

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria dell'Energia

***Relazione per la prova finale
«Analisi delle metodologie e delle
problematiche connesse allo stoccaggio
dell'idrogeno»***

Tutor universitario: Prof. Anna Stoppato

Laureando: *Riccardo Sabino*

Padova, 17/11/2023

L'energia è un requisito fondamentale per svolgere quasi tutte le attività umane, e ciò la rende parte integrante della vita quotidiana.

I combustibili fossili soddisfano **più dell'80% della domanda globale di energia** e la sicurezza energetica è oggi messa in discussione in quanto questi sono in via di esaurimento. Un'economia basata sull'idrogeno crea sicurezza energetica per quanto riguarda la disponibilità di energia, le infrastrutture, i prezzi, le questioni ambientali, gli effetti sulla società, l'efficienza e la governance. L'idrogeno **è il vettore energetico del futuro** per le sue eccellenti proprietà.



www.dii.unipd.it

L'idrogeno è flessibile in termini di produzione, stoccaggio ed applicazioni, perciò è il candidato ideale della transizione energetica.



Economia dell'idrogeno:

- Produzione;
- Stoccaggio;
- Sicurezza;
- Utilizzo finale;

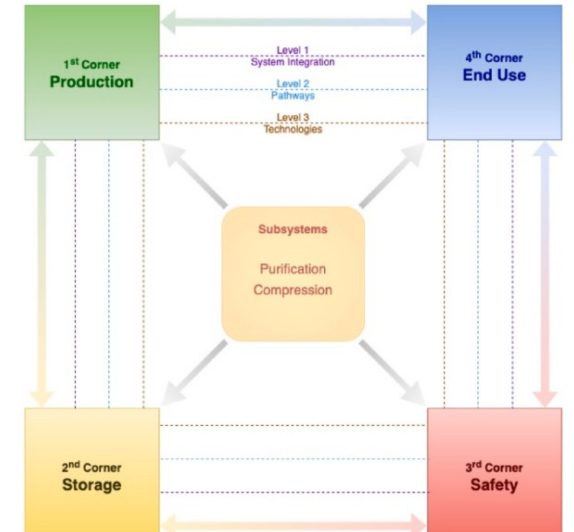
Il 96% dell'idrogeno prodotto oggi proviene da fonti fossili e quindi inquinanti. L'idrogeno grigio ha un costo di circa 1.41/2.35 €/GJ, l'idrogeno verde circa **2.35/6,58 €/GJ**, IRENA prevede che si attesterà sui **1.88 €/GJ** entro il 2030 e a **0.94 €/GJ al 2050**



Nel 2019 il valore di CO₂ registrato è stato di **33GTep**



25% dai Trasporti
17% dall' Industria chimica
6% dall'industria siderurgica
7% dall'industria del ferro



La situazione in Italia mostra un paese ancora fortemente legato all'importazione di energia estera, al 2021 circa il 73% (gas 41% e petrolio 32%). Il processo di decarbonizzazione è necessario al fine di evitare ulteriori shock energetici (vedi conflitto Ucraina) e dipendenza energetica. Nel 2020 la quota rinnovabili ha raggiunto il 20.4% (17%) e la produzione di e.e. italiana è stata del 38% del fabbisogno nazionale.

Piano Nazionale
di Ripresa e Resilienza

#NEXTGENERATIONITALIA



Aumento dei prezzi delle fonti energetiche non rinnovabili+fondi del REPowerEU+Recovery Plan+Conflitto Ucraino hanno creato le condizioni per lo sviluppo e la costruzione di impianti per la produzione di energia da FER, tra le quali deve esserci anche l'idrogeno.

L'obiettivo della neutralità in termini di emissioni di anidride carbonica (CO₂) entro il 2050 è in linea con gli sforzi volti a limitare l'aumento della temperatura media globale a 1,5 °C nel lungo periodo. ma non vi è sufficiente consapevolezza dei cambiamenti da introdurre da parte degli stati aderenti



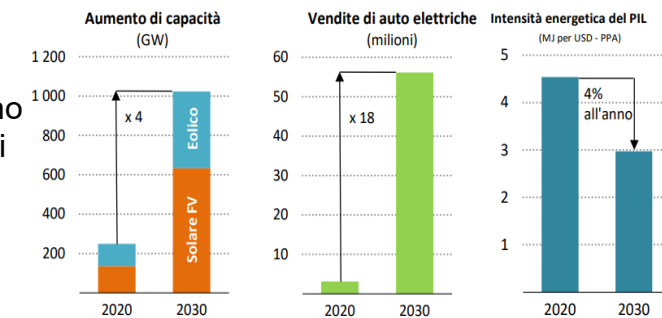
Gli impegni presi ad oggi **NON** sono sicuramente adeguati agli obiettivi. Nell'ultimo anno il numero di Paesi impegnati a raggiungere la neutralità carbonica è cresciuto rapidamente: insieme coprono circa il 70% delle emissioni globali di CO₂



Anche se fossero rispettati gli impegni assunti fino ad oggi, non sarebbe possibile eliminare i circa 22 miliardi di tonnellate di emissioni di CO₂ che peserebbero ancora sul nostro pianeta nel 2050. Nel 2020 le emissioni globali sono diminuite a causa della crisi COVID-19, ma con la ripresa economica stanno già aumentando notevolmente.

