

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

Relazione per la prova finale

L' idrogeno: il combustibile del futuro

Tutor universitario: Prof.ssa Roberta Bertani

Laureando: *Matteo Finardi 1187680*

Padova, 29/09/2023

- Nel 1500 circa Theophrastus Von Hohenheim descrisse formalmente l'idrogeno ottenuto dalla miscelazione di metalli con acidi forti.
- Nel 1766 Henry Cavendish fu il primo a riconoscere l'idrogeno molecolare come una sostanza discreta e la descrisse come aria infiammabile.
- Nel 1783 Antoine Lavoisier assegnò all'elemento il nome idrogeno

Property	Hydrogen	Comparison
Density (gaseous)	0.089 kg/m ³ (0°C, 1 bar)	1/10 of natural gas
Density (liquid)	70.79 kg/m ³ (-253°C, 1 bar)	1/6 of natural gas
Boiling point	-252.76°C (1 bar)	90°C below LNG
Energy per unit of mass (LHV)	120.1 MJ/kg	3x that of gasoline
Energy density (ambient cond., LHV)	0.01 MJ/L	1/3 of natural gas
Specific energy (liquefied, LHV)	8.5 MJ/L	1/3 of LNG
Flame velocity	346 cm/s	8x methane
Ignition range	4–77% in air by volume	6x wider than methane
Autoignition temperature	585°C	220°C for gasoline
Ignition energy	0.02 MJ	1/10 of methane

Notes: cm/s = centimetre per second; kg/m³ = kilograms per cubic metre; LHV = lower heating value; MJ = megajoule; MJ/kg = megajoules per kilogram; MJ/L = megajoules per litre.

L'idrogeno può essere estratto dal metano o altri idrocarburi tramite un processo di combustione oppure tramite il processo di elettrolisi dell'acqua o di una soluzione salina.

In base al metodo di produzione l'idrogeno viene classificato in base a dei colori.

Per quanto riguarda l'elettrolisi il colore corrisponde a come viene prodotta la corrente elettrica necessaria al processo:

- **Nero:** energia derivante dai combustibili fossili
- **Viola:** energia derivante da fonti nucleari
- **Verde:** energia derivante da fonti rinnovabili

La cella elettrolitica è in genere composta da due elettrodi di un metallo inerte immersi in una soluzione elettrolitica e connessi ad una sorgente di corrente.

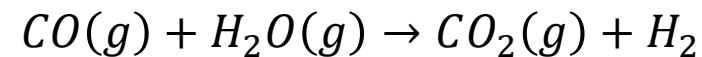
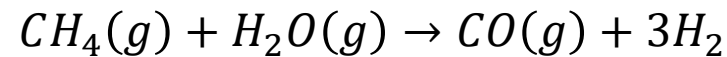
Al catodo gli ioni idrogeno acquistano elettroni in una reazione di riduzione che porta alla formazione di idrogeno gassoso: $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$

All'anodo, gli ioni idrossido subiscono ossidazione, cedendo elettroni: $4OH^- - 4e^- \rightarrow 4OH \rightarrow 2H_2O + O_2$

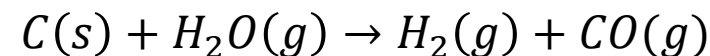
Per quanto riguarda l'idrogeno proveniente da processi di combustione è classificato come:

- **Grigio:** rappresenta più del 90% dell'idrogeno oggi prodotto, l'anidride carbonica è rilasciata in atmosfera
- **Blu:** si attuano meccanismi di cattura del diossido di carbonio prodotto prevenendone il rilascio in atmosfera.

