



European Train the Trainer Programme for Responders

Lezione 12

Stazioni di rifornimento e infrastruttura dell'idrogeno

LIVELLO I

Vigile del fuoco

Le informazioni contenute in questa lezione sono rivolte al livello **Vigile del Fuoco** e successivi.

Questa lezione è adatta anche per i livelli II (Capo Squadra) - IV (Specialista).

La lezione fa parte del materiale didattico per i livelli I – IV : Vigile del Fuoco, Capo Squadra, Funzionario di Guardia e Specialista. L'introduzione della lezione riporta le competenze e aspettative di apprendimento

Nota: il materiale è proprietà del Consorzio HyResponder e dovrebbe essere riconosciuto conformemente.



Dichiarazione di limitazione di responsabilità

Nonostante l'attenzione prestata durante la preparazione di questo documento, si applica la seguente dichiarazione di limitazione delle responsabilità: le informazioni in questo documento vengono fornite così come sono e non viene fornita alcuna garanzia che le informazioni siano adatte ad uno scopo particolare. L'utente utilizza le informazioni a suo esclusivo rischio e responsabilità.

Il documento riflette solo le opinioni degli autori. La FCH JU e l'Unione Europea non sono responsabili per qualsiasi uso che possa essere fatto delle informazioni ivi contenute.

Disclaimer

Despite the care that was taken while preparing this document the following disclaimer applies: the information in this document is provided as is and no guarantee or warranty is given that the information is fit for any particular purpose. The user thereof employs the information at his/her sole risk and liability.

The document reflects only the authors' views. The FCH JU and the European Union are not liable for any use that may be made of the information contained therein.

Ringraziamenti

Il progetto è stato finanziato dal Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (JU) con il grant agreement N. 875089. Il JU riceve supporto dal programma di ricerca ed innovazione European Union's Horizon 2020 ed il Regno Unito, Francia, Austria, Belgio, Spagna, Germania, Italia, Repubblica Ceca, Svizzera, Norvegia.

Acknowledgements

This project has received funding from the Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (now Clean Hydrogen Partnership) under Grant Agreement No 875089. This Joint Undertaking receives support from the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation program, Hydrogen Europe and Hydrogen Europe Research.

Sommario

Questa lezione presenta la descrizione delle stazioni di rifornimento con stoccaggio di idrogeno liquido (LHRS) e gassoso (GHRS), e delle infrastrutture associate alla mobilità ad idrogeno. Nella descrizione sono incorporati gli elementi principali della catena di approvvigionamento dell'idrogeno liquido dalla produzione di idrogeno all'utente finale, per una buona comprensione del funzionamento delle LHRS. Vengono descritte le sfide nell'utilizzo dell'idrogeno liquido e i potenziali rischi.

Keywords

Idrogeno liquido e gassoso, stazione di rifornimento, condizioni criogeniche, processo, caratteristiche di sicurezza.

Indice

Sommario	3
Keywords.....	3
1. Target audience.....	5
1.1 Descrizione del ruolo: Vigile del Fuoco	5
1.2 Livello di competenza: Vigile del Fuoco.....	5
1.3 Prerequisiti per l'apprendimento: Vigile del Fuoco.....	5
2. Introduzione ed obiettivi	5
3. Introduzione alle stazioni di rifornimento	7
3.1 Stazione di rifornimento di idrogeno gassoso (GHRs)	7
3.2 Stazione di rifornimento ad idrogeno liquido (LHRs)	8
3.3 Confronto tra le stazioni di rifornimento con stoccaggio di idrogeno liquido e compresso	9
3.4 Stazione di rifornimento con stoccaggio di idrogeno gassoso - attrezzatura.....	11
3.4.1 Serbatoi di stoccaggio buffer di idrogeno gassoso	11
3.4.2 Compressore di idrogeno	12
3.4.3 Dispositivo di preraffreddamento	13
3.4.4 Erogatore dell'idrogeno - dispenser.....	17
3.5 Stazione di rifornimento con stoccaggio di idrogeno liquido – attrezzatura	19
3.5.1 Stoccaggio dell'idrogeno liquido.....	21
3.5.2 Pompa criogenica.....	23
3.5.3 Vaporizzatore LH ₂	25
3.5.4 Pannello valvole.....	27
3.5.5 Buffers gassosi.....	28
3.5.6 Connessione al dispenser	28
3.5.7 Dispenser.....	29
4. Produzione	31
4.1 Steam reforming del metano	31
4.2 Elettrolizzatore.....	32
4.3 Liquefazione	34
5. Pipelines	36
6. Caratteristiche di sicurezza delle HRS e altre infrastrutture.....	37
Ringraziamenti.....	40
Bibliografia.....	40

1. Target audience

Le informazioni contenute in questa lezione sono indirizzate al Livello 1: Vigile del Fuoco. Le lezioni sono anche disponibili per i livelli II, III e IV: Capo Squadra, Funzionario di Guardia e Specialista.