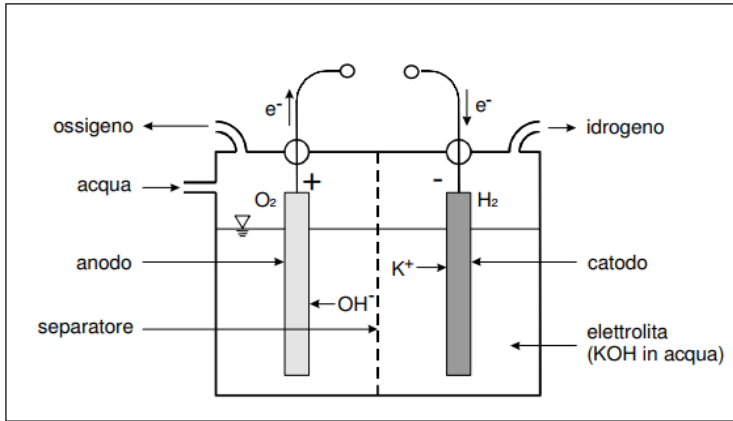
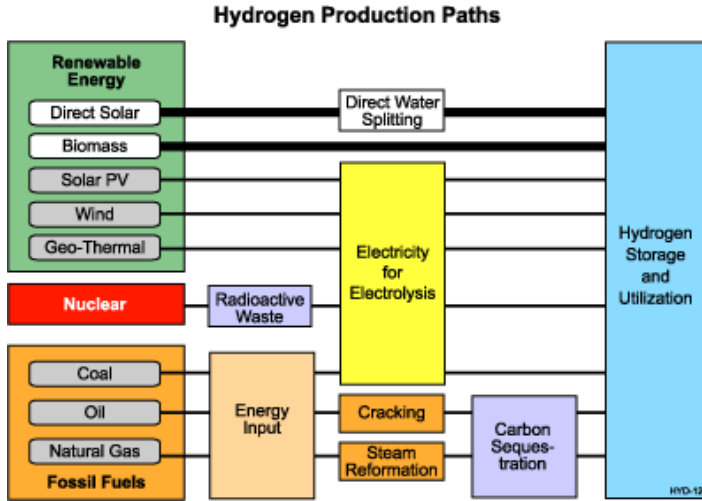
- Le **economie avanzate** devono azzerare le emissioni nette prima delle economie emergenti e dei Paesi in via di sviluppo e **devono aiutare** gli altri a ottenere tale risultato.
- **Le persone** in tutto il mondo prendano innumerevoli decisioni e che ognuno nel suo piccolo faccia la sua parte.
- Occorre **dispiegare rapidamente e su vasta scala tutte le tecnologie** energetiche pulite ed efficienti a disposizione oltre a quelle in fase di sviluppo.
- Nel 2050, il 50% delle riduzioni saranno opera di tecnologie attualmente allo stato di prototipo. La maggior parte delle quali nell'industria pesante e trasporti.
- Batterie, elettrolizzatori di Idrogeno, sistemi di cattura e stoccaggio del carbonio le principali opportunità
- Fornire elettricità a circa 785 milioni di persone che ne sono prive e fonti energetiche pulite per cucinare a 2,6 miliardi di persone che ne sono sprovvisti è parte integrante della strategia.

Principali progressi per le tecnologie pulite entro il 2030 secondo la strategia per la neutralità carbonica

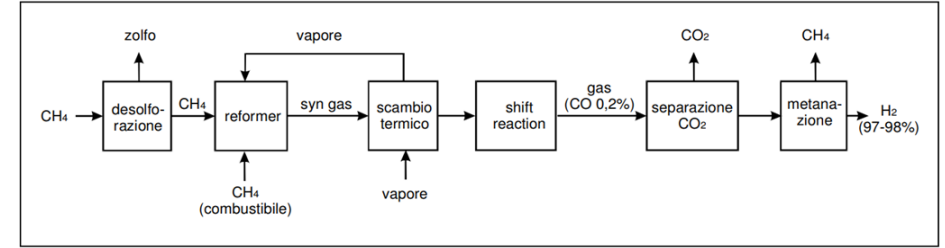


Nota: MJ = megajoule; PIL = prodotto interno lordo a parità di potere d'acquisto.

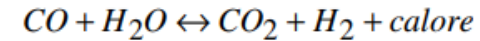
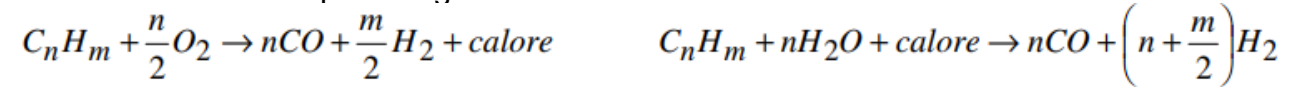
L'idrogeno NON è presente in natura in forma singola, ma solo composta (acqua, idrocarburi o composti organici). Per ottenere idrogeno allo stato puro occorre rompere le molecole di tali sostanze con processi che necessitano di energia.



Steam Reforming, circa il 48% dell'idrogeno totale. Efficienza di conversione fino all' 82% con un costo finale dell'idrogeno di circa **5,5÷7,5 \$/GJ con costo metano tra 2,85÷3,7 \$/GJ**



Parziale ossidazione che consiste nella trasformazione esotermica degli idrocarburi pesanti (oli residui della raffinazione del petrolio grezzo).



Elettrolisi dell'acqua che consiste nella scissione delle molecole dell'acqua in H₂ ed O mediante l'utilizzo di e.e.. **L'uso di energia elettrica generata da combustibili fossili per la produzione di idrogeno porta ad un costo da tre a cinque volte maggiore** rispetto all'idrogeno prodotto direttamente dai combustibili fossili, oltre che produrre emissioni inquinanti.