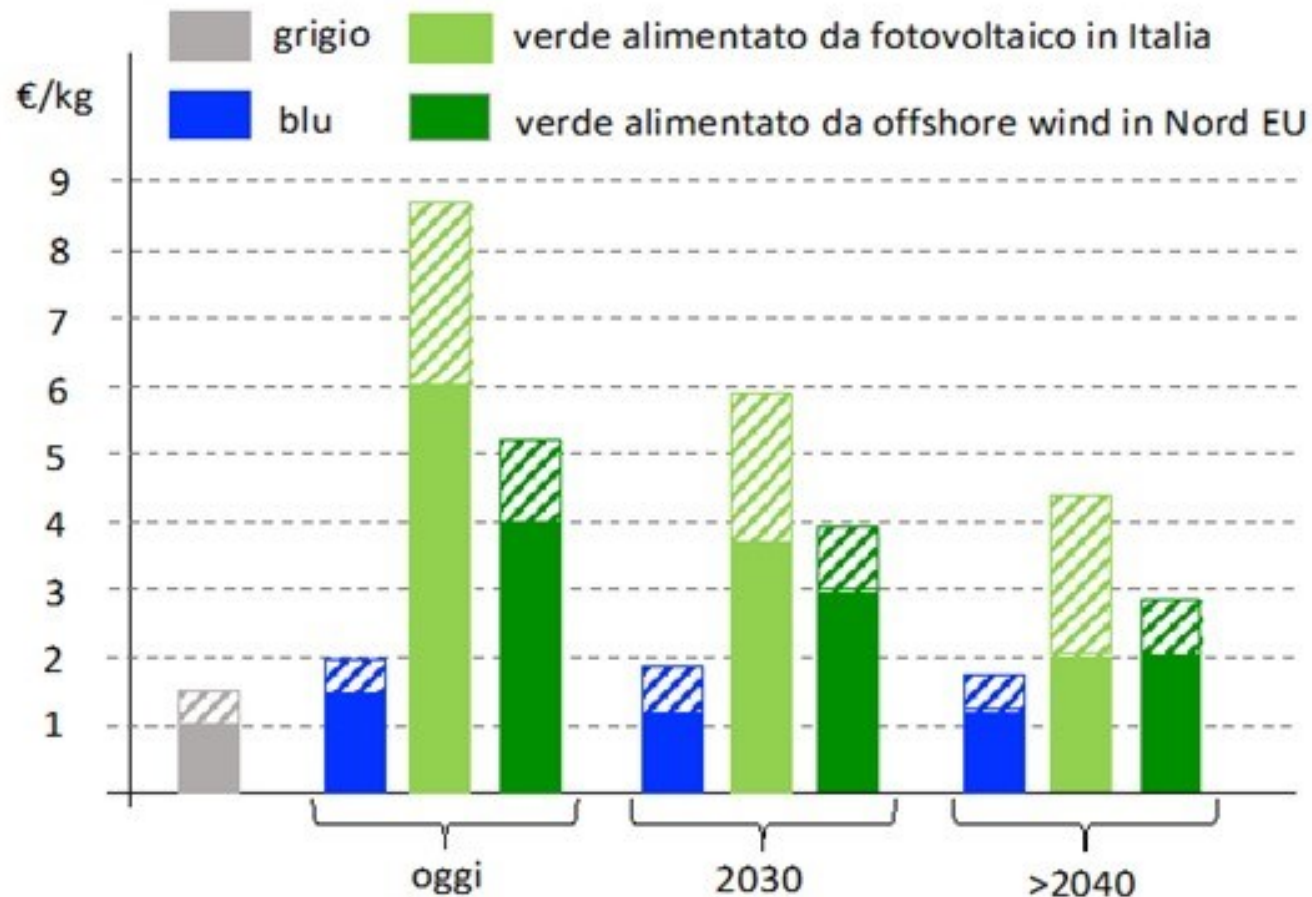
- Vapore a 1100 °C:



- Riscaldando a 1000 °C il carbonio reagisce con il vapore:

