



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA GESTIONALE

*SISTEMI DI COMPRESSIONE PER L'IDROGENO:
CARATTERISTICHE E PROBLEMATICHE*

*COMPRESSION SYSTEMS FOR HYDROGEN:
CHARACTERISTICS AND PROBLEMS*

*RELATORE:
PROF. FRANCESCO CORVARO*

*TESI DI LAUREA DI:
UMBERTO DI SIRO
MATRICOLA 1087282*

ANNO ACCADEMICO 2020-2021

“Credo che abbiamo il dovere di lottare per la vita sulla Terra e non solo a nostro beneficio, ma di tutti quelli, umani o meno, che ci hanno preceduto e ai quali siamo legati, così come coloro che, se siamo abbastanza saggi, arriveranno più tardi. Non c'è una causa più urgente, né più giusta, del proteggere il futuro della nostra specie.”

Carl Sagan

INDICE

INTRODUZIONE.	4
CAPITOLO 1: LA PRODUZIONE DELL'IDROGENO.	5
1.1 STEAM REFORMING.	6
1.2 ELETTROLISI.	7
1.3 GASSIFICAZIONE.	10
1.4 PRODUZIONE DA BIOMASSE.	10
CAPITOLO 2: IMMAGAZZINAMENTO DELL'IDROGENO.	10
2.1 COMPRESSIONE.	11
2.2 LIQUEFAZIONE.	11
2.3 ACCUMULO CHIMICO.	12
CAPITOLO 3: RETI DI DISTRIBUZIONE.	13
3.1 VISIONE GENERALE SULLE RETI DI DISTRIBUZIONE DELL'IDROGENO E STATO ATTUALE.	13
3.2 STATO ATTUALE.	14
3.3 PROGETTO AQUADUCTUS.	14
3.4 MISCELAZIONE DI IDROGENO E GAS (H₂NG) E RELATIVI ESPERIMENTI.	15
3.6 STATO ATTUALE DELLE STAZIONI DI RIFORNIMENTO IN ITALIA.	15
3.7 VEICOLI A IDROGENO: FUNZIONAMENTO, VANTAGGI E SVANTAGGI.	16
3.8 L-CHARGE: LA COLONNINA MOBILE.	20
CAPITOLO 4: STATO DELL'ARTE SUI COMPRESSORI: CARATTERISTICHE TECNICHE E PROBLEMATICHE IMPIANTISTICHE.	22
4.1 DIVERSI TIPI DI COMPRESSORI.	22
CAPITOLO 5: RACCOLTA DI DATI DI VARI COMPRESSORI IN COMMERCIO.	24
CAPITOLO 6: TABELLA DELLE STAZIONI DI RIFORNIMENTO DELLA GERMANIA.	27
CONCLUSIONI	31
SITOGRAFIA	32

INTRODUZIONE.

L'idrogeno, con il simbolo H, rappresenta il primo elemento della tavola periodica, e il suo numero atomico è pari ad 1. Un atomo di idrogeno è composto rispettivamente da un nucleo centrale, un protone e un neutrone.

La maggior parte dell'idrogeno in natura può essere individuato nei legami con il carbonio, negli idrocarburi e sottoforma d'acqua. Esso è un gas incolore e inodore a molecola biatomica, presenta una densità molto bassa, per questo motivo sale verso l'alto abbandonando l'atmosfera e quindi è poco presente nella crosta terrestre.

L'idrogeno è formato da tre isotopi:

-il prozio: composto da un protone e un elettrone;

-il deuterio: composto da un neutrone, un elettrone e un protone;

-il trizio: composto da due neutroni, un elettrone e un protone;

L'idrogeno molecolare è molto stabile, ha la capacità di avere due forme differenti: para-idrogeno e orto-idrogeno. Queste due forme sono differenziate dagli spin nucleari dei due atomi, antiparalleli nel primo caso e paralleli nel secondo.¹

Principali caratteristiche fisiche e chimiche dell'idrogeno:

MASSA ATOMICA RELATIVA	1.00794
TEMPERATURA DI FUSIONE	-259.14 °C
TEMPERATURA DI EBOLLIZIONE	-252.87 °C
STATO DI AGGREGAZIONE	GASSOSO
DENSITÀ(20°C)	0.084 g/cm ³
NUMERO DI OSSIDAZIONE	-1, 1
ELETTRONEGATIVITÀ	2.2
ENERGIA DI PRIMA IONIZZAZIONE	1312.06 kJ/mol
RAGGIO ATOMICO	53 pm
CONFIGURAZIONE ELETTRONICA	1s ¹
ENERGIA DI IONIZZAZIONE(eV)	13.5984 eV
PERCENTUALE NELLA COMPOSIZIONE DELLA MASSA TERRESTRE	0.88%

¹ <<http://www.tavolaperiodica.altervista.org/gruppo.1a/idrogeno.html>>

COMPOSIZIONE ISOTOPICA	H-1 99.9885% H-2 0.0115%
------------------------	-----------------------------

CAPITOLO 1: LA PRODUZIONE DELL'IDROGENO.

Attualmente nel mondo vengono prodotti ogni anno circa 500 miliardi di Nm³ di idrogeno. Essendo la densità dell'idrogeno, a questi valori di pressione e temperatura, pari a 0,0899 Kg/Nm³ è possibile esprimere la quantità in peso di idrogeno annualmente prodotta: si parla di 44,9 milioni di tonnellate. Il principale problema può nascere dal fatto che oggi le principali produzioni di idrogeno provengono da processi che sfruttano fonti fossili con processi simili alla lavorazione del petrolio che comporta quindi inevitabili sprechi e inquinamento. Oltre il 90% dell'idrogeno prodotto attualmente deriva direttamente o indirettamente da processi che prevedono l'utilizzo di idrocarburi. Il recente aumento della credibilità di un'economia all'idrogeno ha portato a dei progressi tecnologici che permettono la sua produzione in maniera controllata per esempio a partire dal metano ma, chiaramente, la meta di modalità di produzione si raggiungerà quando si sarà in grado di produrre idrogeno a partire da fonti rinnovabili. Questa meta non è irraggiungibile come potrebbe sembrare, già oggi, infatti, sono stati sperimentati vari metodi di produzione che però non vengono considerati molto efficienti e hanno bisogno di studi, ottimizzazioni e ovviamente credibilità e sensibilità politica per il finanziamento degli stessi. Attualmente l'elettrolisi dell'acqua (scomponendo l'acqua nei due costituenti: idrogeno e ossigeno) rappresenta il principale metodo per ricavare idrogeno. Per tale processo però è necessario l'utilizzo di corrente elettrica, la quale, se ottenuta in modo tradizionale da fonti fossili risulterebbe in termini economici e ambientali inconvenienti. Graduali aumenti si notano tuttavia nei tentativi di utilizzare energia ricavata da fonti rinnovabili anche se non si dispone di una quantità sufficiente. Si ipotizza, quindi, un periodo di transizione nel quale i sistemi di produzione di idrogeno a partire da combustibili fossili saranno affiancati da quelli in grado di ottenerlo mediante elettricità pulita.

1.1 STEAM REFORMING.

Lo steam reforming è un processo chimico che attraverso la reazione di idrocarburi con acqua permette di produrre idrogeno. Per quanto riguarda il fattore energetico è molto conveniente, invece per quanto concerne il fattore ambientale risulta essere assai sconveniente, perché dal processo viene prodotta anidride carbonica, responsabile dell'effetto serra. L'idrogeno estratto da questo processo viene chiamato "Idrogeno grigio" ed è al momento il metodo di produzione dell'idrogeno più utilizzato.

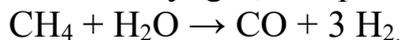
Il processo di steam reforming è composto da due fasi preliminari:

-Compressione: viene abbassata la pressione dell'idrocarburo o del gas di circa 2040 bar, questo passaggio permette di diminuire la grandezza dell'impianto così da agevolare l'adsorbimento della CO₂ e i costi.

-Desolforazione: tramite l'assorbimento su ossido di zinco o carbone attivo, viene trasformato lo zolfo in disolfuri, in questo modo viene eliminato lo zolfo presente, questo passaggio deve essere fatto perché lo zolfo andrebbe ad inquinare i catalizzatori usati durante il processo.²

Una volta completate queste fasi preliminari si passa ai processi dello steam reforming.

Il gas ottenuto dalla desolforazione viene fatto passare nel reformer (un bruciatore) composto da tubi con catalizzatori a base di Nichel, in questi ultimi viene immesso vapor acqueo con temperatura che si aggira intorno agli 800°C e con pressioni di circa 30-35 bar. In questa reazione endotermica si ottiene una miscela gassosa chiamata syngas, composta da idrogeno e monossido di carbonio:



La fase successiva chiamata di shift va a diminuire i valori di CO. Questo passaggio è diviso da due processi, uno ad alta temperatura(sopra i 500°C) e l'altro a bassa temperatura(circa 200°C). Alla fine di questa fase si ottiene anidride carbonica e idrogeno: $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$.³

² Davide Giannotti, "Come si produce idrogeno? Lo steam reforming" 4 febbraio 2019. <<http://www.scientiamo.com/blog/?come-si-produce-idrogeno--lo-steam-reforming>>