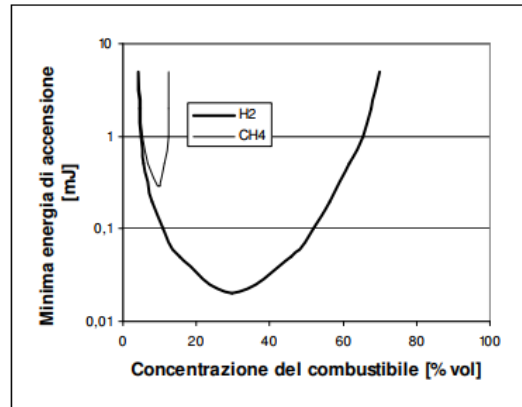
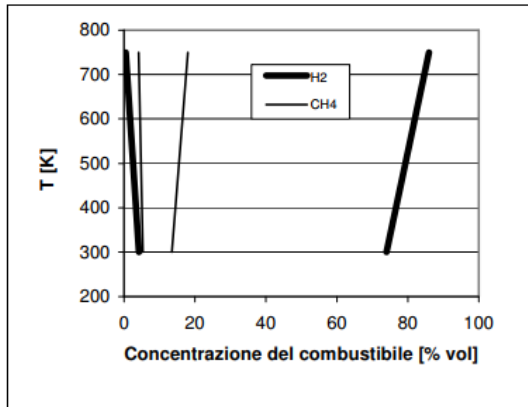
A seconda della fonte utilizzata, il costo dell'energia elettrica varia e quindi anche quello dell'idrogeno prodotto per elettrolisi:

- Idrogeno da idroelettrico il costo di produzione dell'idrogeno varia tra i 10 e i 30 \$/GJ.
- Eolico tra i 100 kW e 1MW circa 22÷50 \$/GJ.
- Eolico 100 MW circa 11÷20 \$/GJ.
- Da fotovoltaico il costo dell'idrogeno è superiore ai 40 \$/GJ riducibile a 25 \$/GJ.

L'idrogeno prodotto per elettrolisi con e.e. acquistata dalla rete NON è economicamente competitivo

Produzione: Gas naturale 240Mld Nm³/anno - Petrolio 150Mld Nm³/anno - Carbone 90Mld Nm³/anno - Elettrolisi 20Mld Nm³/anno

L'idrogeno è un combustibile potenzialmente pericoloso ed altamente esplosivo.



Una piccola scarica elettrostatica di un essere umano raggiunge ~10mJ maggiore di quella necessaria per accendere una qualsiasi miscela (gas, idrogeno, benzina) .
Al limite inferiore di infiammabilità l'energia di minima accensione di H2 è confrontabile con quella del gas metano. **Nel caso di collisione tra due veicoli il rischio esiste a prescindere dal combustibile utilizzato**



Le caratteristiche principali

- PM: 2.016
- Punto di ebollizione: -252,88 °C
- P critica: 12,92 bar
- Densità del liquido: 0,0708 g/cm³
- Densità del vapore: 0,00134 g/cm³
- PCI a 25°C: 120000 kJ/kg
- Limite di infiammabilità: 4,0÷75 vol%
- Energia di minima accensione: 0,02 mJ
- Diffusività in aria: 0,63 cm²/s



L'idrogeno può formare una miscela infiammabile più rapidamente del metano e della benzina, ma **può anche disperdersi più rapidamente**. l'elevata velocità di diffusione permette all'idrogeno di diminuire la sua concentrazione al di sotto del limite inferiore di infiammabilità più velocemente del metano.

L'accumulo sotto forma di gas compresso è il metodo più diretto per immagazzinare l'idrogeno. I vantaggi sono costituiti dalla semplicità del sistema e dalla sua economicità. Il maggiore svantaggio è legato alla bassa densità di energia per unità di volume.

Elevate pressioni richiedono maggior resistenza meccanica del serbatoio e quindi aumento del peso, i recipienti richiedono ingombro elevato e perdono il vantaggio che deriva dal peso ridotto dell'idrogeno, che viene annullato dal peso del serbatoio **che incide per il 90% e oltre del totale.**

Per l'accumulo stagionale su vasta scala, la soluzione più economica consiste nell'utilizzo di strutture di contenimento naturali come i siti sotterranei di rocce porose lasciati dai giacimenti esauriti di gas naturale o di petrolio, le falde acquifere e le caverne di sale o di roccia.



Tipi di recipienti

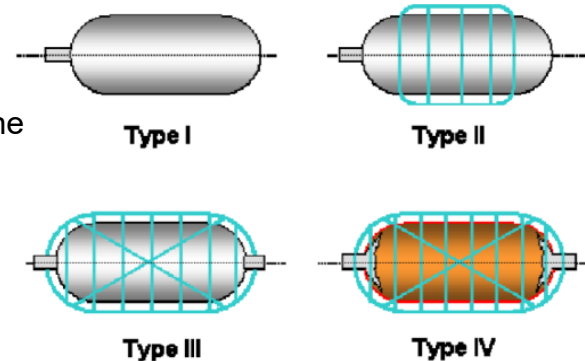
Tipo I: contenitori in acciaio o alluminio pressione max di 25MPa.

Tipo II: contenitori metallici con un rivestimento/rinforzo parziale in resine composite di costo competitivo e pressioni fino 45-80 MPa.

Tipo III: in alluminio con un rivestimento in resine composite per pressioni fino a 35 Mpa meno soggetti ai problemi di infragilimento.

Tipo IV: contenitori a base polimerica resistenti fino a 70 MPa, bassa permeabilità molto più costosi del tipo I e II.

Il tipo I e II non adatti all'utilizzo in ambito automotive a causa del loro peso



Rischi potenziali e sistemi di sicurezza dei serbatoi per l'idrogeno gassoso: rilascio accidentale, jet-fire ed esplosione.

1. resistenza all'azione esterna del fuoco (tipicamente per almeno 20 min);
2. resistenza alla sovrappressione interna (fino ad almeno 2.25 volte la pressione di lavoro);
3. resistenza alla fatica ciclica (resistenza per almeno 11250 cicli di riempimento pari a 15 anni di uso);
4. resistenza alla penetrazione meccanica di un proiettile/impattatore con un diametro di 7.6 mm;
5. rilascio controllato prima della rottura catastrofica (leak-before-break).