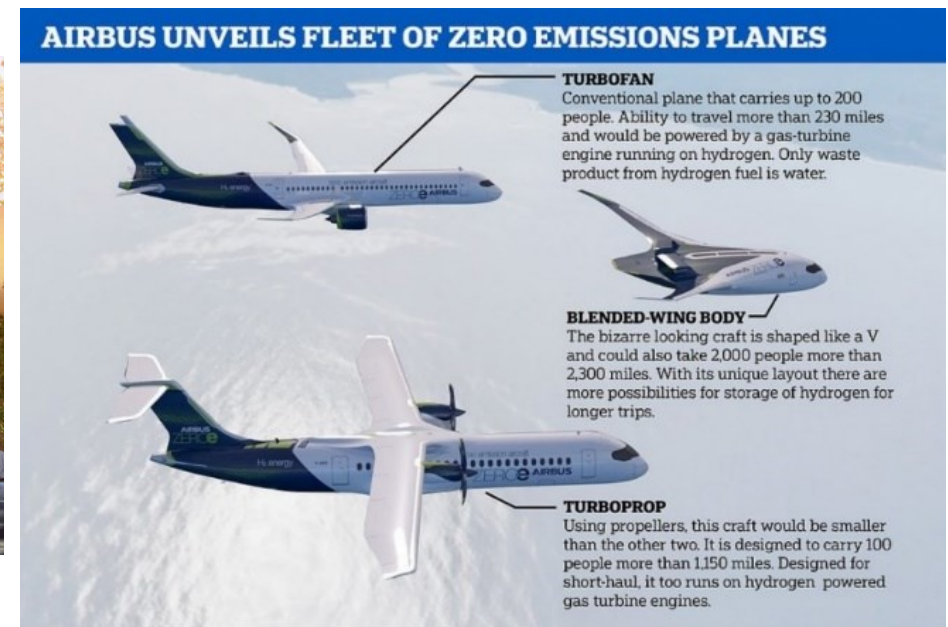
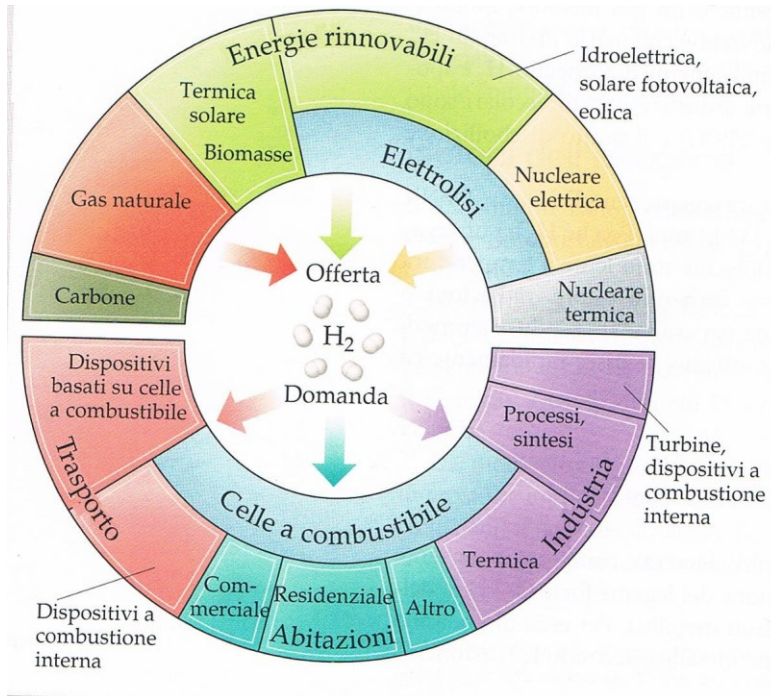


Costo di produzione dell'idrogeno
secondo le stime della Commissione Europea (colore pieno) e della IEA (a strisce)



Utilizzando l'energia proveniente dalla rete elettrica si arriverebbe a un costo di 4 €/kg ipotizzando un costo dell'energia di 100 €/MWh e un consumo di 37 KWh per ogni kilogrammo d'idrogeno prodotto.

In uno scenario a lungo periodo, totalmente rinnovabile con eccessi di generazione d'energia, si potrebbe produrre l'idrogeno con questa energia venduta ai soli oneri di trasmissione cioè a 50 €/MWh arrivando a un costo di circa 2,6 €/kg.