³ https://it.abcdef.wiki/wiki/Steam_reforming

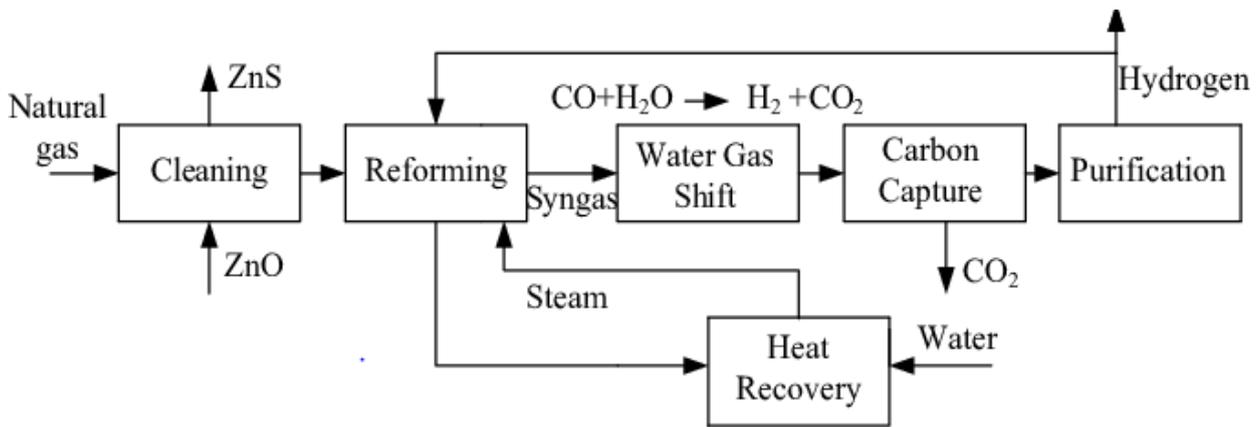


Figura 1 Flusso di un impianto per la produzione di idrogeno attraverso lo steam reforming.
 <https://www.researchgate.net/figure/Hydrogen-production-by-steam-reforming-of-natural-gas-53-58_fig3_282746267>

1.2 ELETTROLISI.

L'elettrolisi potrebbe essere in futuro un metodo di produzione dell'idrogeno da risorse rinnovabili, in quanto attraverso l'utilizzo di elettricità divide l'acqua in ossigeno e idrogeno. La reazione avviene nell'elettrolizzatore, le dimensioni di quest'ultimo possono essere variabili. In base al tipo di fonte di energia utilizzata nell'elettrolisi si va a denominare l'idrogeno in:

- idrogeno nero, quello derivante da energia elettrica ottenuta in centrali a petrolio o a carbone;
- idrogeno viola, proveniente da energia elettrica ricavata da centrali nucleari;
- idrogeno verde, quello meno impattante derivante da fonti rinnovabili.

L'elettrolizzatore è composto da un catodo e un anodo distanziati da un elettrolito.

Esistono diversi tipi di elettrolizzatori.

Elettrolizzatori a membrana elettrolita polimerica (PEM).

In questo caso l'elettrolito è composto da un materiale plastico speciale. L'acqua va a reagire con l'anodo formando ioni di idrogeno a carica positiva e ossigeno, gli elettroni vanno in un circuito esterno e gli ioni di idrogeno invece si trasferiscono selettivamente al catodo attraverso il PEM. All'interno del catodo, gli elettroni del circuito esterno si combinano con gli ioni dell'idrogeno così formando gas idrogeno.

Reazione anodica: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$

Reazione catodica: $4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2$

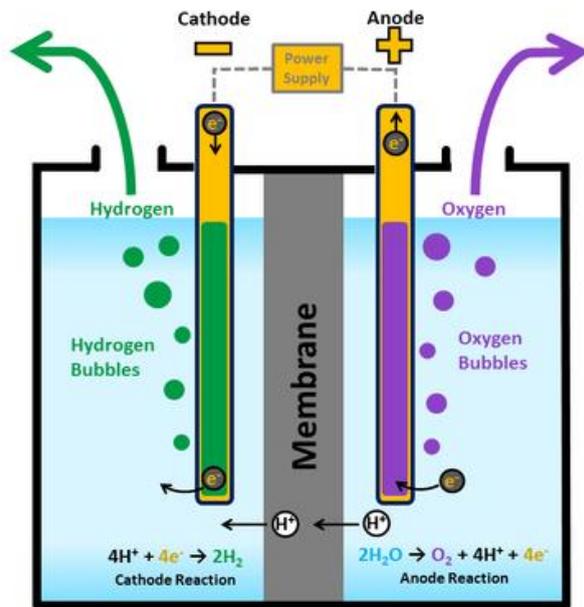


Figura 2 Rappresentazione del principio di funzionamento del PEM. Miniwatt.it

Elettrolizzatori alcalini.

Questi elettrolizzatori utilizzano una soluzione liquida alcalina di idrossido di sodio o di potassio come elettrolita. Funzionano con il trasporto degli ioni di idrossido attraverso l'elettrolita dal catodo all'anodo, l'idrogeno viene ottenuto sul lato del catodo.

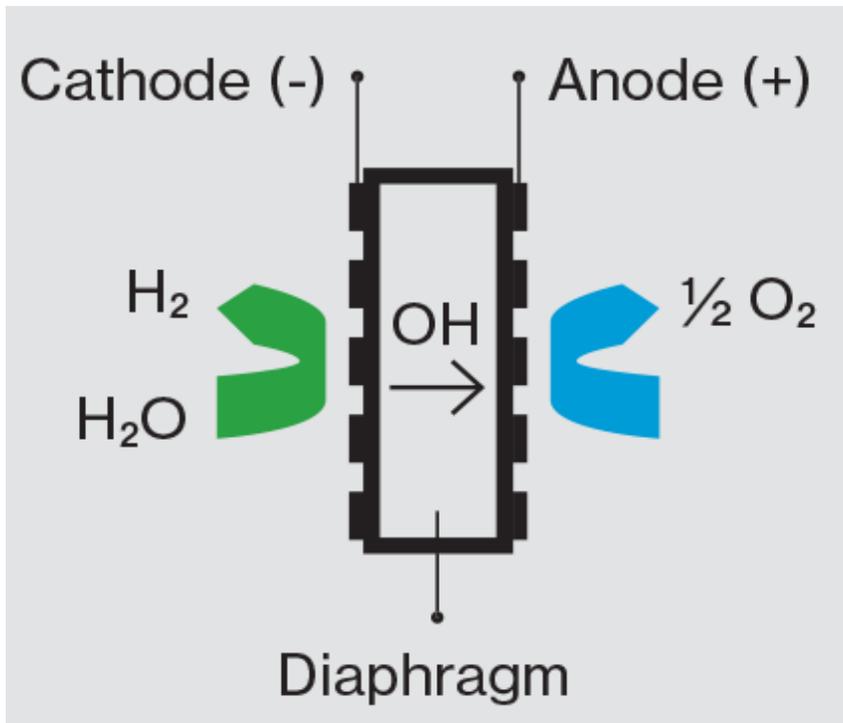


Figura 3 Rappresentazione del principio di funzionamento degli elettrolizzatori alcalini.
<https://www.technologyreview.it/l-idrogeno-verde-e-una-fonte-di-energia-pulita>

Elettrolizzatori di ossidi solidi.

Questi elettrolizzatori hanno l'elettrolita composto da un materiale ceramico che riesce a condurre gli ioni di ossigeno a carica negativa ad alte temperature. Gli elettrolizzatori a ossidi solidi funzionano a elevate temperature così da ottimizzare il funzionamento delle membrane di ossido(700°C-800°C).

L'acqua all'interno del catodo si va a combinare con gli elettroni del circuito esterno per produrre ioni di ossigeno negativi e gas idrogeno. Attraverso la membrana ceramica solida passano gli ioni di ossigeno e reagiscono all'anodo con l'obiettivo di ottenere ossigeno e elettroni per il circuito esterno.⁴

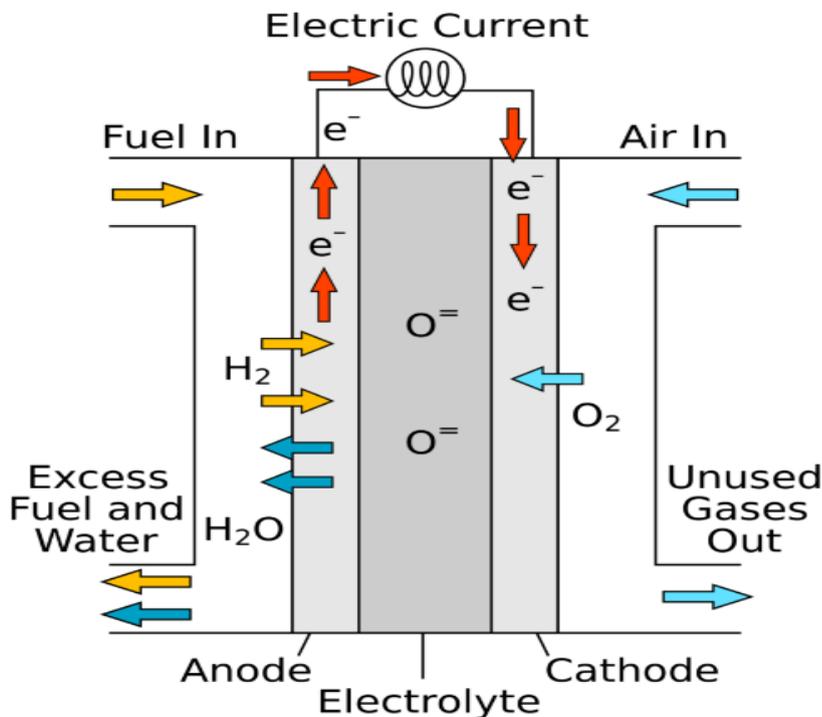


Figura 4 Rappresentazione del principio di funzionamento degli elettrolizzatori ad ossidi solidi.
<https://energycue.it/mondo-sofc-celle-combustibile-ossidi-solidi/17825/>

⁴ <http://it.gprectifier-es.com/hydrogen-electrolysis>

1.3 GASSIFICAZIONE.

La gassificazione è un processo chimico che converte materiali ricchi di carbonio, come il petrolio, il carbone oppure le biomasse, in composti gassosi, idrogeno e monossido di carbonio.

Gassificazione del carbone.

In questo tipo di processo il carbone viene trattato con il vapor acqueo e viene trasformato in una miscela di syngas e metano.