Caratteristiche principali

Pressione max di esercizio fino a 30MPa

- Metodologia molto energivora per comprimere il gas;
- Elevato stress dei materiali dei contenitori per i ripetuti cicli di carico e scarico;
- Infragilimento e permeabilità all'idrogeno dei materiali
- Peso e costi elevati di realizzazione.

La densità **minima pari a 0,5 kWh/kg** è raggiunta dai serbatoi in acciaio a 20 MPa, mentre la **massima, pari a 2,15 kWh/kg**, è raggiunta dai serbatoi in composito a 24,8 MPa.

Pressure relief device

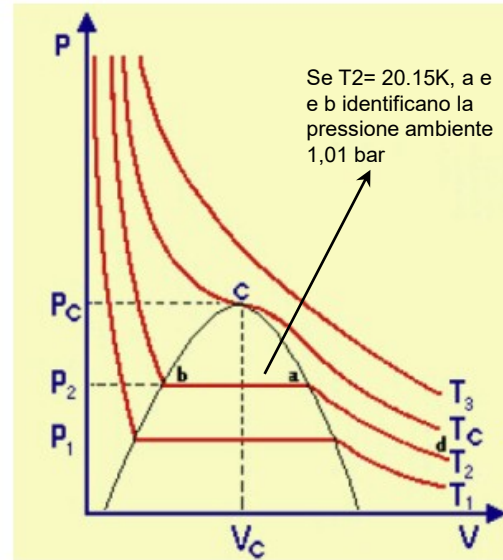
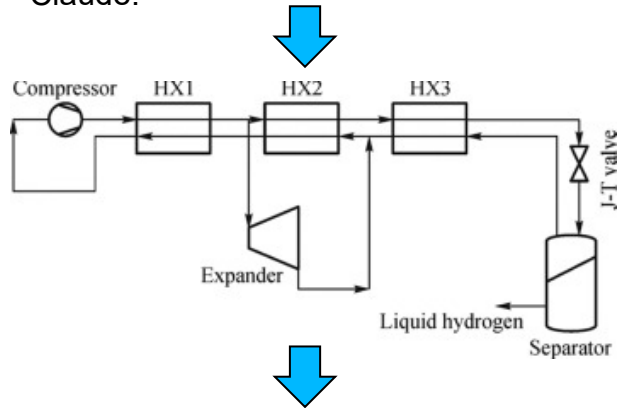


L'idrogeno ha una densità energetica riferita alla massa di 120MJ/Kg mentre la densità riferita all'unità di volume è ~8,5MJ/l, valore inferiore a quello degli altri combustibili.

La densità energetica dell'idrogeno liquido è più che doppia rispetto a quello compresso (0.0708kg/l contro 0.03kg/l)

Come liquefare l'idrogeno

Va esercitata una pressione e contemporaneamente un abbassamento della temperatura al di sotto di quella critica (per H2 è 33,25K). Nella pratica il sistema più utilizzato è il processo Claude.



Criticità legate alla sicurezza

1. perdita di idrogeno liquido dal contenitore
2. formazione di una miscela ricca in ossigeno
3. innesco del fenomeno di boil-off all'interno del contenitore
4. formazione di ghiaccio su alcuni componenti con possibile aumento dello stato di sollecitazione meccanica e perdita dell'integrità del contenitore;
5. in condizioni estreme, il rilascio di idrogeno liquido può determinare la formazione di un incendio da pozza (pool-fire).



La liquefazione necessita di una quota energia pari al 38% del vettore di partenza



Dal punto di vista economico è poco vantaggioso rispetto a quello gassoso

Criticità legate ai parametri termodinamici

A queste condizioni, l'idrogeno liquido si trova molto vicino alla sua temperatura di ebollizione, perciò eventuali assorbimenti di calore porterebbero alla sua evaporazione, quindi espansione di gas e aumento di volume con effetti catastrofici (1:800). L'aumento di calore può essere causato da:

1. conversione da orto a para-idrogeno con rilascio di calore;
2. scambio termico con l'ambiente esterno attraverso le pareti del contenitore
3. fenomeni di sloshing: a seguito di fenomeni di accelerazione/decelerazione;
4. Fenomeni di flashing;



MAN Bus SL202
190L – 150Nm3 – 450kWh
Densità energetica Riferita alla massa 4,5kWh/kg ed al volume di 2,13kWh/l



Applicazioni stazionarie
Problema dell'evaporazione giornaliera ~0.4% fino a 2%. Nel caso di grossi serbatoi, la maggiore densità di idrogeno liq supera il beneficio per l'idrogeno gassoso derivante dal minor costo del serbatoio.

I meccanismi di immagazzinamento in forma solida sono molteplici: adsorbimento, assorbimento e reazioni chimiche

Idruri metallici che trattengono l'idrogeno grazie ad una reazione reversibile con il metallo.

Materiali adsorbenti a elevata area superficiale e porosità.

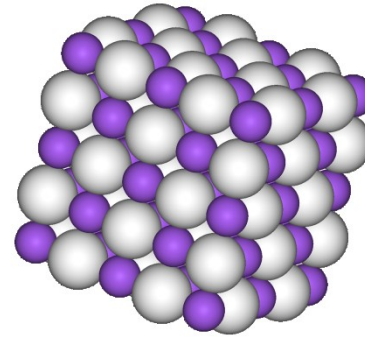
Materiali nanostrutturati, quali i fullereni, i nanomateriali ed i nanotubi al carbonio.



Negli idruri le molecole di H₂ si dissociano e si inseriscono negli spazi interatomici degli atomi del reticolo cristallino del metallo, a parità di volume si raggiungono densità di idrogeno superiori rispetto alla soluzione liquida.



I **vantaggi** sono una bassa pressione di caricamento 0,25÷10MPa ed elevata densità di energia in volume , 1,5kWh/l. Gli **svantaggi** sono l'elevato peso superiore a quello di un sistema a gas compresso.