La descrizione del ruolo, livello di competenza e aspettative di apprendimento per il Vigile del Fuoco sono descritte di seguito.

1.1 Descrizione del ruolo: Vigile del Fuoco

Un vigile del fuoco si occupa e dovrebbe essere in grado di eseguire operazioni in sicurezza con dispositivi di protezione individuale (PPE), compresi i respiratori (BA), utilizzando le attrezzature fornite, come veicoli, scale, manichette, estintori, strumenti di comunicazione e di soccorso, in qualsiasi condizione climatica in aree e situazioni di emergenza che ci si può realisticamente aspettare.

1.2 Livello di competenza: Vigile del Fuoco

Formazione nell'uso sicuro e corretto di PPE, BA e altre attrezzature che si prevede saranno utilizzate durante le operazioni di primo intervento. I soccorritori devono essere supportati da conoscenze e pratiche adeguate. I comportamenti che proteggeranno loro e gli altri colleghi dovrebbero essere descritti dalle procedure operative standard (SOP). È richiesta la capacità pratica di valutare dinamicamente il rischio per la propria sicurezza e degli altri.

1.3 Prerequisiti per l'apprendimento: Vigile del Fuoco

EQF 2 Conoscenza concreta di base del campo di lavoro o di studio. Abilità cognitive e pratiche di base necessarie per l'utilizzo di informazioni rilevanti al fine di svolgere compiti e risolvere problemi di routine utilizzando regole e strumenti semplici. Lavorare o studiare sotto supervisione con una certa autonomia.

2. Introduzione ed obiettivi

L'obiettivo della lezione è presentare le caratteristiche principali della stazione di rifornimento di idrogeno gassoso (GHRS), della stazione di rifornimento basata sullo stoccaggio di idrogeno liquido (LHRS) e dell'infrastruttura associata per la mobilità ad idrogeno. In questa lezione viene effettuato un confronto tra GHRS e LHRS e vengono descritti i componenti delle LHRS per una buona comprensione del funzionamento, delle sfide e dei potenziali rischi associati.

La prima domanda prima di introdurre le LHRS potrebbe essere “perché usare l'idrogeno liquido?”. Le HRS attuali hanno mostrato i seguenti principali punti deboli:

- catena di approvvigionamento costosa considerando l'idrogeno gassoso su larga scala,
- capacità giornaliera limitata.

Dato che l'LH₂ è molto più denso del GH₂, è interessante sviluppare nuove tecnologie per aumentare la capacità della stazione e ridurre il TCO (costo totale di proprietà) utilizzando

Lezione 12: Stazioni di rifornimento e infrastruttura dell'idrogeno

l'idrogeno liquido come materia prima. La Figura 1 mostra i diversi elementi della filiera dell'idrogeno – liquido e gassoso – dalla produzione all'utilizzo per la mobilità dell'idrogeno.