$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$. Questa reazione è di tipo endotermica, il calore viene fornito miscelando al vapor acqueo una parte di ossigeno così contemporaneamente c'è la reazione esotermica. $C + O_2 \rightarrow CO_2$.

L'ossido di carbonio ottenuto nella prima reazione viene fatto reagire con un vapor acqueo a circa 500°C su catalizzatore a base di ossidi di cobalto e ferro.

$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$.⁵

1.4 PRODUZIONE DA BIOMASSE.

In questa modalità di produzione si produce bioidrogeno mediante bioreattori. Una delle modalità per ottenere l'idrogeno con questa tecnica si chiama pirolisi, è un processo che attraverso la decomposizione termica, va a dividere le sostanze organiche in elementi semplici. Le sostanze organiche vengono riscaldate in assenza di aria a circa 900°C-1000°C, queste reazioni danno come risultato un residuo solido e sostanze volatili. Alcuni microrganismi fotosintetici in natura riescono a produrre idrogeno grazie all'energia solare. Si stanno sperimentando tecniche biochimiche per produrre idrogeno attraverso l'utilizzo di acque di scarico di processi alimentari e rifiuti umidi in bioreattori anaerobici, perché si sfruttano le capacità i fenomeni di fermentazione.⁶

CAPITOLO 2: IMMAGAZZINAMENTO DELL'IDROGENO.

Negli ultimi anni sono stati studiati e messi a punto diversi sistemi di stoccaggio, sempre più efficienti e adatti a tutti i tipi di applicazione. L'idrogeno può essere accumulato e trasportato in forma gassosa, liquida oppure assorbito su materiali speciali; ogni forma presenta sia vantaggi, sia aspetti che possono creare una percentuale di danno, e tutte, seppur in gran parte già utilizzate, richiedono

⁵ https://it.wikipedia.org/wiki/Produzione_di_idrogeno#Gassificazione_del_carbone

⁶ <http://www.eniscuola.net/argomento/idrogeno/conoscere-lidrogeno/produzione-da-biomasse/>

considerevoli sforzi di ricerca e sviluppo per un impegno su larga scala ma anche economicamente competitivo.

2.1 COMPRESSIONE.

La compressione è la modalità di accumulo più semplice e utilizzata, però sviluppa un grande problema, ovvero il grande volume che richiede questa modalità, all'incirca tre volte il volume del metano e fino a dieci volte il volume che occupa la benzina. Ci sono vari tipi di compressori per svolgere l'attività di compressione dell'idrogeno, i compressori alternati hanno una potenza che può raggiungere 11.200 kW con flussi di idrogeno di circa 890 kg/h e una pressione di 25 Mpa, i compressori radiali e assiali vengono utilizzati quando ci sono flussi 9-10 volte maggiori.

L'idrogeno per essere accumulato in cisterne viene portato ad una pressione di 20,7 MPa ed immagazzinato in contenitori sferici o cilindrici in quantità non superiori a 15.000 Nm³, questa tecnica è chiamata immagazzinamento all'aperto. Un'altra tecnica è l'immagazzinamento sotto terra, questa è una tecnica che viene utilizzata quando ci sono grosse quantità di idrogeno compresso, le pressioni possono arrivare a 55,2 MPa.



Figura 1 Rappresentazione di una cisterna per l'accumulo di idrogeno in forma gassosa

2.2 LIQUEFAZIONE.

Questa tecnica è molto applicata, il processo avviene tramite una combinazione di compressori, scambiatori di calore, motori di espansione e valvole a farfalla. L'idrogeno per essere liquido deve essere portato ad una temperatura di -253°C, per cui è richiesta molta energia per portarlo e mantenerlo a queste condizioni. Nel

processo di liquefazione l'idrogeno viene raffreddato con azoto liquido pre-raffreddato, quest'ultimo riduce la temperatura dell'idrogeno prima che passi nella valvola d'espansione, l'azoto viene recuperato e riutilizzato nel ciclo continuo di refrigerazione. Potrebbero verificarsi delle fuoriuscite di idrogeno liquido con grande dispendio energetico dell'intero processo. Un qualsiasi passaggio di calore attraverso il liquido fa evaporare una parte di idrogeno, ci sono diverse fonti di calore: la conversione da orto a para durante la liquefazione, l'energia del pompaggio, oppure la conduzione, convezione o irraggiamento diretto del calore.

Generalmente le cisterne per l'idrogeno liquido sono sferiche perché ha la più bassa superficie per il trasferimento di calore per un'unità di volume, al crescere del diametro dei contenitori il volume aumenta più velocemente della superficie esterna per cui contenitori più grandi, in proporzione, provocano minori perdite per trasferimento di calore. Le cisterne cilindriche sono più economiche per la costruzione per questo sono preferibili.⁷

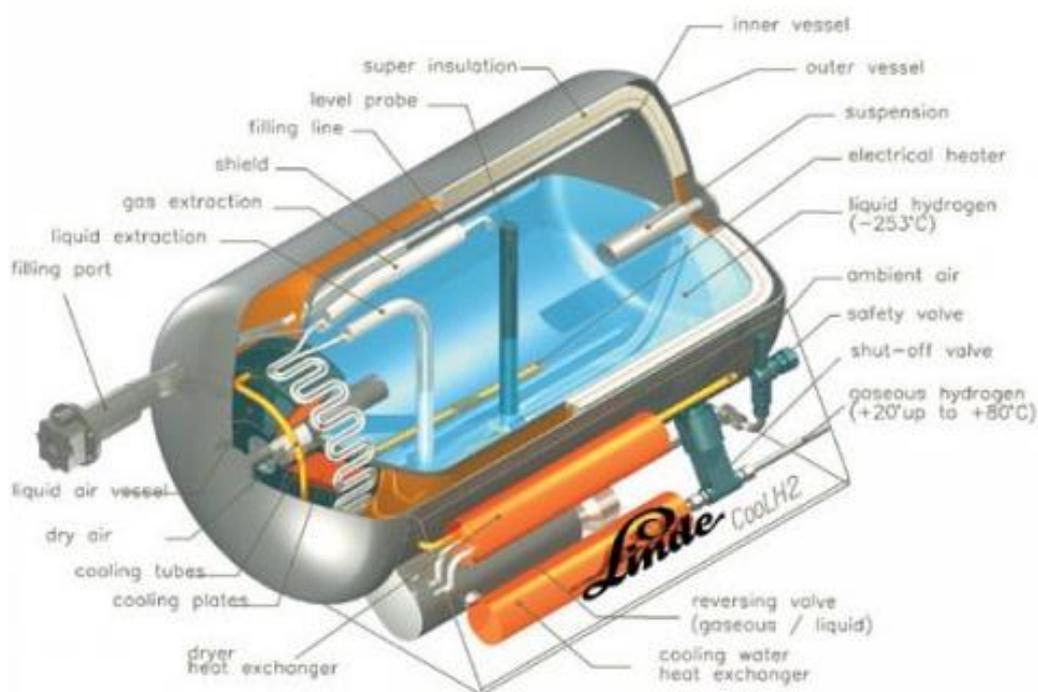


Figura 2 Rappresentazione di un contenitore di idrogeno liquido

2.3 ACCUMULO CHIMICO.

L'idrogeno ha la capacità di potersi legare a metalli o composti chimici per facilitarne l'accumulo. Nel caso in cui l'idrogeno va a legarsi con metalli forma idruri, i metalli riescono ad imprigionare l'idrogeno a basse pressioni (viene fatto penetrare il gas

⁷ <http://www.energoclub.org/page/accumulo>

all'interno del reticolo cristallino del metallo) per poi essere rilasciato ad alte temperature. Questa tecnica di accumulo può essere paragonata a quella di idrogeno liquido per quanto riguardano le densità energetiche, il volume dell'idrogeno si andrebbe a ridurre di 3-4 volte così da poter essere utilizzato dalle autovetture. In base al peso specifico del metallo di base dipende l'energia specifica. Allo stato attuale con i materiali esistenti si ottengono sistemi di accumulo troppo pesanti, infatti uno stesso veicolo con idrogeno liquido o compresso avrebbe un'autonomia di tre o quattro volte superiore rispetto a sistemi di accumulo chimico. L'alternativa è di trasportare le molecole di idrogeno dalle quali è possibile estrarre gas solo dove è possibile usare un reformer, questa tecnica però è inquinante. Una soluzione potrebbe essere quella di usare il composto, sodio boroidruro, ha la capacità di legarsi molto bene con l'idrogeno. Questa tecnica intende utilizzare una soluzione acquosa, metà da acqua e metà dal sodio boroidruro, fornirebbe un rapporto energetico simile, in volume, a quello della benzina. Il materiale di scarto ottenuto da questo tipo di accumulo il borace, è una sostanza già utilizzata nei detersivi che può essere riutilizzata.⁸

CAPITOLO 3: RETI DI DISTRIBUZIONE.

3.1 VISIONE GENERALE SULLE RETI DI DISTRIBUZIONE DELL'IDROGENO E STATO ATTUALE.

Il trasporto dell'idrogeno si realizza, in base alle quantità interessate, per mezzo di autocisterne o condotte specifiche, che, a seguito delle odierne tecnologie presentano grosse differenze di costo, riscontrabili attraverso analisi tecnico-economiche, permettendo così di arrivare alla soluzione migliore per applicazione e prezzi. Seguendo l'esperienza accumulata nel settore della distribuzione gas ci si indirizza anche verso la realizzazione e l'esercizio di reti di distribuzione dell'idrogeno, molto simili alle reti per il gas naturale. La maggior parte di varianti si può riscontrare nei materiali utilizzati, in quanto ad esempio alcuni acciai hanno migliore compatibilità con l'idrogeno, oppure nei criteri di progettazione delle stazioni di pompaggio. In effetti questo elemento richiede una pressione di pompaggio tre volte superiore al metano, a causa della sua minore densità. In più, se per i gasdotti il diametro ideale è di 1.4 metri, per gli idrogenodotti è di 2 metri. L'idrogeno si mostra in forma meno viscosa del gas naturale, sebbene la sua densità energetica sia di minore volume; per

⁸ <http://www.eniscuola.net/argomento/idrogeno/accumulo-e-trasporto/laccumulo-chimico/>

questo con una adatta progettazione l'energia necessaria per il suo pompaggio si paragona a quella richiesta per la medesima quantità di gas naturale⁹.