Criticità legate allo stoccaggio solido

1. facilità di alcuni materiali di reagire spontaneamente con l'aria;
2. molti idruri si ossidano o reagiscono violentemente con l'acqua;
3. alcuni idruri metallici presentano un certo grado di tossicità per l'uomo;
4. alcuni materiali richiedono un adeguato raffreddamento in quanto subiscono un innalzamento di temperatura durante l'assorbimento dell'idrogeno;
5. per alcuni composti sussiste il rischio di formazione di nubi di polveri esplodibili.

Per immagazzinare l'idrogeno è possibile utilizzare un certo numero di vettori liquidi detti "liquidi intermedi".

Alcuni di questi vettori sono monouso (once-through) o vettori a ciclo aperto in quanto generano un prodotto finale che non è riciclabile

Ciclo Aperto

L'ammoniaca (NH₃) e il metanolo (CH₃OH) sono due vettori a ciclo aperto che possono essere immagazzinati come liquidi e utilizzati per la produzione di idrogeno alla necessità.

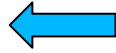


Svantaggi

Richiedono processi ad alta spesa energetica

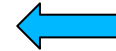
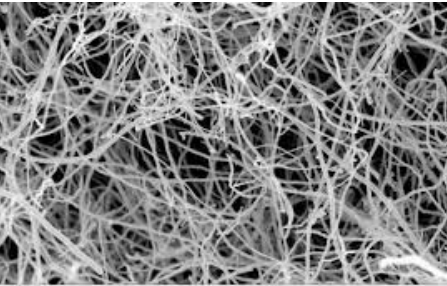
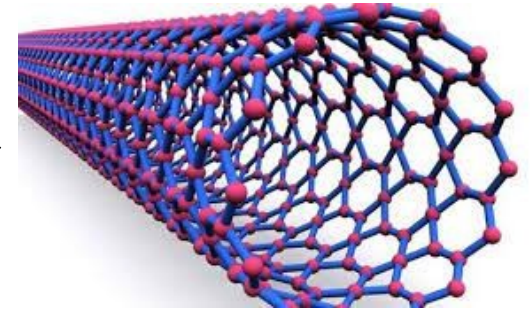
Ciclo Chiuso

Sono compatibili con un sistema energetico in cui l'idrogeno venga prodotto da fonti rinnovabili. Dopo la produzione l'idrogeno può venire immagazzinato in un liquido contenente idrogeno (idrogenazione) e quindi trasportato alle stazioni centrali dove il vettore liquido intermedio viene deidrogenato cioè spogliato dell'idrogeno.



L'incapsulamento è compiuto riscaldando un letto di microsfeere vuote in presenza di idrogeno. il gas diffonde nel piccolo nucleo attraversando il sottile guscio di vetro. Il letto viene quindi raffreddato e l'idrogeno esterno alle microsfeere rilasciato o recuperato. L'idrogeno dentro alle microsfeere è intrappolato perché la diffusività a temperatura ambiente si riduce drasticamente.

Gli atomi di carbonio si aggregano in diverse strutture molecolari tra cui le più note sono il diamante e la grafite, ma esistono anche le fibre di carbonio, i fullerene e i nanotubi di carbonio. E' stato verificato che i nanotubi di carbonio hanno la capacità di adsorbire grandi quantità di idrogeno: in pratica, a parità di volume occupato, la quantità di idrogeno adsorbita dai nanotubi è maggiore rispetto a quella che può essere introdotta per mezzo di una compressione



Piccole impilate una sull'altra in grande numero danno luogo ad una struttura a pila; placche allungate e affiancate formano una sorta di nastro a più strati; hanno la capacità di accumulare idrogeno fino ad un valore pari al 70% in peso che è pari a 10 volte il valore massimo del miglior mezzo di accumulo conosciuto. Le nanofibre possono costituire un mezzo di accumulo in grado di rovesciare gli attuali rapporti tra le autonomie di percorrenza dell'auto a idrogeno e di quelle a benzina o Diesel e difatti sono attualmente l'oggetto di grandi sforzi di ricerca da parte delle case automobilistiche.

QUANTO COSTA TRASPORTARE L'IDROGENO CON LE MODALITA' PIU' DIFFUSE OGGI?

Distanza [km]	16	160	320	800	1600
Costo di trasporto idrogeno gassoso [\$/GJ]	4,70	10,6	18,5	41,1	79,4
Costo di trasporto idrogeno liquido [\$/GJ]	0,24÷1,6	0,52÷1,8	1,0÷2,2	2,0÷3,1	3,9÷4,7

Metalli

I materiali metallici possono subire delle alterazioni sia fisiche che chimiche a contatto con l'idrogeno:

1. **corrosione a "secco"** (alta temperatura), **corrosione a "umido"** (la più comune) e corrosione causata da impurità nell'idrogeno;
2. **infragilimento** a basse temperature;
3. **infragilimento da idrogeno**;
4. **infragilimento per reazioni violente**.



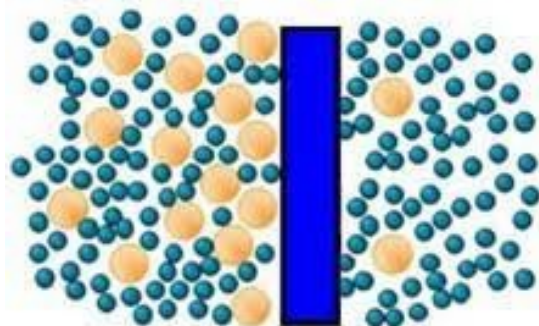
Fughe di Gas

Possono determinare il raggiungimento della miscela aria-idrogeno minima per avere ignizione. Le fughe di gas sono considerevoli in termini di portata (tubo di 30cm con pressione 2.5MPa ha un deflusso di 100kg/s).



Permeazione

Nei metalli avviene su base atomica, nei polimeri su base molecolare. Tale fenomeno aumenta all'aumentare della pressione del gas interno ed al diminuire dello spessore del recipiente.



