, data di pubblicazione 09/2022, <https://www.statista.com/statistics/1026719/number-of-hydrogen-fuel-stations-by-country/>

Takahashi K., Eolss.net, “Transportation of hydrogen by pipeline”, data di pubblicazione 01/08/13, <https://www.eolss.net/sample-chapters/c08/E3-13-08-01.pdf>

- Tamponi A., Mondo Internazionale, “Strategia energetica: La Cina e il settore dell’Idrogeno Verde”, data di pubblicazione 15/03/2023, <https://mondointernazionale.org/post/strategia-energetica-la-cina-e-il-settore-dellidrogeno-verde#:~:text=L'Idrogeno%20infatti%20rappresenta%20un,locali%20di%20citt%C3%A0%20e%20province.&text=Nel%202021%20la%20Cina%20ha,da%20fonti%20ad%20alta%20emissione>
- Thiyagarajan S. R., Emadi H., Hussain A., Patange P., Watson M., ScienceDirect, “A comprehensive review of the mechanisms and efficiency of underground hydrogen storage”, data di pubblicazione 29/03/2022, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X22005114>
- Todorović I. Balkan green energy news, “The construction of the first section of a 1,200-kilometer national hydrogen network began near Rotterdam. Officials said the Netherlands would be the first country in Europe with such infrastructure.”, data di pubblicazione 2/11/2023, <https://balkangreenenergynews.com/construction-of-europes-first-hydrogen-pipeline-system-underway-in-netherlands/>
- Torchiani G., EnergyUp.tech, “L’energia nucleare rappresenta la fonte probabilmente più discussa, dal momento che presenta sia punti di forza che svantaggi”, data di pubblicazione 29/08/2023, <https://www.energyup.tech/utility/energia-nucleare-vantaggi-criticita-e-prospettive-per-il-futuro/>
- Toyota.it, “Toyota Mirai”, <https://www.toyota.it/gamma/nuova-mirai>
- Treccani, “Celle a Combustibile”, https://www.treccani.it/enciclopedia/celle-a-combustibile_%28Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica%29/
- TÜV ITALIA, “Stoccaggio e distribuzione dell'idrogeno” <https://www.tuvsud.com/it-it/temi/idrogeno/catena-del-valore-dell-idrogeno/stoccaggio-e-distribuzione-dell-idrogeno>
- Twi Global, “What is a hydrogen fuel cell and how does it work?” <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-a-hydrogen-fuel-cell>
- UNEPFI, “European Hydrogen Backbone”, data di pubblicazione 14/10/2020, https://www.unepfi.org/wordpress/wp-content/uploads/2021/02/06_EHB_presentation_Nordea.pdf
- UNRIC, “Che cosa sono i cambiamenti climatici?”, <https://unric.org/it/che-cosa-sono-i-cambiamenti-climatici/#:~:text=Per%20%E2%80%9Ccambiamenti%20climatici%E2%80%9D%20si%20intendono,tramite%20variazioni%20del%20ciclo%20solare.>
- Vaielettrico, “Trasporto dell’idrogeno: gassoso, liquido, in nanopugne o ... mascherato.”, data di pubblicazione 25/11/2020, <https://www.vaielettrico.it/trasporto-dellidrogeno-gassoso-liquido-in-nanospugne-o-mascherato/>
- VIVA energia, “Cos’è la transizione energetica?”, <https://www.viviennergia.it/casa/vivipedia/guida-energia/transizione-energetica>

- Whitty K.J., Energy.gov, “Challenges and Lessons Learned in Commercial Biomass Gasification and Co-Gasification of Waste”, data di pubblicazione 30/11/2022, <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-12/beto-06-gasification-wkshp-nov-2022-whitty.pdf>
- Willige A., Spectra, “4 ways of storing hydrogen from renewable energy”, data di pubblicazione 30/11/2022, <https://spectra.mhi.com/4-ways-of-storing-hydrogen-from-renewable-energy>
- Yihe X., Hydrogen insight, “China to build 6,000km hydrogen pipeline network to transport green H2 from renewables-rich regions”, data di pubblicazione 5/06/2023, <https://www.hydrogeninsight.com/policy/china-to-build-6-000km-hydrogen-pipeline-network-to-transport-green-h2-from-renewables-rich-regions/2-1-1461729>
- Zagni G., Ilpost, “L’incidente di Three Mile Island”, data di pubblicazione 29/03/2014, <https://www.ilpost.it/2014/03/29/three-mile-island-incidente-nucleare/>
- ZeroAvia, PR Newswire, “ZeroAvia Makes Aviation History, Flying World's Largest Aircraft Powered with a Hydrogen-Electric Engine”, data di pubblicazione 19/01/2023, <https://www.prnewswire.com/news-releases/zeroavia-makes-aviation-history-flying-worlds-largest-aircraft-powered-with-a-hydrogen-electric-engine-301726022.html>

Ringraziamenti

Volevo ringraziare, in primis, me stesso per aver concluso questi due anni di magistrale nonostante le numerose difficoltà che ho dovuto affrontare. Mi ringrazio per aver raggiunto i miei obiettivi e per essere stato tanto determinato quanto spensierato nel vivere questi anni.