3.2 STATO ATTUALE.

Idrogenodotti di dimensioni importanti sono presenti in diversi paesi. Allo stato attuale è presente una rete di circa 170 chilometri nella Francia del Nord, per un totale nell'intera Europa di più di 1500 chilometri. Il Nord America, possiede condutture al di sopra di 700 chilometri per il trasporto dell'idrogeno¹⁰.

3.3 PROGETTO AQUADUCTUS.

La Germania è uno dei paesi che in Europa sta investendo sull'idrogeno verde. Uno dei progetti più importanti è AquaDuctus, che trasporterà idrogeno verde prodotto dall'installazione di 10 GW elettrolizzatori alimentati da vento offshore tra Heigoland e Dogger Bank nel Mare del Nord. La rete partirà dal Mare del Nord fino ad arrivare all'Europa continentale. Una volta completata l'infrastruttura, la quantità di idrogeno trasportato sarà un milione di tonnellate all'anno. AquaDuctus sostituirà cinque sistemi di trasmissione in corrente continua ad alta tensione, che altrimenti devono essere realizzati. L'infrastruttura sarà pronta nel 2035¹¹.



Figura 5 Rappresentazione infrastruttura inerente al progetto AquaDuctus
https://meethydrogen.com/resource/aqueductus-the-first-green-hydrogen-pipeline?fbclid=IwAR3BJQ-Gc_9FfmfwjrQa5TxFgSior6CMZXYHQ05PxUDnrs1kn7aljdYTi2g

⁹ <http://www.eniscuola.net/argomento/idrogeno/accumulo-e-trasporto/la-distribuzione/>

¹⁰ <http://www.eniscuola.net/argomento/idrogeno/accumulo-e-trasporto/la-distribuzione/>

¹¹ Chris Kwacz, "AquaDuctus, il primo gasdotto verde dell'idrogeno", 26 aprile 2021, <
https://meethydrogen.com/resource/aqueductus-the-first-green-hydrogen-pipeline?fbclid=IwAR3BJQ-Gc_9FfmfwjrQa5TxFgSior6CMZXYHQ05PxUDnrs1kn7aljdYTi2g >

3.4 MISCELAZIONE DI IDROGENO E GAS (H₂NG) E RELATIVI ESPERIMENTI.

Gli operatori del settore del gas, produttori di componenti di fuelcell ed elettrolizzatori e compagnie energetiche stanno accelerando sulla richiesta di immettere nelle reti di distribuzione del gas una miscela tra gas naturale e idrogeno, si parla di miscela perché le infrastrutture esistenti non consentirebbero l'uso di idrogeno puro. La richiesta di miscelare gas e idrogeno (in gergo blending) riuscirebbe a ridurre le emissioni e quindi si farebbe un grande passo avanti per quanto riguarda la transizione sostenibile¹².

Il primo esperimento di immettere H₂NG (miscela di idrogeno e gas) in Europa è stato fatto a Contursi Terme (Salerno), nel 1 aprile 2019. La sperimentazione è avvenuta con l'immissione di una miscela di idrogeno al 5% in volume e gas naturale nella rete di trasporto gas in Italia¹³. Dopo qualche mese, nel 16 dicembre 2019 è stata aumentata la percentuale di idrogeno fino al 10%. Con una percentuale del genere se applicata all'intera rete fornita da Snam, si potrebbero ridurre le emissioni fino a 5 milioni di tonnellate di anidride carbonica. Questa miscela può poi essere utilizzata nei sistemi tradizionali, per esempio nelle caldaie per il riscaldamento, con il vantaggio di generare minori quantità di gas serra, o può essere estratto e utilizzato nelle celle a combustibile, che di emissioni nocive non ne hanno affatto, e trovare applicazione anche in altri settori, dall'industria ai trasporti¹⁴.

3.6 STATO ATTUALE DELLE STAZIONI DI RIFORNIMENTO IN ITALIA.

L'obiettivo di avere una rete di stazioni a idrogeno italiana è quello di unirsi all'Europa e al Mondo per una innovazione epocale dall'attuale mobilità basata su combustibili non rinnovabili ed inquinanti, verso una mobilità ad emissioni zero con un "combustibile" prodotto localmente da un mix di energie rinnovabili.

¹²Andrea trezza, "Idrogeno, richiesta di blending alla Commissione UE", 22 marzo 2021, <<https://www.formulapassion.it/automoto/ambiente/idrogeno-richiesta-di-blending-alla-commissione-ue-556296.html>>

¹³Comunicati stampa, "Snam: immissione sperimentale di idrogeno a Contursi raddoppiata al 10%", 08 gennaio 2020 <https://www.snam.it/it/media/news_eventi/2020/Snam_immissione_sperimentale_idrogeno_Contursi_raddoppiata.html>

¹⁴Comunicati stampa, "Snam: per la prima volta in europa fornitura di idrogeno misto a gas naturale su rete di trasmissione a utenti industriali", 01 aprile 2019, <https://www.snam.it/it/media/comunicati stampa/2019/Snam_prima_volta_Europa_fornitura_idrogeno_misto_gas_naturale.html>

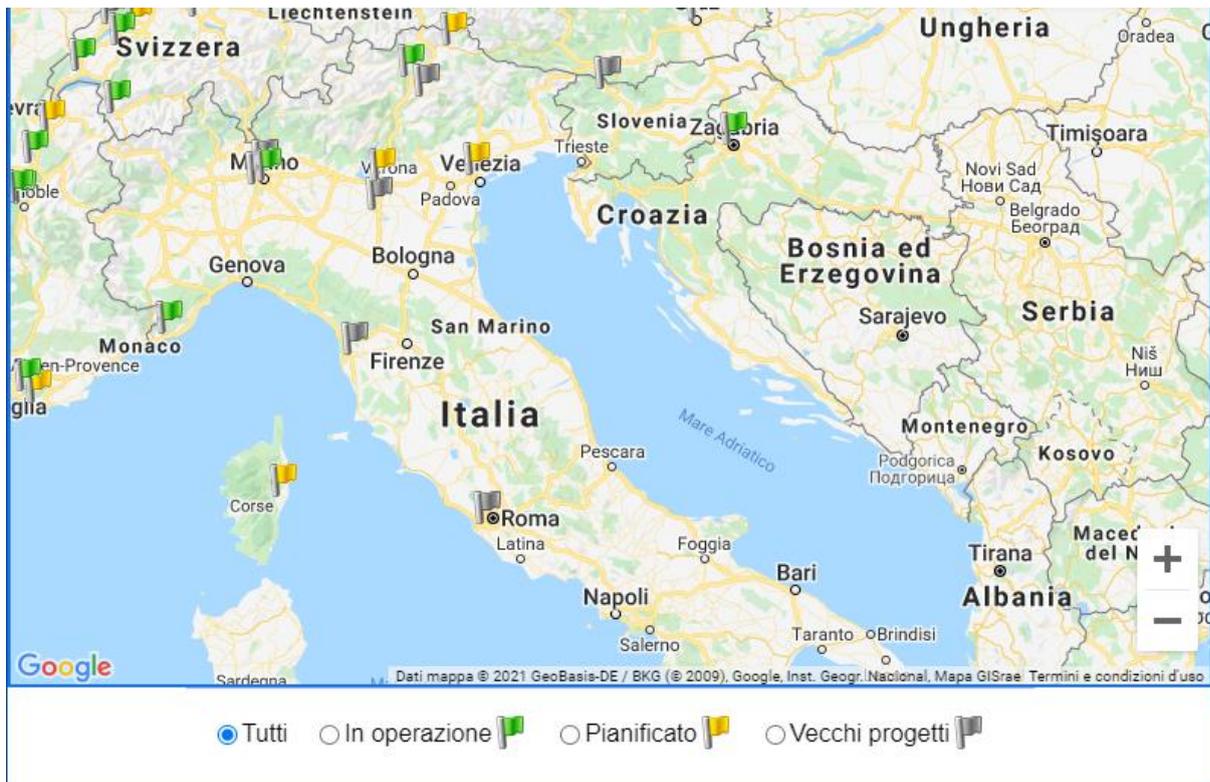


Figura 6 Mappa delle stazioni di idrogeno in Italia,
<https://www.h2stations.org/stations-map/?lat=49.139384&lng=11.190114&zoom=2>

Allo stato attuale in Italia abbiamo tre stazioni operative, la prima si trova a Sanremo, la seconda a Milano-San Donato e la terza a Bolzano. Tutte queste stazioni sono in grado di rifornire Bus-CGH2 350 con l’eccezione della stazione di Bolzano che ha la capacità di rifornire anche la categoria Passenger car_CGH2 700. Infine, in Italia ci sono altre 4 stazioni pianificate, a Milano-San Donato, a Verona, a Venezia e a Brunico, tutte con la potenzialità di rifornire la categoria Passenger car-CGH2 700, con l’aggiunta della stazione di Brunico che sarà funzionale anche per i Bus-CGH2 350¹⁵.

3.7 VEICOLI A IDROGENO: FUNZIONAMENTO, VANTAGGI E SVANTAGGI.

Le auto a idrogeno sono auto elettriche che convertono l’energia chimica dell’idrogeno in energia elettrica. Essa viene prodotta dalla centrale elettrica propria a bordo, ovvero la cella a combustibile. All’interno della cella a combustibile si svolge l’elettrolisi inversa, durante questo processo l’idrogeno (stoccato in uno o più serbatoi presenti nell’auto) reagisce con l’ossigeno che viene dall’aria circostante, durante la reazione si genera energia elettrica, essa può percorrere due strade, in base alla

¹⁵ <https://www.h2stations.org/stations-map/?lat=49.139384&lng=11.190114&zoom=2>

necessità: arriva al motore alimentando direttamente il veicolo oppure viene accumulata in una batteria che rappresenta l'accumulatore intermedio fino a quando l'energia non viene utilizzata per la trazione. Questo tipo di batterie hanno un formato e peso inferiori rispetto alle normali batterie delle auto unicamente elettriche poiché viene alimentata continuamente dalla cella a combustibile. Calore e acqua che si formano dalla reazione dell'idrogeno e ossigeno fuoriescono dal terminale di scarico sottoforma di vapore acqueo¹⁶.