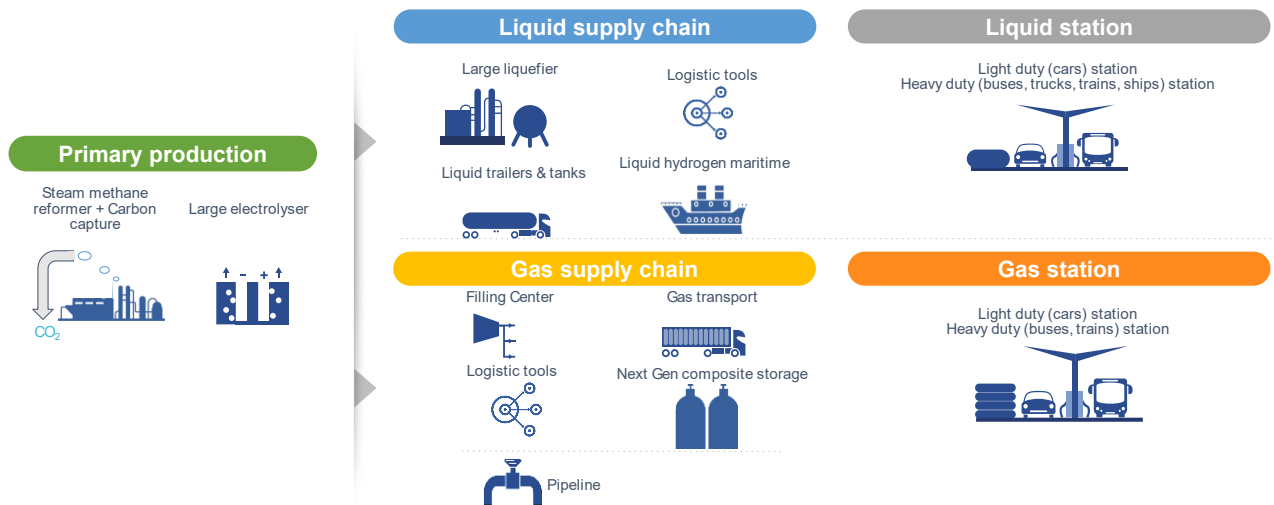


Figura 1. Filiera dell'idrogeno, dalla produzione all'utilizzo per la mobilità H₂. Nota: Produzione primaria: steam reformer a metano + cattura CO₂, elettrolizzatore su larga scala; Filiera dell'idrogeno liquido: impianto di liquefazione su larga scala, strumenti logistici, trasporto di LH₂ con trailer e serbatoi, trasporto di LH₂ marittimo; Stazione di rifornimento con LH₂: veicoli leggeri (auto), veicoli pesanti (bus, camion, treni, navi); Filiera dell'idrogeno gassoso: centro di rifornimento, trasporto del gas, strumenti logistici, serbatoi in compositi di nuova generazione, pipeline; stazione di rifornimento di GH₂: veicoli leggeri (auto), veicoli pesanti (bus, treni).

La Figura 2 è uno schema semplificato della catena di approvvigionamento dell'idrogeno liquido, che mostra che dopo la produzione di idrogeno è necessario un impianto di liquefazione (*H₂ liquefier*) per liquefare l'idrogeno a temperatura criogenica. Quindi i trailer LH₂ (*LH₂ trucks* con una capacità fino a 4-t H₂) si occupano del trasporto dell'idrogeno all'LHRS, dove il trasferimento dal trailer allo stoccaggio LHRS viene eseguito utilizzando un piccolo vaporizzatore. I dettagli di questi diversi passaggi e le attrezzature necessarie sono l'argomento di questa lezione.

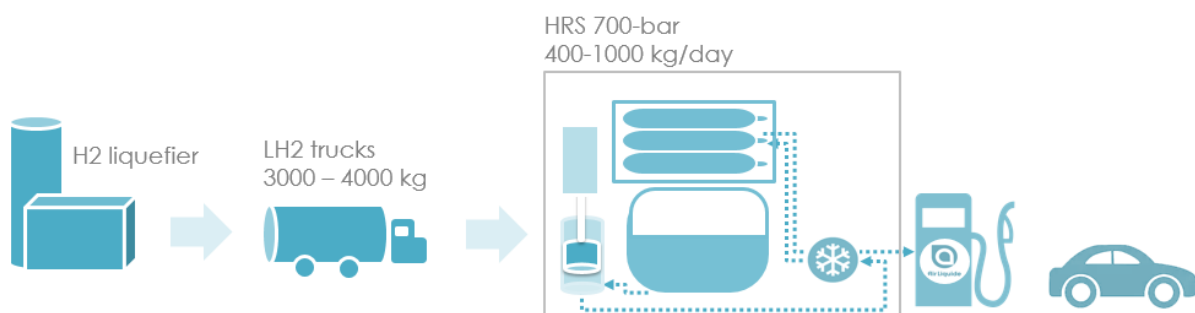


Figura 2. Focus sulla fornitura di idrogeno liquido per le stazioni di rifornimento di idrogeno.