Materiali polimerici

I materiali polimerici possono essere afflitti dai seguenti effetti:

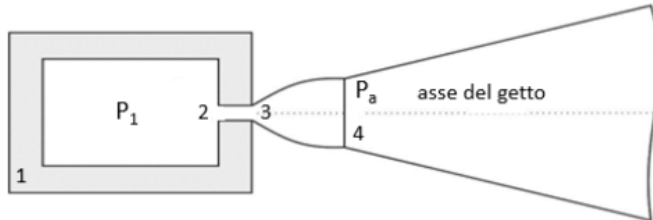
1. **Rigonfiamento** dei materiali polimerici;
2. **Blistering** simile a quello dell'acciaio;
3. **Deterioramento** delle proprietà meccaniche;
4. Rischio di **incendio**;
5. **Permeazione** del materiale;



L'alluminio e le sue leghe, l'ottone e le leghe di rame non sono soggetti alle criticità qui descritte.

Tipologie di deflusso

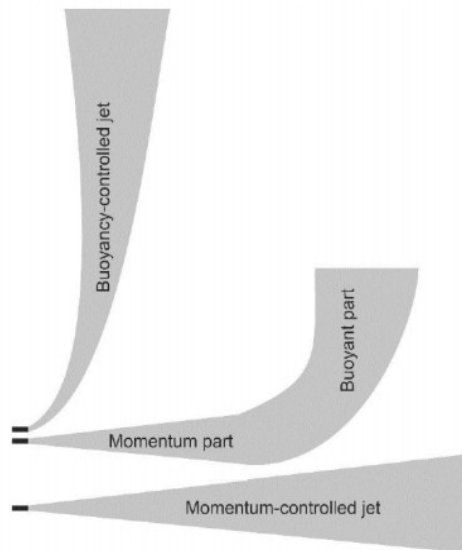
In prossimità del foro di uscita, l'idrogeno presenta pressioni molto maggiori della P_{atm} ($\times 7$). Localmente la velocità rimane sonica, seguito da una zona in cui il gas espande rapidamente raggiungendo elevati n. Mach ($\gg 1$) con contemporanea drastica diminuzione della pressione e densità.



Caratteristiche del deflusso

Importante sapere se il deflusso sarà controllato dalla quantità di moto o dalla spinta di galleggiamento, per questo avremo (vedi figura):

1. Getti controllati dal momento (momentum-controlled jet);
2. Getti controllati dalla spinta di galleggiamento (buoyancy-controlled jet);
3. Getti soggetti ad entrambi i fenomeni (transitional jet);



Sistemi di rilevazione

Riveste importanza fondamentale. Esistono sensori con diverse tecnologie e devono:

1. Lunga durata (10anni);
2. Sensibili alla contaminazione (es.idrocarburi);
3. Sensibili all'umidità (tra 10 e 98%);
4. Limitato tempo di risposta (<1sec);
5. No false risposte;
6. Agevole manutenzione;
7. Accuratezza;

Prevenzione

1. soluzioni ad elevato grado di prevenzione delle fughe;
2. attento impiego dei materiali;
3. limitare i quantitativi d'idrogeno da stoccare;
4. utilizzare componenti e sistemi testati e certificati;
5. periodiche misure di controllo e di ispezione sui dispositivi/impianti.

Mitigazione

1. impiego di riduttori di flusso;
2. isolare l'idrogeno dall'ossidante;
3. uso di allarmi e sistemi d'allerta (sensori di fuga);
4. misure di ventilazione degli;
5. posizionare in alto i sistemi operanti con idrogeno;
6. posizionare i sistemi che operano con idrogeno all'esterno
7. evitare la congestione di componenti/sistemi;
8. implementare la distanza di sicurezza;
9. prevedere specifiche misure per la gestione dell'emergenza.

La regione Sardegna, vista la potenzialità di produzione di e.e. da FER, l'istituzione del PNRR ed un fondo da 14M€, ha inserito nella sua transizione energetica la filiera dell'idrogeno per il progetto pilota.



Tratta	Consumo gasolio [kg]	Consumo H ₂ [kg]	Costo combustibile diesel [€]	Costo combustibile H ₂ [€]	kg di CO ₂ evitate
Cagliari - G. Aranci	417	83	650	413	1315
Chilivani - Sassari/Porto Torres	90	18	140	89	284
Decimo-Villamassargia/Iglesias	52	10	81	51	163
Villamassargia/Carbonia	30	6	47	30	95
Totale annua linea RFI	4.910.400	972.000	7.644.934	4.860.000	15.472.670

RETE RFI

Tratta	Consumo gasolio [kg]	Consumo H ₂ [kg]	Costo combustibile gasolio [€]	Costo combustibile H ₂ [€]	kg di CO ₂ evitate
Sassari - Alghero	36	8	57	48	115
Sassari - Nulvi	42	9	66	57	134
Sassari - Sorso	12	3	19	16	38
Macomer - Nuoro	70	16	109	94	220
Monsserrato - Isili	86	19	134	115	271
Totale annua linea ARST	1.479.537	329.940	2.303.470	1.979.640	4.662.020

RETE ARST

Analisi ambientale ed economica

1. il prezzo dell'idrogeno verde: 5,6 €/kg;
2. il prezzo del gasolio: 1,3 €/l;
3. il consumo di gasolio: 1,45 l/km;
4. il consumo di idrogeno: 0,27 kg/km;
5. le variabili legate alla percorrenza annua o alla lunghezza di una singola tratta dei treni ARST e RFI sono definite dalle rispettive compagnie;
6. emissioni di CO₂: 3.151 kgCO₂/ton gasolio.



Risultati dell'analisi

il revamping otterrebbe un risparmio di circa 3 milioni di € in termini economici e di circa 19.000 tonnellate equivalenti di CO₂.