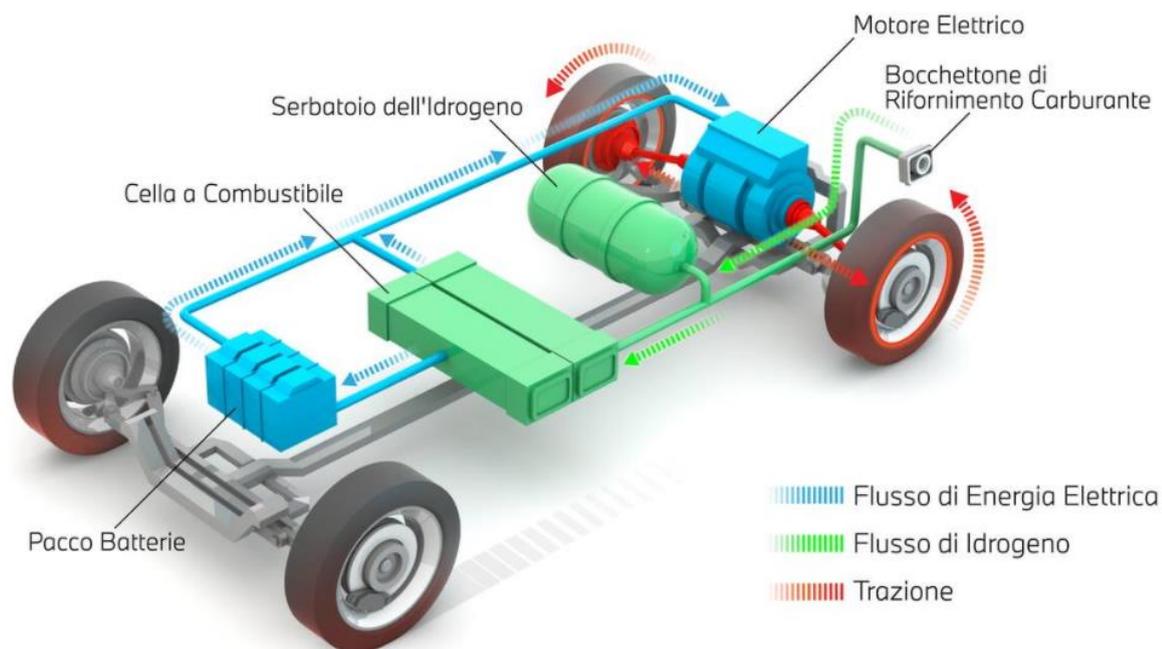


Figura 7 Rappresentazione veicolo a idrogeno, <https://bit.ly/2QXnwTl>

Quando si parla di veicoli a idrogeno abbiamo tanti vantaggi ma anche molti svantaggi che impediscono lo sviluppo di questa tecnologia.

Il modo più semplice ed economico per accumulare idrogeno è quello di utilizzarlo sotto forma di gas compresso a pressione di 200-250 bar (e oltre). Le bombole con gas compresso rappresentano il sistema di trasporto più semplice, di base, ma limitato dal fatto che questo gas necessita di contenitori voluminosi, fino a tre volte più grandi rispetto a quelli utilizzati per il metano e dieci volte rispetto a quelli per la benzina. A tal proposito, questa tecnologia risulta non facilmente presentabile per l'uso a bordo di auto tradizionali, a causa del peso ma soprattutto ingombro dei serbatoi attualmente utilizzati, che rappresentano un limite all'autonomia e alla capacità di carico del veicolo. Da recenti studi si è arrivati ad una nuova forma di progresso con l'introduzione di serbatoi differenti, realizzati con struttura metallica o termoplastica

¹⁶ BMW, "Auto a idrogeno: tutto quello che c'è da sapere", 22 settembre 2020, <<https://www.bmw.com/it/innovation/come-funzionano-le-auto-a-idrogeno.html>>

rinforzata con fibre di carbonio, vetro e altri materiali che appaiono con un peso 3-4 volte inferiore a quello dei serbatoi comuni e che consentono di superare in buona parte gli inconvenienti dell'uso delle bombole tradizionali. Tali serbatoi sono in grado di operare a pressioni fino a 350 bar (potenzialmente fino a 700 bar) e concedono quindi di ottenere densità di accumulo di idrogeno adeguate all'uso a bordo di veicoli. La sicurezza presenta caratteristiche elevate, come ad esempio la robustezza dei serbatoi, ma in particolar modo grazie all'introduzione di fusibili anticoppio in caso di incendio, e di valvole di interruzione del circuito in caso di urto. Per far fronte alla necessità di utilizzare contenitori di vasta misura si può scegliere di utilizzare idrogeno liquido, dato che in questo stato occupa volume minore rispetto al metano. In realtà, però, questo metodo presenta difficoltà legate al fatto che l'idrogeno diventa liquido a -253 gradi centigradi e per riuscire a mantenerlo in questo stato occorrono serbatoi specifici e grande dispendio di energia. Da tenere in considerazione poi anche le problematiche inerenti la sicurezza, ad esempio le perdite durante il rifornimento o in caso di incidente. Per questo motivo i più moderni serbatoi per autoveicoli sono costituiti da due strati di acciaio molto resistente tra i quali viene creato il vuoto. L'accumulo in forma liquida è forse la tecnologia che ad oggi meglio soddisfa, da un punto di vista teorico, le esigenze specifiche dell'autotrazione; tuttavia anch'essa presenta dei limiti. A sfavore dell'idrogeno liquido giocano la maggiore complessità del sistema collegata a distribuzione e rifornimento, che si presenta non solo sul veicolo ma anche a terra, ed i maggiori costi ad esso associati. Da tenere a mente è anche il costo energetico della liquefazione, con valore considerevole, che corrisponde a circa il 30% del contenuto energetico del combustibile, contro un valore compreso tra il 4% e il 7% per l'idrogeno compresso¹⁷.

Durante il rifornimento dei veicoli a idrogeno, quest'ultimo si riscalda, e questo fenomeno è dovuto dalla compressione, il protocollo del rifornimento SAE J2601 afferma che la temperatura del serbatoio non superi gli 85 °C pure nel corso dei rifornimenti rapidi. Per un rifornimento a 700 bar la temperatura dell'idrogeno deve essere portata a -40 °C, e questa fase è chiamata preraffreddamento, dove è possibile raggiungere temperature ancor più rigide con lo svantaggio di avere tempi di rifornimento meno brevi e consumi energetici più alti. Il preraffreddamento viene svolto da macchine frigorifere a compressione e uno scambiatore di calore. L'idrogeno deve essere puro per essere utilizzato dalla cella a combustibile quindi è molto importante non far contaminare con i lubrificanti durante la compressione¹⁸.

¹⁷ http://www.eniscuola.net/wp-content/uploads/2011/02/pdf_idrogeno_2.pdf

¹⁸ Vivigreen, "IDROGENO-Stazioni di rifornimento", 15 gennaio 2021, <<https://www.vivigreen.eu/blog/idrogeno-stazioni-di-servizio/>>

VANTAGGI:

1. Non ci sono emissioni di gas nocivi da parte del veicolo che trasforma l'idrogeno in energia elettrica tramite le celle a combustibile poiché l'unico scarto è acqua sotto forma di vapore acqueo.
2. C'è la possibilità di arrivare addirittura a raddoppiare l'autonomia (km) rispetto ad auto a combustione interna perché le celle a combustibile quando sviluppano energia sono efficienti del 40-60% rispetto a motori tradizionali che sono efficienti del 30-35%.
3. Il tempo che si impiega per il rifornimento di un'auto a idrogeno è molto simile a quello del diesel o della benzina (circa 5 minuti) quindi rispetto ad un'auto completamente elettrica è molto più conveniente visto che per la ricarica di essa ci vogliono 6-8 ore con un caricabatterie di livello 2 e fino a 30 minuti con un caricabatterie di livello $\frac{3}{4}$ (più raro).
4. L'idrogeno può essere prodotto in modo completamente ecologico.
5. Nelle pompe di rifornimento per auto ad idrogeno ci potrebbero essere molti prodotti chimici in meno a differenza delle attuali pompe di rifornimento che contengono BTEX (Benzene, Toluene, Etilbenzene, Xilene), sostanze nocive che portano a rischi di cancro molto elevati.
6. Le celle a combustibile sono abbastanza durevoli e resistenti, con i test della Toyota si è arrivati a dimostrare che esse possono percorrere fino a 100000 miglia.
7. Il costo dell'idrogeno sta scendendo, infatti nello stato della California l'idrogeno che nel 2015 aveva un costo di 13,99 \$/kg dovrebbe arrivare a costare circa 8-10 \$/kg entro il 2025 e quindi diventerebbe davvero conveniente. Anche per quanto riguarda il costo delle celle a combustibile è sceso del 50% in quest'ultimo decennio e secondo le previsioni dovrebbe scendere ancora di più.
8. La sicurezza è un aspetto molto sviluppato, garantiscono progettazioni adeguate di tutti gli aspetti: perdite, perforazioni e soprattutto l'attenzione ai serbatoi di stoccaggio dell'idrogeno.