Alla fine di questa lezione, i vigili del fuoco/trainers saranno a conoscenza di:

- filiera dell'idrogeno – dalla produzione all'uso dell'idrogeno,
- layout e funzionamento di GHRS e LHRS,

Lezione 12: Stazioni di rifornimento e infrastruttura dell'idrogeno

- l'attrezzatura richiesta per le GHRS e LHRS,
- i metodi di produzione dell'idrogeno,
- caratteristiche di sicurezza nelle GHRS, LHRS e altre infrastrutture.

3. Introduzione alle stazioni di rifornimento

3.1 Stazione di rifornimento di idrogeno gassoso (GHRS)

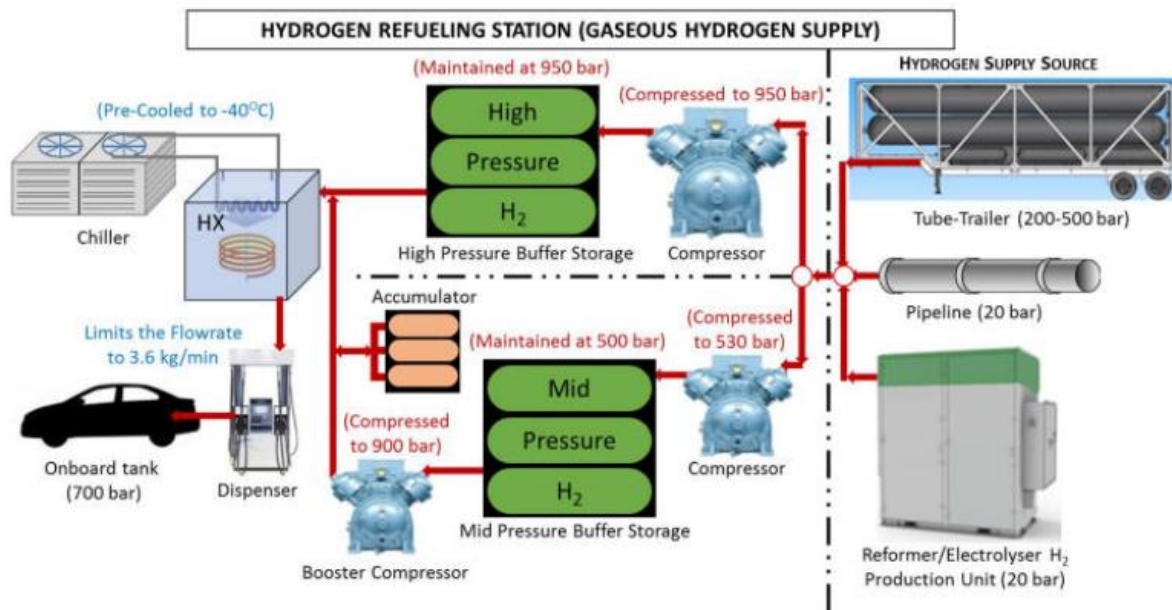


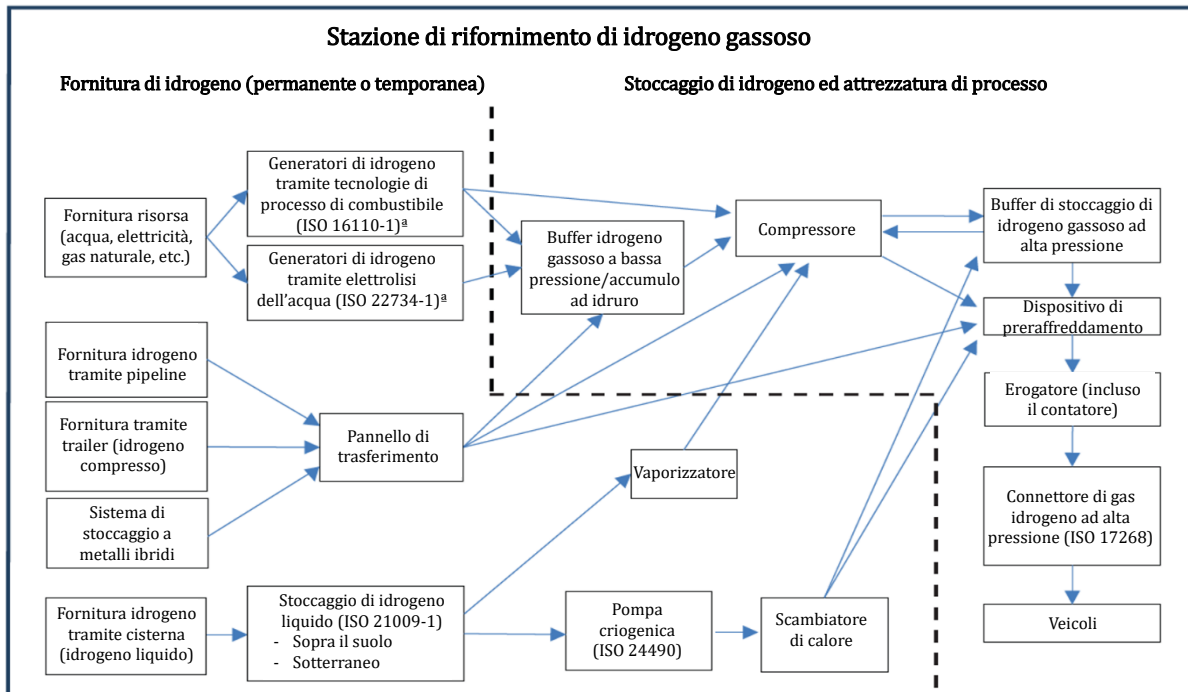
Figura 3. Esempio di stazione di rifornimento di idrogeno gassoso (GHRS) [1].