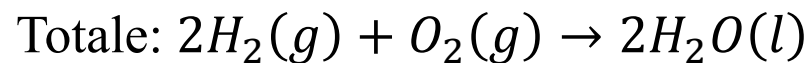
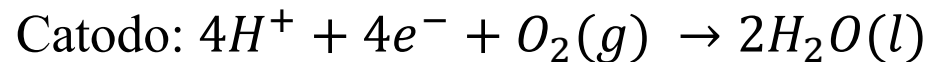
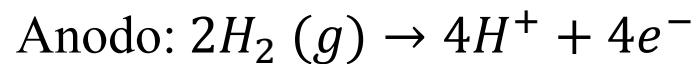
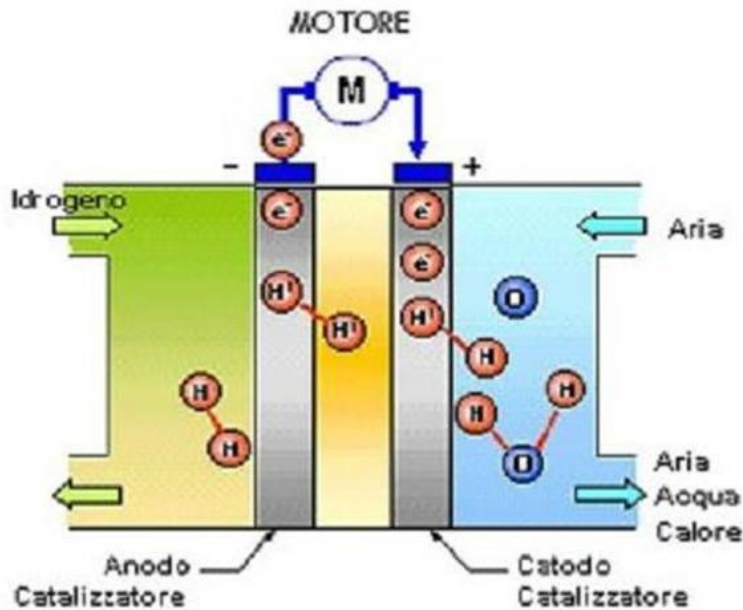
www.dii.unipd.it



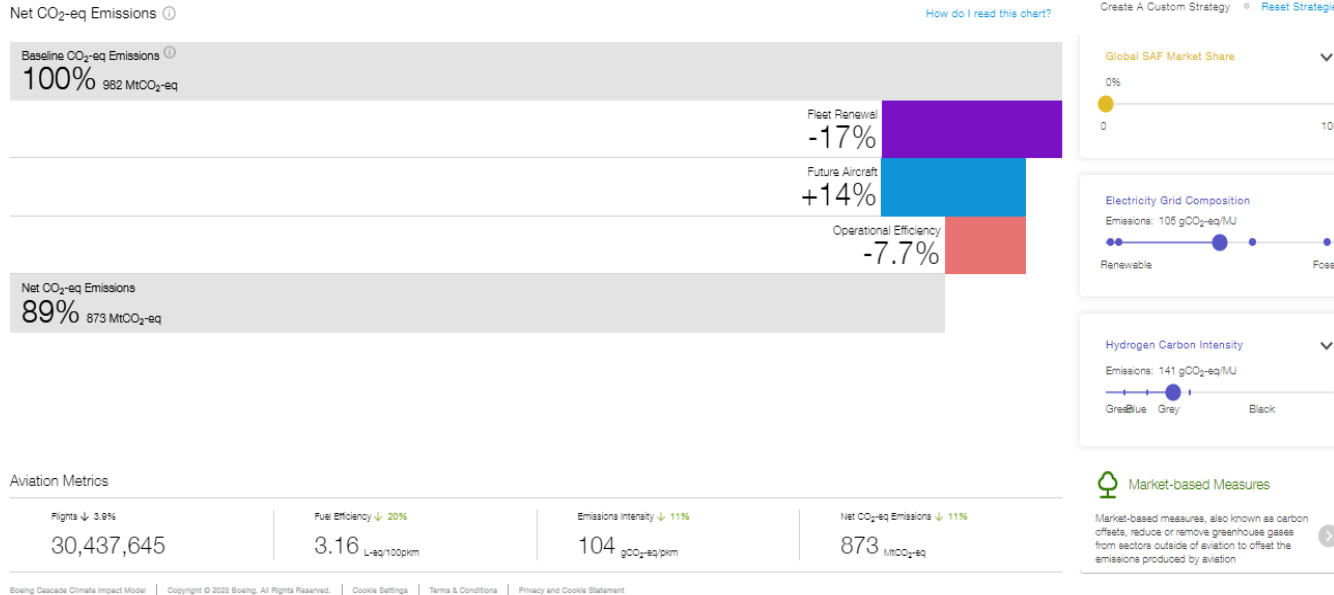
Tramite le celle a combustibile a idrogeno è possibile alimentare abitazioni, edifici commerciali o intere città. Ma è anche possibile alimentare i mezzi di trasporto quali automobili, bus treni e aerei.



mobilità a zero emissioni.