SVANTAGGI:

1. Il prezzo di acquisto per un'auto a idrogeno è più alto di una completamente elettrica. Questa differenza di prezzo potrebbe non essere colmata visto che secondo le previsioni nei prossimi anni le auto elettriche dovrebbero costare meno.
2. Ci sono poche stazioni di rifornimento, sono pochi i paesi che hanno già un numero importante di stazioni, i principali stati sono: Germania, Giappone, California.
3. Il costo della benzina è attualmente più conveniente dell'idrogeno, anche se le previsioni dicono che nel periodo 2020-2025 il costo dell'idrogeno dovrebbe essere inferiore di poco rispetto alla benzina, bisogna valutare se questo vantaggio permette il passaggio alle auto a idrogeno.
4. Trasportare o immagazzinare idrogeno è molto costoso rispetto alla benzina, perché le infrastrutture per trasportare l'idrogeno sono poche.
5. Attualmente la maggior parte della produzione di idrogeno deriva dal processo di steam methane reforming, questo tipo di processo emette nella prima fase monossido di carbonio e nella seconda fase biossido di carbonio, è molto meno inquinante rispetto alla produzione di benzina ma sicuramente non è così ecologico come potrebbe essere.
6. La produzione di auto a idrogeno è molto limitata.
7. I test sulle auto a celle a combustibile sono ancora pochi e quindi non si sa con precisione la loro durata e i costi di manutenzione potrebbero essere alti.
8. La produzione di celle a combustibile non è ecologica, durante la loro produzione vengono utilizzati prodotti derivanti dal petrolio¹⁹.

3.8 L-CHARGE: LA COLONNINA MOBILE.

Questo progetto nasce con l'idea di andare a rifornire tutte quelle zone dove le infrastrutture per la ricarica di auto elettriche devono essere sviluppate. Questo servizio funziona con una semplice app, prenotando la ricarica, e il truck si dirigerà verso l'auto, con la condizione necessaria che ci sia parcheggio nelle immediate vicinanze al veicolo. L-charge è un truck che utilizza una batteria e un generatore, ovvero funziona con il principio della centrale elettrica a gas, quindi invece di trasportare grandi pacchi di batterie, L-charge utilizza fuel cell per produrre elettricità dall'idrogeno puro, da una miscela di idrogeno e gas naturale oppure da solo gas naturale. L'obiettivo è quello di abbattere le emissioni di CO₂ e quindi produrre energia pulita. La stazione L-charge è ultraveloce perché potrebbe ricaricare le auto

¹⁹ Economia-Italia, Auto a Idrogeno Vantaggi e Svantaggi della Cella a Combustibile, 27 marzo 2021, < <https://www.economia-italia.com/auto-a-idrogeno>>

in soli 10-20 minuti sostenendo la ricarica in corrente continua ad una potenza da 120 kW a 250kW. La stazione potrebbe ricaricare fino a 40 auto elettriche al giorno producendo 1440kW.

L-charge potrebbe avere anche stazioni fisse. Questa stazione potrebbe essere utilizzata per contrastare picchi di domanda, in situazioni di grandi eventi oppure nel periodo delle vacanze. L-charge con modulo fisso andrebbe a produrre fino a 7200kWh al giorno.

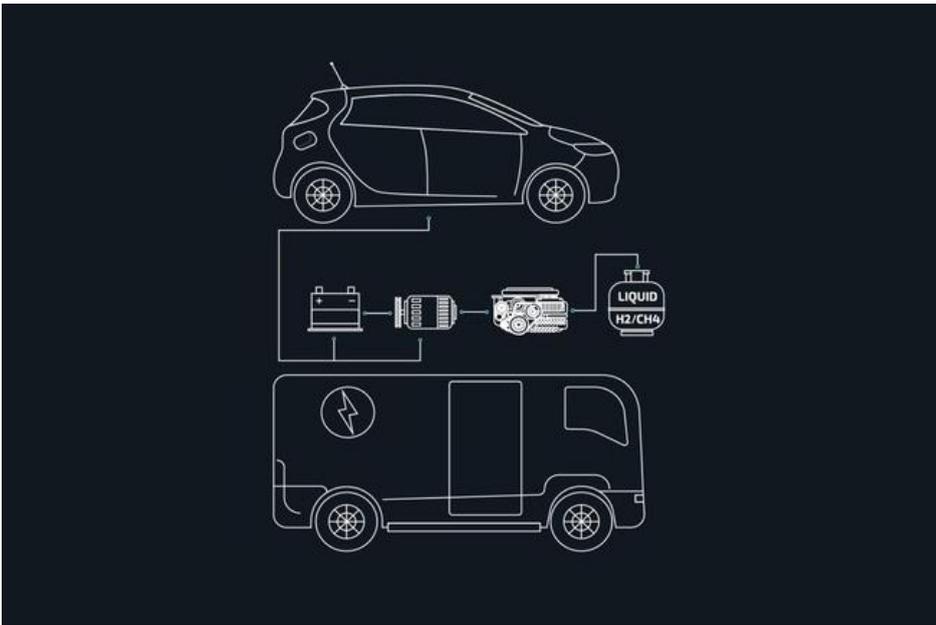


Figura 8 Principio di L-charge, [https:// www.hdmotori.it/auto/articoli/n546265/l-charge-ricarica-mobile-auto-elettriche-domicilio/](https://www.hdmotori.it/auto/articoli/n546265/l-charge-ricarica-mobile-auto-elettriche-domicilio/)



Figura 9 Truck per il rifornimento e la produzione di energia elettrica, <https://www.hdmotori.it/auto/articoli/n546265/l-charge-ricarica-mobile-auto-elettriche-domicilio/>

CAPITOLO 4: STATO DELL'ARTE SUI COMPRESSORI: CARATTERISTICHE TECNICHE E PROBLEMATICHE IMPIANTISTICHE.

Il compressore per l'idrogeno è uno strumento per comprimere in fase di stoccaggio il gas di idrogeno. Una problematica dell'idrogeno è la sua bassa densità a pressione atmosferica, in quanto questa proprietà crea molte difficoltà inerenti alla conservazione, dato che richiede pressioni molto elevate, fino a 1000 bar²⁰.

4.1 DIVERSI TIPI DI COMPRESSORI.

Ci sono diversi tipi di compressori:

-Compressori a diaframma con pistone in metallo: è un congegno ad alta pressione continuata, 11~15 kW, 30~50 Nm³/h, 40 MPa per la fornitura di idrogeno adottata nelle stazioni ad idrogeno. La compressione produce calore per cui c'è il bisogno di avere l'impianto di raffreddamento molto efficiente, sviluppato in più stadi che rendono la compressione più isoterma e meno adiabatica, l'efficienza adiabatica media nei compressori si aggira al 70%.

-Compressori a pistoni liquidi-ionici: è un compressore basato su un pistone formato da un materiale ionico-liquido²¹. Questa tipologia di compressore approfitta di due caratteristiche dei liquidi ionici, la prima è la non determinabilità delle pressioni di vapore e l'altra è la possibilità di avere una grande finestra di temperatura per la fase liquida, con l'unione con la bassa solubilità di idrogeno in loro. L'insolubilità in questione viene utilizzata sfruttando il corpo di un liquido ionico per comprimere l'idrogeno fino a 1000 bar nelle stazioni di idrogeno. Il tempo di vita di questa tipologia di compressori è 10 volte superiore ad un compressore normale alternativo con diminuzione di manutenzione durante l'utilizzo e cosa importante è avere costi energetici inferiori fino al 20%²².

-Compressore a rotore guidato: è un compressore composto da un rotore a lobi, assemblato su un albero eccentrico che gira in una camera progettata appositamente. La funzionalità ricorda i motori a combustione interna. Il gas viene portato alle pressioni richieste dentro la camera tramite i lobi del rotore²³.

²⁰ <https://www.netinbag.com/it/manufacturing/what-is-a-hydrogen-compressor.html>

²¹ https://www.wikizero.com/it/Compressore_per_idrogeno

²² https://it.wikicore.net/wiki/Ionic_liquid_piston_compressor

²³ <https://www.snowviewfarm.com/che-cosa-e-un-compressore-di-idrogeno/>

-Compressori lineari: è un tipo di compressore a singolo pistone lineare, sfrutta il controbilanciamento dinamico, un corpo mobile è collegato ad un pistone mobile e alla parete non mobile del compressore con l'aiuto di molle meccaniche che possono essere a flessione oppure a spirale. Questo tipo di compressore viene usato nella criogenetica²⁴.

-Idrurocompressore: è un compressore caratterizzato da idruri metallici che hanno la capacità di assorbimento di idrogeno a basse pressioni, la liberazione del calore e desorbimento di idrogeno ad alte pressioni, la temperatura viene aumentata tramite l'acqua oppure una batteria elettrica.

I compressori a idruro hanno il vantaggio di avere un'alta densità volumetrica, non ci sono parti mobili ed è molto semplice a livello di funzionamento, si può esaurire il calore di scarto invece che l'elettricità ed infine l'assorbimento/desorbimento reversibile. Gli svantaggi da considerare maggiormente sono il peso e il costo dell'idruro metallico²⁵.

-Compressore elettrochimico: è un compressore che viene utilizzato per la compressione dell'idrogeno durante lo stoccaggio nelle stazioni di rifornimento. l'idrogeno viene servito all'anodo e l'idrogeno compresso viene messo nel catodo. In questa tipologia di compressore non ci sono componenti in movimento ed è molto compatto. Con questo tipo di compressione elettrochimica vengono raggiunte pressioni di 1000 bar²⁶.

²⁴ https://it.wikicore.net/wiki/Linear_compressor

²⁵ https://en.wikipedia.org/wiki/Hydride_compressor#cite_note-1

²⁶ https://en.wikipedia.org/wiki/Electrochemical_hydrogen_compressor

CAPITOLO 5: RACCOLTA DI DATI DI VARI COMPRESSORI IN COMMERCIO.