Generalmente, il percorso dell'idrogeno gassoso dalla fornitura (*hydrogen supply source*) al serbatoio a bordo del veicolo (*onboard tank*) segue un processo di compressione (*compressor*) per raggiungere 950 bar in un serbatoio di accumulo ad alta pressione (*high pressure buffer storage*) o 500 bar in un serbatoio di accumulo di media pressione (*mid pressure buffer storage*), quindi passa per uno scambiatore di calore e raggiunge l'erogatore (*dispenser*) per il rifornimento dei veicoli a celle a combustibile (FCV). Come mostrato nella Figura 3, una tipica GHRS include serbatoi di stoccaggio di idrogeno gassoso, compressori di idrogeno, dispositivi di preraffreddamento e un erogatore di idrogeno. I requisiti minimi di progettazione, installazione, messa in servizio, funzionamento, ispezione e manutenzione, per la sicurezza e, se del caso, per le prestazioni delle stazioni di rifornimento di idrogeno gassoso pubbliche e non pubbliche (GHRS) che erogano idrogeno gassoso ai veicoli stradali leggeri (ad esempio FCV) sono discussi nella ISO 19880-1:200 (E) [2], in cui sono forniti i requisiti minimi per le GHRS. Molti dei requisiti generici sono applicabili alle stazioni di rifornimento per altre applicazioni dell'idrogeno, inclusi ma non limitati a quanto segue:

- Stazioni di rifornimento per moto, carrelli elevatori, tram, treni, applicazioni fluviali e marittime;
- Stazioni di rifornimento con erogazione in ambienti interni;

Lezione 12: Stazioni di rifornimento e infrastruttura dell'idrogeno

- Applicazioni residenziali per l'alimentazione di veicoli terrestri;
- Stazioni di rifornimento mobili; e
- Stazioni di rifornimento dimostrative non pubbliche.



a - includere un recipiente *buffer* (di tamponamento o accumulatore) per smorzare o regolare il flusso all'ingresso di aspirazione del compressore.

Figura 4. Esempio di elementi tipici di una stazione di rifornimento inclusa la fornitura di idrogeno. Traduzione da [2].

Questa lezione si concentra sullo stoccaggio dell'idrogeno e sulle apparecchiature di processo (lato destro della linea tratteggiata nella Figura 4), compreso l'immagazzinamento buffer/idruro di idrogeno gassoso a bassa e alta pressione, compressore, dispositivo di preraffreddamento, erogatore (incluso il contatore), connettore e veicoli per il rifornimento di idrogeno gassoso ad alta pressione. La guida al connettore per il rifornimento di idrogeno gassoso ad alta pressione può essere trovata nella norma ISO 17268.

3.2 Stazione di rifornimento ad idrogeno liquido (LHRS)

Prima di presentare più in dettaglio quali sono i principali componenti di una stazione di rifornimento basata sullo stoccaggio di idrogeno liquido, è interessante osservare una stazione esistente in operazione. La Figura 5 mostra la stazione di rifornimento di idrogeno liquido Linde installata a Oakland (USA).