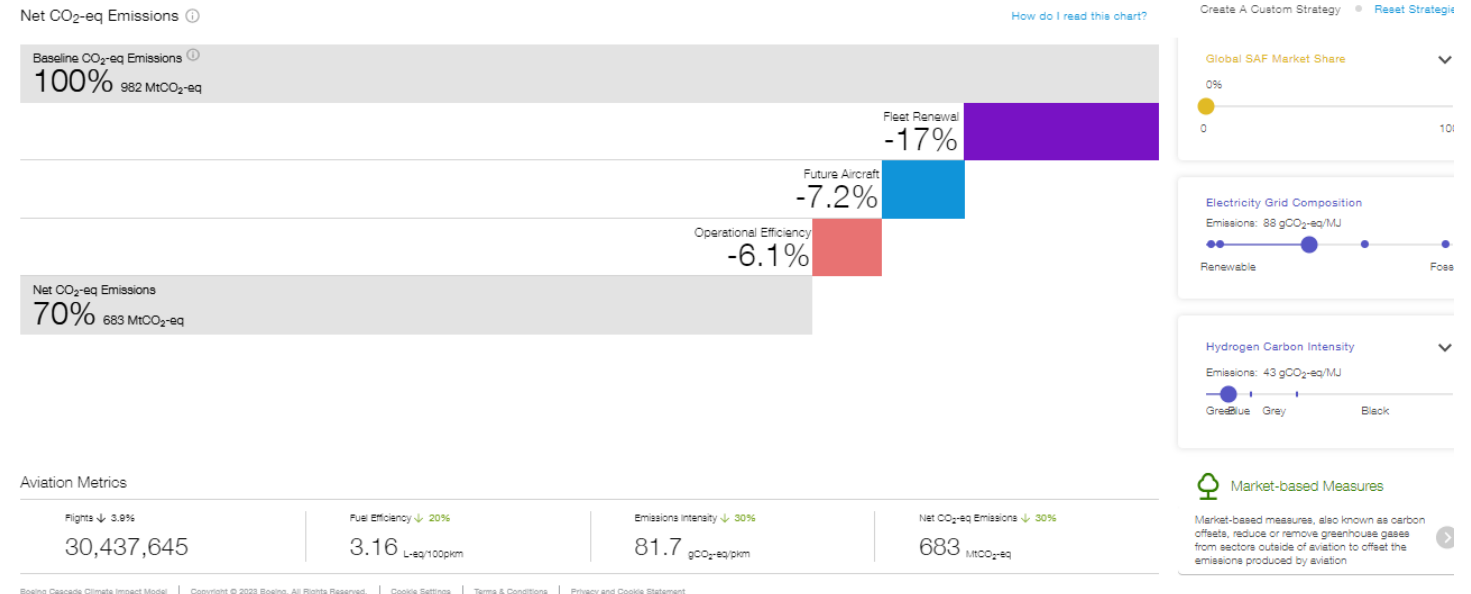


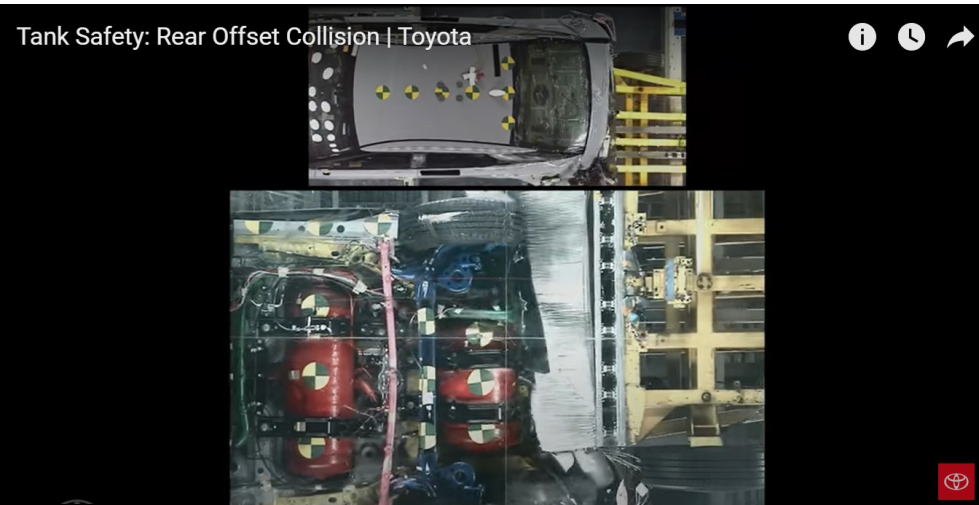
- l'utilizzo di una membrana porosa (PEM) che separi il catodo dall'anodo, permettendo il passaggio dei protoni ma non degli elettroni. Questa membrana funge anche da ponte salino.
- Temperatura nominale di 80°C
- Utilizzo di elementi catalizzatori: platino, rutenio e l'iridio
- L'università di Umeå, in Svezia, ha creato una struttura protettiva e inattiva, a base di un ossido misto di quaternario di stagno, antimonio, molibdeno e tungsteno. Questa struttura in combinazione con il feltro in fibra di titanio riduce la degradazione del catalizzatore e protegge anche gli altri componenti del sistema.



Andando ad introdurre 100% di aerei idrogeno a livello regionale cioè con range di 1000 NM e un 40% di aerei a corridoio singolo con range di 3500 NM si denota un aumento del 14% delle emissioni di diossido di carbonio.

Passando da grigio a un mix di idrogeno verde e blu e un cambiamento di come produciamo l'energia andando verso le fonti rinnovabili, si ha una riduzione del 7.2% delle emissioni.





Crash test dei serbatoi
per l'idrogeno della
Toyota