Nella tabella si riportano i dati dei compressori di idrogeno in commercio, installati e utilizzati nelle stazioni di rifornimento. Vengono riportati i nomi dei vari competitor con le rispettive tipologie di compressori, le applicazioni, i dati tecnici e caratteristiche tecniche. Dal seguente elenco si denota come la tipologia più utilizzata è quella dei compressori a pistoni e compressori a membrana. I competitor sono aziende che puntano ad avere diversi modelli per poter soddisfare i diversi utilizzi. Tutte le aziende mirano ad avere prodotti di altissima qualità con materiali resistenti e duraturi.

COMPETITOR	TIPOLOGIA	APPLICAZIONI	DATI TECNICI	CARATTERISTICHE TECNICHE
PDC Machines	Compressori a membrana a 3 stadi	Autobus	Portata: ≥ 2500 kg/giorno	Elevata purezza del prodotto.
			Pressione di scarico: 1034 bar	Materiali resistenti alla corrosione.
		Veicoli	Portata: ≥ 2500 kg/giorno	Elevata affidabilità e operatività.
			Pressione di scarico: 1034 bar	Funzionamento sicuro.
		Mezzi per la movimentazione materiali.	Portata: da 5000 a 2500 kg/giorno	Funzionamento silenzioso.
	Pressione di scarico: 482 bar	Sistema di scarico automatico.		
VENTOS COMPRESSORS	Compressori a membrana	Stazioni di rifornimento.	Portata: 500 Nm ³ /h	Costruzione a triplo diaframma.
			Pressione di mandata: 1000 bar	Allarme rottura dei dischi.
				Cabinet insonorizzato.
				Raffreddamento ad acqua in circuito chiuso
				Durata dei diaframmi fino a 10000 ore.
				Tutte le parti interne a contatto con il gas sono in acciaio inox.
KOBELCO	Compressori a pistoni oil-free HyAC	Stazioni di rifornimento di media e grande capacità.	Portata: 1200 Nm ³ /h	Raffreddamento ad acqua.
			Pressione di scarico: 875 bar	Basso livello di rumorosità.
				Controllato da inverter.

				Distanza fisica con configurazione a doppia tenuta tra vano motore lubrificato (albero motore) e vano compressione non lubrificato (pistone) con "distanziale".
				La disposizione verticale impedisce gravitazionalmente all'olio di raggiungere lo scomparto del pistone.
LINDE	Compressore ionico da 90 Mpa	Stazioni di rifornimento.	Portata: 60 g/s a 350 bar	Monitoraggio continuo delle perdite del sistema in modalità stand-by
			Portata: 60 g/s a 700 bar	Impulso iniziale e mantenimento, quindi controllo continuo delle perdite del veicolo durante il rifornimento
			Pressione di mandata 350 bar: 439 bar	Numero molto ridotto di parti in movimento
			Pressione di mandata 700 bar: 876 bar	Bassa rumorosità
			Massima pressione di esercizio: 100 bar	Efficienza di conversione energetica vicina al 100%
				Tutti i componenti dell'idrogeno si trovano in un vano a tenuta di gas con sportello di sfianto della sovrappressione
BURCKHARDT COMPRESSION	Compressori a pistoni	Stazioni di rifornimento.	Modello 2C3S Portata: 190 kg/h Pressione di scarico: 450 bar	Compressione ad alta pressione oil-free per soddisfare la massima purezza dell'idrogeno
			Modello 4C3S Portata: 380 kg/h Pressione di scarico: 450 bar	Massima efficienza di compressione del gas
			Modello 3LP250 Portata: 550 kg/h Pressione di scarico: 450 bar	Tempo medio tra le revisioni: 8'000 - 12'000 ore
				Gamma completa di servizi post-vendita
				Rete globale di centri di assistenza locali
SIAD MACCHINE IMPIANTI	Compressori a pistoni	Diverse attività.	Portata: 90000 m ³ /h	Trattamento specifico sulle aste dei pistoni e doppio distanziatore per evitare l'infragilimento da Idrogeno dell'acciaio.
			Pressione di mandata: fino a 600 bar oil-free o lubrificati	Pacchi di tenuta con sistema di recupero gas per evitare dispersioni di Idrogeno.
				Flussaggio del distanziatore e dell'incastellatura con gas inerte.

				Utilizzo di materiali specifici per Idrogeno nella selezione di flange, guarnizioni e tenute.
				Valvole studiate appositamente per utilizzo con Idrogeno.

CAPITOLO 6: TABELLA DELLE STAZIONI DI RIFORNIMENTO DELLA GERMANIA.

Nella tabella sottostante sono state individuate tutte le stazioni di rifornimento per veicoli ad idrogeno operative e pianificate della Germania. Per ogni stazione è stato specificato lo stato (operativo o pianificato), la città di ubicazione della stazione con le relative coordinate e infine sono state specificate le categorie dei veicoli che ogni stazione riesce a soddisfare. Dalla raccolta dei dati sulle categorie dei veicoli che possono effettuare il rifornimento in una di queste stazioni, si può notare che la categoria CAR-CGH2 700 e quella per i Bus-CGH2, sono le più diffuse, per cui è facilmente intuibile che la Germania sta incentivando molto queste categorie. Non si può dire la stessa cosa per quanto riguarda la categoria LH2, essa è molto rara. I brand più diffusi sono Shell, Total, OMV, H2 Mobilty. Le tecnologie, come i compressori, sono fornite perla maggior parte da Linde AG.

Hydrogen	Stato	Germany	Brand	Tec prov	N	E	CAR CGH2 700	CAR CGH2 350	BUS CGH2	CGH2 (ALTRO)	LH2
1	OPERATIVO	Freiburg	Fraunhofer Institute for Solare Energy Systems		48,009588	7,834145	SI	SI		SI	
2	PIANIFICATO	Freiburg	Total		48,030637	7,862640	SI				
3	OPERATIVO	Geisingen	Shell		47,91828	8,66820	SI				
4	OPERATIVO	Irschenberg	OMV		47,82680	11,89797	SI				
5	OPERATIVO	Munich	OMV		48,10277	11,62478	SI				
6	OPERATIVO	Munich	H2 Mobility		48,12144	11,66378	SI				
7	OPERATIVO	Munich	Shell		48,14952	11,52012	SI				
8	OPERATIVO	Munich	Shell		48,16487	11,46435	SI				
9	OPERATIVO	Munich	Total		48,19268	11,56435	SI				
10	OPERATIVO	Unterschleißheim	Linde AG		48,28419	11,57282	SI	SI	SI		SI
11	OPERATIVO	Neufahrn Fürholzen	Tank & Rast		48,33683	11,60802	SI				
12	OPERATIVO	Munich Freising	OMV		48,35949	11,82464	SI				
13	OPERATIVO	Passau	Shell		48,57429	13,41647	SI				
14	PIANIFICATO	Landshut	OMV		48,53985	12,09961	SI		SI		
15	OPERATIVO	Pentling	OMV		48,97284	12,06547	SI				
16	OPERATIVO	Ingolstadt	Total		48,75319	11,45172	SI				
17	OPERATIVO	Friedberg	OMV		48,40682	10,95146	SI				
18	OPERATIVO	Ulm	Total		48,42570	9,96015	SI				
19	OPERATIVO	Metzingen	OMV		48,53247	9,28514	SI				

20	OPERATIVO	Wendlingen	Shell		48,67427	9,37186	SI				
21	OPERATIVO	Stuttgart Echterdingen	OMV		48,69291	9,19992	SI	SI	SI		
22	OPERATIVO	Sindelfingen	Shell		48,70344	9,00507	SI				
23	OPERATIVO	Fellbach	Total		48,82215	9,28542	SI				
24	OPERATIVO	Pforzheim	Shell		48,92072	8,72025	SI				
25	OPERATIVO	Rastatt	Total		48,86373	8,21741	SI				
26	OPERATIVO	Karlsruhe	Total		48,98549	8,4434	SI				
27	OPERATIVO	Eggenstein- Leopoldshafen	KIT-TID		48,09200	8,43121	SI	SI	SI		
28	OPERATIVO	Schnelldorf	OMV		49,17159	10,24195	SI				
29	OPERATIVO	Nürnberg	OMV		49,41082	11,14631	SI				
30	OPERATIVO	Fürth	Shell		49,48069	11,00957	SI				
31	PIANIFICATO	Erlangen	H2 Mobility		49,57150	11,00030	SI				
32	OPERATIVO	Biebelried	Total		49,76697	10,07599	SI				
33	OPERATIVO	Geiselwind	Total		49,76612	10,4702	SI				
34	OPERATIVO	Bayreuth	Shell		49,96304	11,61113	SI				
35	OPERATIVO	Berg	Shell		50,37229	11,78783	SI				
36	OPERATIVO	Bad Rappenau	Air Liquide		49,21265	9,07682	SI				
37	OPERATIVO	Heidelberg	OMV		49,39579	8,66959	SI				
38	OPERATIVO	Hirschberg an der Bergstraße	Total		49,50750	8,63709	SI				
39	OPERATIVO	Weiterstadt	Shell		49,89673	8,61184	SI				
40	OPERATIVO	Wiesbaden	Regional or local authority		50,07044	8,24712			SI		
41	OPERATIVO	Wiesbaden	Shell		50,05695	8,33964	SI				
42	OPERATIVO	Frankfurt	Agip		50,08061	8,54508	SI		SI		
43	OPERATIVO	Frankfurt am Main	Shell		50,08864	8,63538	SI				
44	OPERATIVO	Offenbach	Air Liquide		50,10532	8,73582	SI	SI			
45	OPERATIVO	Frankfurt	Shell		50,12287	8,74156	SI				
46	OPERATIVO	Hanau	Regional or local authority		50,11901	8,9655	SI				
47	OPERATIVO	Bad Homburg	H2 Mobility		50,21062	8,65709	SI				
48	OPERATIVO	Limburg	Air Liquide		50,38051	8,09348	SI				
49	OPERATIVO	Koblenz	Air Liquide		50,34720	7,50720	SI	SI			
50	OPERATIVO	Saarbrücken	Total		49,23649	6,94242	SI				
51	PIANIFICATO	Saarbrücken	Regional or local authority		49,24540	6,93981	SI				
52	OPERATIVO	Siegen	H2 Mobility		50,84903	8,03942	SI				
53	PIANIFICATO	Kirchheim	H2 Mobility		50,83450	9,57436	SI				
54	OPERATIVO	Erfurt	Total		50,94920	11,09323	SI				
55	OPERATIVO	Meerane	Shell		50,84249	12,44556	SI				
56	OPERATIVO	Dresden	Fraunhofer institute for transporation and infrastructure system		51,02120	13,79202				SI	
57	OPERATIVO	Dresden	Total		51,03627	13,74794	SI				
58	OPERATIVO	Meckenheim	Regional or local		50,62760	7,01073			SI		