Lezione 12: Stazioni di rifornimento e infrastruttura dell'idrogeno

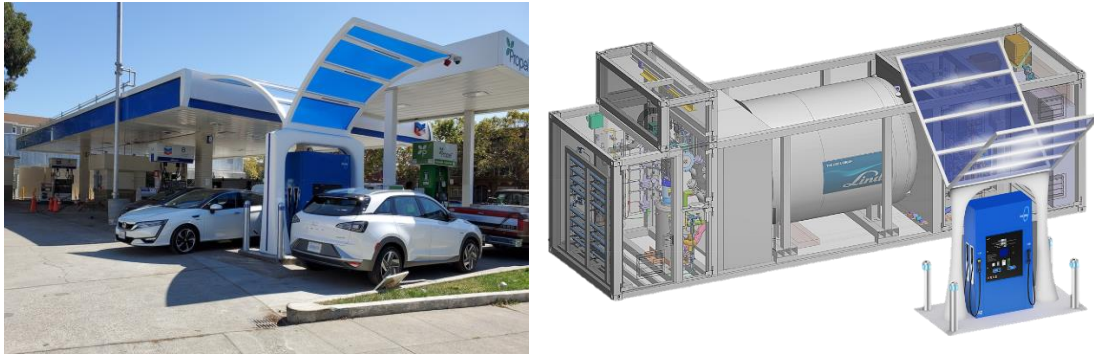


Figura 5. LHRs Linde ad Oakland.

Il layout è presentato in Figura 6, al fine di valutare l'impatto di tale installazione.

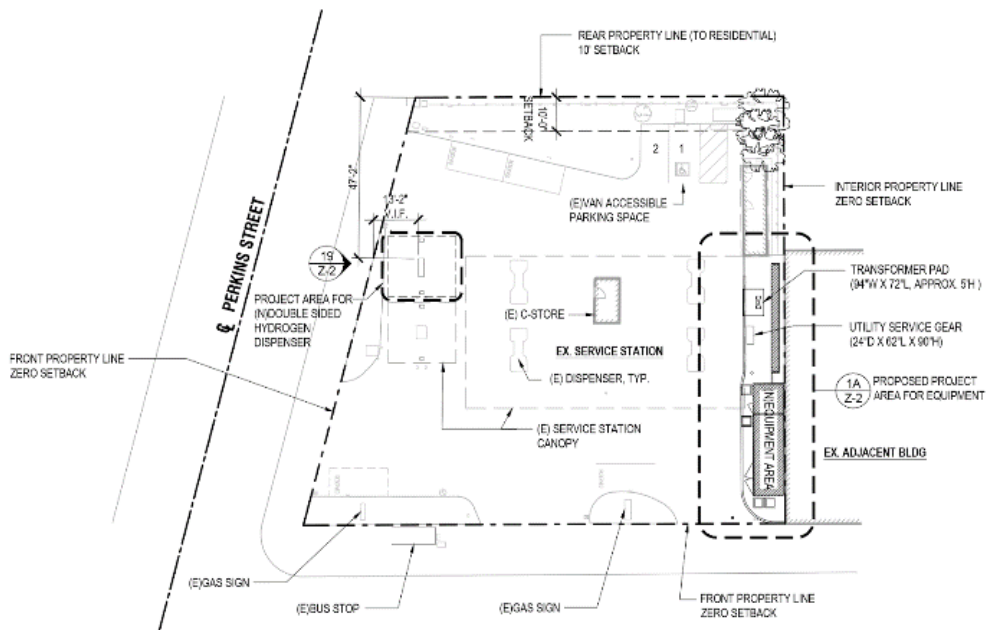


Figura 6. Layout della LHRs Linde.

3.3 Confronto tra le stazioni di rifornimento con stoccaggio di idrogeno liquido e compresso

In sostanza, una stazione di rifornimento basata su LH₂ è composta da:

- un serbatoio di LH₂ (circa 20 m³ - 1000 kg-H₂) con pressione massima di esercizio di 10,3 bar (*low pressure storage*),
- una linea di processo coibentata dal fondo del serbatoio alla pompa LH₂ (*HP cryo-pump*) che trasporta l'LH₂ dal serbatoio di stoccaggio ad un vaporizzatore (VAP); questo dispositivo permette di pompare LH₂ fino a 1000 bar,
- un riscaldatore (*VAP exchanger*: olio caldo, elettrico per riscaldare l'idrogeno a 1000 bar),
- Separatore “*buffer*” gassoso a 1000 bar (pochi m³); i *buffer* sono generalmente gruppi di contenitori di tipo I o II (cioè cilindri metallici o tubi metallici lunghi).