www.dii.unipd.it

Hydrogen Safety: DOE H2 vs gas car



Già negli anni Cinquanta l'esercito americano condusse degli esperimenti, denominati progetto Suntan con a capo Kelly Johnson, sulla sicurezza dell'idrogeno come combustibile aerospaziale.

Studi successivi della National Highway Transportation and Safety Administration emerse che l'idrogeno tende a bruciare con una fiamma verso l'alto allontanandosi dal veicolo molto rapidamente.

- Data la mancanza di un'infrastruttura adeguata al trasporto dell'idrogeno oggi è trasportato in forma liquida per mezzo di autoveicoli.



- Costruzione di infrastrutture  idrogenodotti

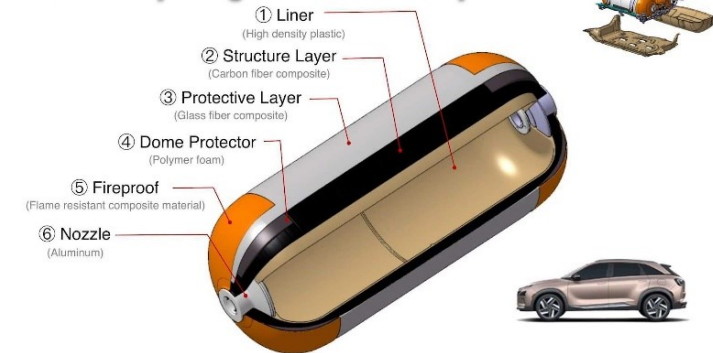
- Utilizzare le esistenti condutture per il trasporto del gas. Infatti, si può trasportare un mix di gas metano e idrogeno fino al 15% di quest'ultimo senza rivedere l'infrastruttura esistente.



- Oltre questa percentuale si avrebbero problemi di natura tecnica quali l'infragilimento da idrogeno e problemi di compressione nelle tubature. Una soluzione è quella di utilizzare tubature rivestite da un polimero rinforzato a fibre (FRP) e trattare le superfici con ferro silicati.