			authority							
59	OPERATIVO	Bonn	Shell		50,72616	7,06712	SI			
60	PIANIFICATO	Wesseling	Shell		50,81151	6,99131	SI			
61	OPERATIVO	Aachen	Shell		50,79770	6,10923	SI	SI		
62	PIANIFICATO	Düren	Shell		50,83386	6,45976	SI		SI	
63	OPERATIVO	Hürth	Air Products		50,86373	6,87127		SI	SI	
64	OPERATIVO	Cologne	Total		50,88200	7,11337	SI		SI	
65	OPERATIVO	Frechen	Air Liquide		50,91479	6,83539	SI	SI	SI	
66	OPERATIVO	Leverkusen	Shell		51,02352	7,00076	SI			
67	OPERATIVO	Wermelskirchen	Regional or local authority		51,13007	7,20113			SI	
68	OPERATIVO	Mönchengladbach	Shell		51,15923	6,44651	SI			
69	OPERATIVO	Düsseldorf	Air Liquide		51,18841	6,84116	SI	SI	SI	
70	OPERATIVO	Wuppertal	Regional or local authority		51,22573	7,14377			SI	
71	PIANIFICATO	Düsseldorf	Air Liquide		51,22201	6,82023	SI			
72	OPERATIVO	Ratingen	Shell		51,25517	6,91531	SI			
73	OPERATIVO	Wuppertal	Shell		51,30800	7,25229	SI			
74	OPERATIVO	Duisburg	Total		51,43805	6,73856	SI			
75	PIANIFICATO	Mülheim	Regional or local authority		51,42764	6,86749			SI	
76	OPERATIVO	Mülheim an der Ruhr	H2 Mobility		51,43978	6,95484	SI			
77	PIANIFICATO	Essen	Regional or local authority		51,43112	7,05405			SI	
78	OPERATIVO	Essen	Shell		51,50314	7,04916	SI			
79	OPERATIVO	Herten	H2 Mobility		51,57347	7,14794	SI			
80	PIANIFICATO	Herten	Regional or local authority		51,55600	7,16894	SI	SI	SI	
81	OPERATIVO	Dortmund	Shell		51,51867	7,45332	SI			
82	OPERATIVO	Kamen	AVIA		51,56984	7,67654	SI			
83	OPERATIVO	Münster	Westfalen AG		51,89272	7,5844	SI	SI	SI	
84	OPERATIVO	Hasbergen	Total		52,26571	7,96397	SI			
85	PIANIFICATO	Bielefeld	Regional or local authority		52,04258	8,60556			SI	
86	OPERATIVO	Rheda-Wiedenbrück	Shell		51,84892	8,32345	SI			
87	OPERATIVO	Lohfelden	Shell		51,27158	9,52514	SI			
88	OPERATIVO	Halle	H2 Mobility		51,48950	11,94258	SI			
89	OPERATIVO	Leipzig	Total		51,41306	12,3083	SI			
90	OPERATIVO	Hannover	Linde AG		52,42139	9,72034	SI			
91	OPERATIVO	Laatzten	Shell		52,31767	9,79756	SI			
92	OPERATIVO	Braunschweig	Shell		52,28821	10,51939	SI			
93	OPERATIVO	Wolfsburg	H2 Mobility		52,44076	10,80759	SI			
94	OPERATIVO	Magdeburg	Total		52,21133	11,67009	SI			
95	PIANIFICATO	Bremerhaven	Shell		53,49697	8,62486	SI			
96	PIANIFICATO	Oldenburg	Shell		53,12218	8,21759	SI			

97	OPERATIVO	Stuhr	Shell		53,01209	8,70405	SI				
98	OPERATIVO	Bremen	Shell		53,05757	8,96214	SI				
99	OPERATIVO	Potsdam	Total		52,38257	13,08828	SI				
100	PIANIFICATO	Berlin - Schönefeld	Total		52,37012	13,5268	SI	SI	SI		
101	PIANIFICATO	Berlin	Shell		52,45066	13,43465	SI		SI		
102	OPERATIVO	Berlin	Shell		52,47856	13,35486	SI	SI	SI		
103	PIANIFICATO	Berlin	Shell		52,48092	13,50216	SI				
104	OPERATIVO	Berlin	Total		52,50830	13,26059	SI				
105	OPERATIVO	Berlin	Total		52,51103	13,42913	SI				
106	OPERATIVO	Berlin	Total		52,53418	13,36513	SI				
107	OPERATIVO	Berlin	Shell		52,57174	13,42949	SI				
108	OPERATIVO	Neuruppin	Total		52,90597	12,74993	SI				
109	OPERATIVO	Hagenow	Shell		53,44334	11,21261	SI				
110	OPERATIVO	Hamburg	Shell		53,46124	10,011	SI				
111	OPERATIVO	Hamburg	Vattenfall		53,54597	10,00276	SI	SI	SI		
112	OPERATIVO	Hamburg	Shell		53,57358	9,91921	SI				
113	OPERATIVO	Hamburg	Shell		53,62164	9,99944	SI				
114	OPERATIVO	Hamburg	Shell		53,62199	10,08332	SI				
115	OPERATIVO	Brunsbüttel	H2 Mobility		53,90776	9,21392	SI				
116	PIANIFICATO	Laage	APEX Energy Teterow GmbH		53,90511	12,28449	SI		SI		
117	OPERATIVO	Rostock	Total		54,08080	12,18921	SI				
118	OPERATIVO	Stralsund	Regional or local authority		54,33874	13,07343				SI	
119	PIANIFICATO	Husum	Regional or local authority		54,49437	9,08143	SI		SI		
120	OPERATIVO	Niebüll	Regional or local authority		54,78255	8,85119	SI		SI		
121	OPERATIVO	Flensburg	Shell		54,77791	9,32521	SI				
122	PIANIFICATO	Westre	Regional or local authority		54,88520	8,97602	SI				

CONCLUSIONI

Le ricerche fatte in questa tesi hanno dimostrato che ci sono più tipi di compressori in commercio con dati tecnici e caratteristiche tecniche diverse. I compressori ricoprono un ruolo molto rilevante nelle stazioni di rifornimento per veicoli ad idrogeno e per l'accumulo nelle reti di distribuzione. Le sfide più grandi nel futuro saranno quelle di saper gestire grandi pressioni e saper lavorare con temperature critiche. L'idrogeno può essere prodotto a impatto nullo per l'ambiente, potrebbe sostituire completamente o una buona parte dei combustibili fossili, permettendo una riduzione col tempo dell'emissione dei gas serra. Sfortunatamente per quanto riguarda l'utilizzo di idrogeno su larga scala, sono ancora pochi i paesi che stanno puntando fortemente su questo tipo di combustibile e quindi gli obiettivi raggiunti sono ancora troppo bassi.

SITOGRAFIA

<https://www.focus.it/scienza/energia/idrogeno-come-si-fa>

<http://www.eniscuola.net/argomento/idrogeno/accumulo-e-trasporto/la-distribuzione/>

<https://meethydrogen.com/resource/aqueductus-the-first-green-hydrogen-pipeline?fbclid=IwAR3BJQ->

[Gc_9FfmfwjrQa5TxFgSior6CMZXYHQ05PxUDnrs1kn7aljdYTi2g](https://meethydrogen.com/resource/aqueductus-the-first-green-hydrogen-pipeline?fbclid=IwAR3BJQ-Gc_9FfmfwjrQa5TxFgSior6CMZXYHQ05PxUDnrs1kn7aljdYTi2g)

<https://www.formulapassion.it/automoto/ambiente/idrogeno-richiesta-di-blending-alla-commissione-ue-556296.html>

https://www.snam.it/it/media/news_eventi/2020/Snam_immissione_sperimentale_idrogeno_Contursi_raddoppiata.html

<https://www.snam.it/it/media/comunicati>

[stampa/2019/Snam_prima_volta_Europa_fornitura_idrogeno_misto_gas_naturale.html](https://www.snam.it/it/media/comunicati stampa/2019/Snam_prima_volta_Europa_fornitura_idrogeno_misto_gas_naturale.html)

<https://www.ilsole24ore.com/art/verde-blu-grigio-tutte-sfumature-dell-idrogeno-ADBOqa4>

<https://www.h2stations.org/stations-map/?lat=49.139384&lng=11.190114&zoom=2>

<https://www.bmw.com/it/innovation/come-funzionano-le-auto-a-idrogeno.html>

<https://www.economia-italia.com/auto-a-idrogeno>

http://www.eniscuola.net/wp-content/uploads/2011/02/pdf_idrogeno_2.pdf

<https://www.vivigreen.eu/blog/idrogeno-stazioni-di-servizio/>

<https://www.netinbag.com/it/manufacturing/what-is-a-hydrogen-compressor.html>

https://www.wikizero.com/it/Compressore_per_idrogeno

https://it.wikicore.net/wiki/Ionic_liquid_piston_compressor

<https://www.snowviewfarm.com/che-cosa-e-un-compressore-di-idrogeno/>

https://it.wikicore.net/wiki/Linear_compressor

https://en.wikipedia.org/wiki/Hydride_compressor#cite_note-1

https://en.wikipedia.org/wiki/Electrochemical_hydrogen_compressor