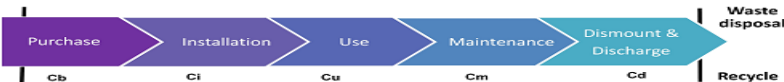


OPEX

vs



CAPEX

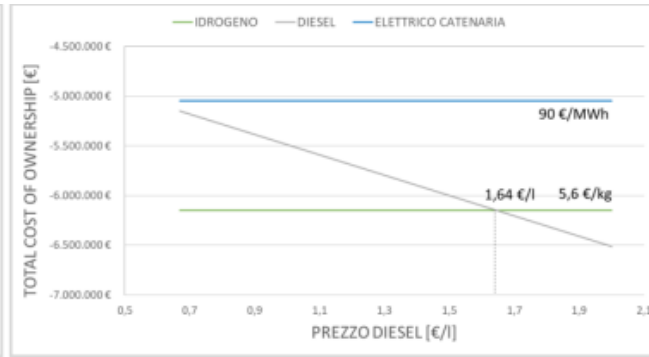
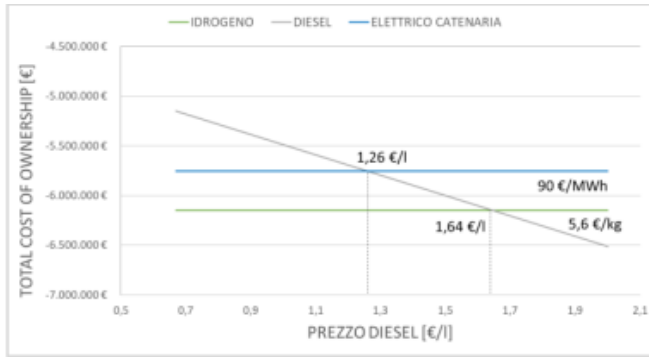


$$TCO = \sum Cx$$

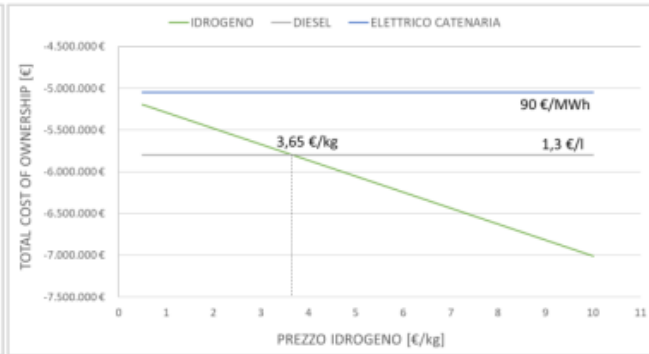
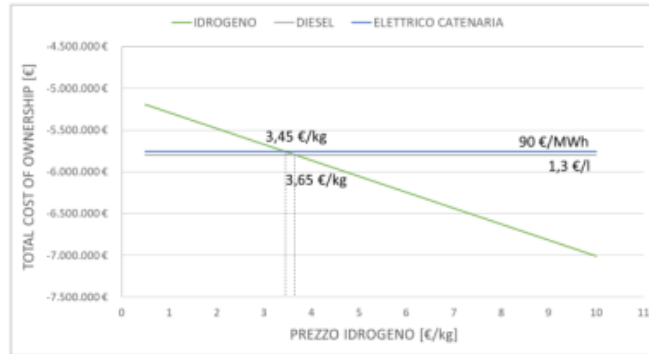
Analisi di sensitività del TCO

La simulazione del Total Cost of Ownership ha tenuto conto di prezzo di gasolio, energia elettrica e idrogeno, rispettivamente pari a 1,3 €/l, 90 €/MWh e 5,6 €/kg; consumo specifico dei treni a idrogeno e a gasolio (diesel), rispettivamente pari a 0,27 kg/km e 1,45 l/km.

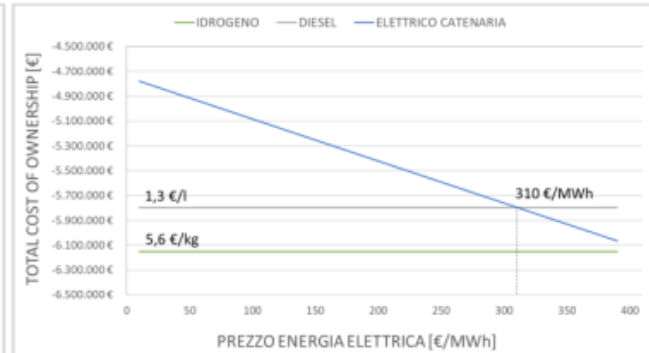
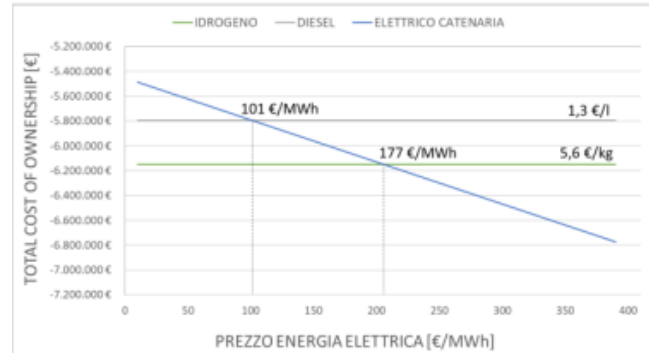
In particolare nel caso di costi maggiori di elettrificazione, la convenienza della soluzione con treni ad idrogeno si otterrebbe per prezzi del medesimo inferiori a circa 3,5 €/kg. Nel caso di minori costi necessari per elettrificare la linea la soluzione con treni elettrici con catenaria risulterebbe comunque più conveniente, anche per prezzi dell'idrogeno inferiori a 1 €/kg.