- **GAS COMPRESSO:** L'idrogeno può essere stoccato in forma gassosa in serbatoi ad alta pressione: 350-700 bar
- **IDROGENO LIQUIDO:** Per raggiungere la forma liquida è necessario portare e mantenere l'idrogeno a temperature di $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$. I serbatoi devono essere isolati sia a livello di conduzione, convezione e irraggiamento per impedirne l'evaporazione. In questa forma lo si utilizza prevalentemente nel campo dell'industria spaziale.
- **IDROGENO CRIOCOMPRESSO E COMBINATO A FREDDO:** I metodi di stoccaggio della compressione e della liquefazione illustrati in precedenza possono essere combinati. L'idrogeno viene raffreddato prima di essere compresso, ciò crea una densità di energia maggiore rispetto all'idrogeno compresso, ma il raffreddamento criogenico richiede un notevole consumo di energia.
- **STOCCAGGIO SOTTERRANEO:** Caverne di sale, giacimenti esauriti di petrolio e gas o falde acquifere possono tutti fornire luoghi per lo stoccaggio sotterraneo di idrogeno su scala industriale. Lo stoccaggio in caverna è l'opzione più costosa, ma anche la più adatta per lo stoccaggio dell'idrogeno.

NEXO Hydrogen Tank Safety



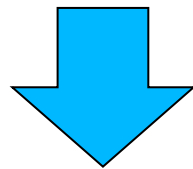
- **STOCCAGGIO NELLA RETE DEL GAS:** L'idrogeno in eccesso può essere immesso nella rete pubblica del gas naturale per creare gas naturale arricchito di idrogeno (HENG). Grandi quantità di idrogeno gassoso potrebbero essere immagazzinate in questo modo utilizzando gran parte delle reti di gas naturale esistenti nei paesi industrializzati e quindi riconvertite direttamente in elettricità tramite celle a combustibile a idrogeno.
- **STOCCAGGIO NEI MATERIALI:** Lo stoccaggio basato sui materiali può consentire densità di stoccaggio volumetrico superiori a quelle dell'idrogeno liquido. Esistono tre tipi di materiali per lo stoccaggio dell'idrogeno: l'adsorbimento per immagazzinare idrogeno sulla superficie del materiale, l'assorbimento per immagazzinare l'idrogeno all'interno del materiale; e lo stoccaggio di idruri, che utilizza una combinazione di materiali solidi e liquidi. L'idrogeno può anche essere legato chimicamente con un vettore di idrogeno organico liquido. Questi composti chimici hanno un'elevata capacità di assorbimento dell'idrogeno e includono il derivato del carbazolo N-etilcarbazolo e il toluene.

Lo stoccaggio basato sui materiali è ancora in fase di sviluppo poiché il costo di caricamento, scaricamento e trattamento dell'idrogeno è ancora ritenuto troppo elevato e dispendioso in termini di tempo.