Dopo la mia prima laurea, ho deciso di affrontare questo percorso magistrale della facoltà di economia, ma per farlo ho dovuto sostenere un test d'ingresso. Nonostante un primo fallimento dovuto al fatto che il test fosse una settimana dopo la mia prima discussione di laurea, sono riuscito a passare il secondo test a febbraio, perdendo integralmente il primo semestre.

Non contento, ho affiancato a questo percorso quello di IANUA e quello lavorativo. Il desiderio di arricchire il curriculum e quello di rendermi indipendente da “mamma” e “papà” erano alti e hanno richiesto maggior impegno.

Queste quattro sessioni sono state intense ed estenuanti tutte per motivi diversi, ma finalmente posso dire di avercela fatta, concludendo con gioia e per sempre l'incubo delle sessioni universitarie.

Al di fuori della sfera universitaria, questo percorso ha avuto un ulteriore, bellissimo, ostacolo che si chiama Chiara Capponi. La mia situazione non era delle migliori, come già accennato, e la sua presenza, estremamente disturbante, è stata un ulteriore elemento di difficoltà, ma soprattutto di piacere. Ci siamo incontrati a metà del primo anno e da lì abbiamo affrontato ogni sessione insieme, nel bene e nel male, passando tra isterie (sue) e mental breakdown (nostri) nelle dispendiose ore di studio insieme, ma anche tra avventure e chiacchiere dei nostri sogni e desideri, realizzati nei nostri numerosi viaggi. Per ora è stato un anno e mezzo indimenticabile, ho vissuto esperienze che non avrei mai pensato di vivere e le ho fatte con una persona che mi ha fatto innamorare perdutamente in così poco tempo.

Chi avrebbe immaginato che avrei incontrato l'amore tra le ansie delle sessioni universitarie...

In questi due anni la mia vita è cambiata molto. Volevo ringraziare la mia famiglia, la mia mamma “Supereroe” e mia sorella Ilaria che mi hanno ampiamente sopportato,

anche tra una frecciatina e l'altra, per tutto questo tempo nonostante la mia presenza a casa fosse ormai quasi assente. Il loro supporto è stato di fondamentale aiuto per alleggerire quei carichi che i vari percorsi che avevo iniziato mi stavano pesando sulle spalle. Ricordatevi che, nonostante tutto, siete e sarete le MIE DONNE per sempre. Ringrazio anche Perla, quante notti mi sono addormentato abbracciato a lei e quante mi ha svegliato alle 5 del mattino grattando la porta di quella santa di mia sorella.

Volevo ringraziare anche mio papà, sempre pronto a spronarmi per raggiungere obiettivi sfidanti e soprattutto utili per il mio futuro. Grazie anche per il lavoro da Mister al mercoledì sera e della pazienza che mostri verso il tuo polemico giocatore-figlio. Vogliamo vincere il campionato e daremo tutto per farlo!

Infine, volevo ringraziare tutte quelle persone che mi sono state vicino in questi anni, delle chiacchiere e del tempo speso insieme a dire belinate. Le notti a far festa e ai sorrisi che hanno colorato quelle giornate grigie di sessione. Non serve fare nomi in particolare, chi c'è stato lo sa.

Ringrazio gli anni da universitario, il periodo più bello della mia vita finora. Tante ore da dedicare al divertimento, spensieratezza e libertà. Ho conosciuto centinaia di persone, ho viaggiato in lungo ed in largo, ho scoperto nuove cose e sono cresciuto, una vita che di limiti ne aveva pochi, "sei uno studente".

Chiudo finalmente questo percorso che da una parte mi ha fatto patire quei mesi di sessione ma che dall'altra, il resto del tempo, era solo da spendere per crescere e divertirmi.

Ora entro nel mondo del lavoro e non so cosa mi aspetta. Io vivrò la mia vita come fatto fino ad ora, curioso ed intraprendente accompagnando ogni evento, positivo o negativo, con un sorriso. Ma sempre con un unico obiettivo, arrivare in "C.I.M.A".

"Non so cosa mi aspetta" ma aspettami, che sto arrivando.