Analisi di sensitività sul prezzo del gasolio



Analisi di sensitività sul prezzo dell'idrogeno



Analisi di sensitività sul prezzo dell'elettrificazione

Conclusioni

In conclusione, esiste un potenziale vantaggio in termini di minor impatto ambientale nell'uso dell'idrogeno, mentre dal punto di vista economico al momento non si riscontra evidenza di convenienza rispetto alla elettrificazione delle tratte attualmente servite da motrici alimentate a gasolio (diesel). Ciò nonostante, le prospettive di sviluppo delle fonti rinnovabili e dei costi per la loro produzione fanno ritenere che il punto di equilibrio si possa raggiungere nei prossimi decenni

Never Give Up!



Il 25% delle emissioni di CO2 è causato dai trasporti, il 5% di questo è causato dal trasporto navale.

La problematica principale della conversione del trasporto navale è l'uso di tecnologie ibride che comportano una **propulsione troppo pesante per ingombri e pesi.**



Hydrobingo, il traghetto è dotato di 2 motori di potenza 441 kW ciascuno in grado di spingere l'imbarcazione ad una velocità di crociera di circa 22 nodi.



Alcuni progetti internazionali



Caratteristiche tecniche	
Lunghezza:	82,4 m
Larghezza:	17,5 m
Capacità:	300 passeggeri e 80 auto
Velocità:	9 nodi
Fuel cell:	2 x 200kW
Generatori:	2 x 440 kW
Serbatoi H₂:	80 m ³



Caratteristiche	Valori
Dimensioni traghetto:	40m (lunghezza) x 10m (larghezza max.) x 4m (altezza)
Passeggeri:	120
Capacità di carico:	20 autovetture o 2 camion
Potenza sistema fuel cell:	600 kW
Tipologia fuel cell:	Proton-exchange membrane (PEM)
Stoccaggio idrogeno:	600 kg
Tipologia di stoccaggio	Idrogeno compresso a 350 bar
Capacità batterie:	768 kWh
Tipo di batterie:	Li-ion

Il caso Venezia:

L'azienda ACTV gestisce circa 160 imbarcazioni per il trasporto pubblico suddivise in battelli, foranei, motonavi, motoscafi e traghetti.

Assunzioni fatte per lo studio

1. Utilizzo di fuel cell con rendimento 45%;
2. Quantità di idrogeno dipendente dalle necessità e dai rifornimenti (PCIH₂ = 33,33 kWh/kg, 120000kJ/kg), con il 20% di riserva.
3. Serbatoi di stoccaggio del carburante, uno liquido ed uno gassoso compresso a 250 bar

TRASPORTO MARITTIMO LACUSTRE – IL CASO VENEZIA



Stoccaggio H2				
	Rifornimento giornaliero		Rifornimento tre volte a settimana	
	H2 Liquido	H2 gassoso	H2 Liquido	H2 gassoso
H2 (kg)	161		376	
Peso tank (kg)	1 772	2 403	4 134	5 607
Volume tank (m3)	3,99	8,95	9,32	20,88
Costo (euro)	23 351	61 397	54 485	143 259
Fuel cell				
Potenza			167 kW	
Peso			732 kg	
Volume			1,65 m ³	
Costo			250 500 euro	
Sistema				
Peso totale (kg)	2 504	3 136	4 866	6 339
Volume totale (m3)	5,65	10,60	10,97	22,53
Costo totale (euro)	273 851	311 897	304 985	393 759



Stoccaggio H2				
	Rifornimento giornaliero		Rifornimento tre volte a settimana	
	H2 Liquido	H2 gassoso	H2 Liquido	H2 gassoso
H2 (kg)	661		1 542	
Peso tank (kg)	7 268	9 858	16 958	23 002
Volume tank (m3)	16,39	36,71	38,24	85,64
Costo (euro)	95 792	251 867	223 514	587 689
Fuel cell				
Potenza			906 kW	
Peso			3 974 kg	
Volume			8,97 m ³	
Costo			1 359 000 euro	
Sistema				
Peso totale (kg)	11 241	13 832	20 932	26 976
Volume totale (m3)	25,36	45,68	47,21	95,62
Costo totale (euro)	1 454 792	1 610 867	1 582 514	1 946 689



Stoccaggio H2				
	Rifornimento giornaliero		Rifornimento tre volte a settimana	
	H2 Liquido	H2 gassoso	H2 Liquido	H2 gassoso
H2 (kg)	820		1 913	
Peso tank (kg)	9 021	12 236	21 048	28 550
Volume tank (m3)	20,34	45,56	47,46	106,304
Costo (euro)	118 897	312 616	277 426	729 438
Fuel cell				
Potenza			1 229 kW	
Peso			5390 kg	
Volume			12,17 m ³	
Costo			1 843 500 euro	
Sistema				
Peso totale (kg)	14 411	17 626	26 439	33 941
Volume totale (m3)	32,51	57,73	59,63	118,47
Costo totale (euro)	1 962 397	2 156 116	2 120 926	2 572 938

Vaporetto

Confrontando i risultati ottenuti con i pesi e i volumi sostenibili dal vaporetto, rispettivamente 2,6 t e 4,12 m³, risulta che la conversione a idrogeno non sia praticabile per quanto riguarda la quantità di H2 che occupa volumi incompatibili.

Motonave

Stimati 30m³ di volume a disposizione, risultando che l'imbarcazione può integrare solo la configurazione con stoccaggio di idrogeno liquido con rifornimento giornaliero

Traghetto

Stimati 58m³ di volume a disposizione, risultando che l'imbarcazione può integrare la configurazione con stoccaggio di idrogeno liquido e gassoso con rifornimento giornaliero. Costo della riconversione tra 1,9 e 2,1 M€.

Conclusioni

Molti sono gli ostacoli tecnici, di sicurezza e normativi che possono impedire l'applicazione di questa soluzione tecnologica al settore nautico, ma la conversione si dimostra una strada tecnicamente percorribile