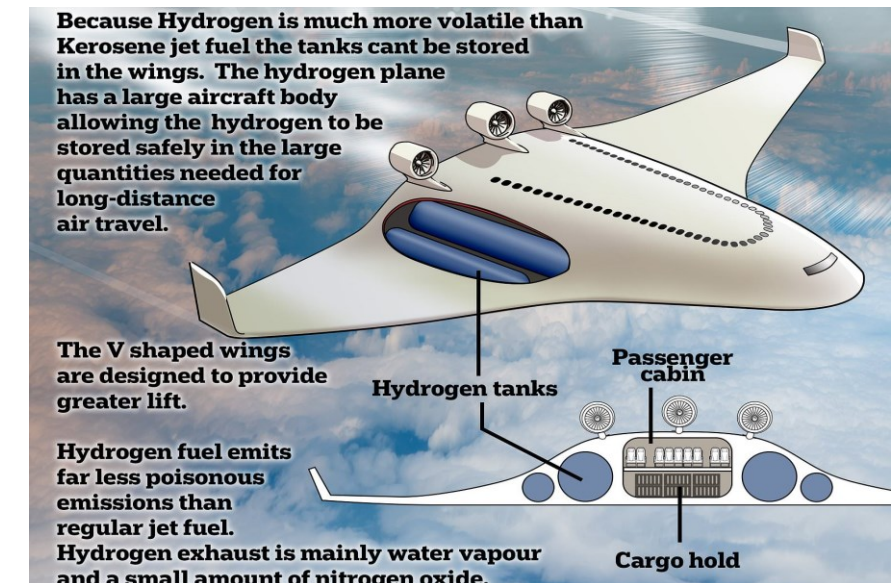
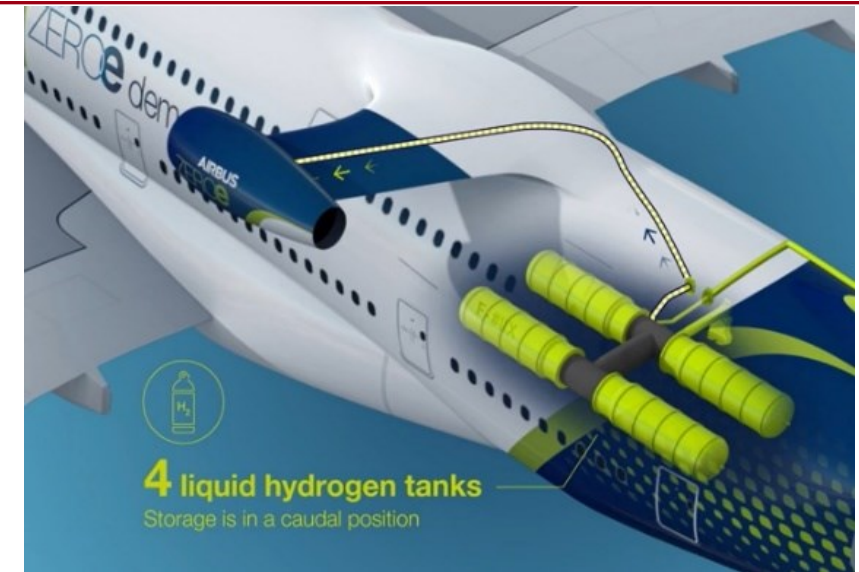
Negli aeromobili il metodo scelto per il trasporto dell'idrogeno è quello a gas compresso in serbatoi a 350-700 bar.

Ciò rende impossibile stoccare il carburante nelle ali, ma si rende necessario collocarli nella parte posteriore dell'aeromobile. Ciò crea diversi problemi:

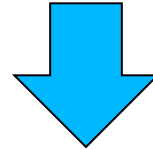
- Riduzione della capacità di carico
- Non si può usare il peso del carburante contenuto nelle ali per contrastare la forza di portanza e abbassare il centro di gravità



Possibilità di un design innovativo come un aereo V-shaped. Questo design è problematico sia per un'eventuale evacuazione dell'aeromobile sia per quanto riguarda il fattore psicologico di un aereo senza finestrini



Come evidenziato da numerosi esperimenti l'idrogeno non presenta rischi maggiori degli altri combustibili oggi utilizzati nel settore dei trasporti.



L'idrogeno tramite il suo utilizzo nelle celle a combustibile o tramite una sua combustione diretta si presta a diventare il carburante per una mobilità a zero emissioni a condizione che:

- Si passi dalla produzione di idrogeno grigio all' idrogeno blu e verde.
- Si crei un'infrastruttura per il suo trasporto o si utilizzi la rete esistente per il trasporto del gas con gli accorgimenti descritti in precedenza.

Per ottimizzare al meglio la capacità di carico con lo spazio necessario ad accomodare i serbatoi sugli aeromobili si utilizzino design innovativi come un aereo V-shaped o Blended-wing body

- Fondamenti di chimica Brown, Lemay, Bursten, Murphy; woodward, edito Edises
- Hydrogen storage materials: the characterisation of their storage properties, Darren p. Broom, edito da Springer
- Hydrogen fuel: prudocion, transport and storage, Ram B. Gupta
- Piano d'azione per l'idrogeno, settembre 2020, Confindustria
- <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-hydrogen-storage#HowDoesitWorkisitStored>
- <https://hydrogen.wsu.edu/2017/03/17/so-just-how-dangerous-is-hydrogen-fuel/>
- <https://www.fasi.biz/it/notizie/approfondimenti/22991-idrogeno-trasporti-treni.html>
- <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-hydrogen-storage>
- <https://www.rivistaenergia.it/2020/11/lirresistibile-leggerezza-dellidrogeno-2-costi-di-produzione-e-indicazioni-per-litalia/>
- <https://www.energy.gov/eere/office-energy-efficiency-renewable-energy>
- <https://cascade.boeing.com/>