Lezione 12: Stazioni di rifornimento e infrastruttura dell'idrogeno

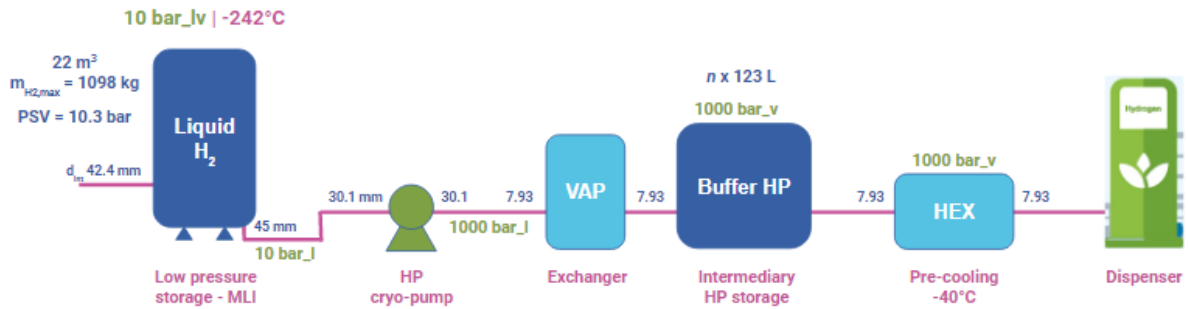


Figura 7. Schema semplificato di una stazione di rifornimento con stoccaggio di idrogeno liquido.

Nota - *Intermediary HP storage*: contenimento intermedio; *pre-cooling*: preraffreddamento; *dispenser*: erogatore.

Tutte le altre parti (es. dispenser, tubo di rifornimento, ecc.) della stazione di rifornimento sono simili alla classica stazione di rifornimento con idrogeno gas compresso (vedi confronto in Figura 8).

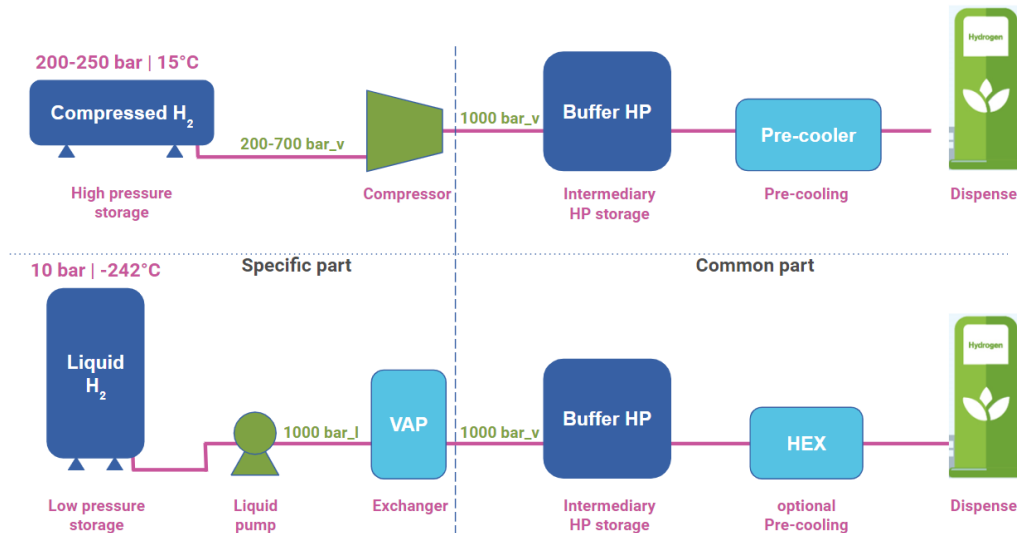


Figura 8. Confronto tra stazioni di rifornimento con stoccaggio di idrogeno gassoso (in alto) e liquido (in basso).

La tabella di seguito riassume le principali differenze tra LHRS e HRS.

Tabella 1. Confronto tra LHRS e HRS.

Oggetto	LHRS	HRS
Stoccaggio	Idrogeno liquido, temperatura criogenica (-240°C), bassa pressione (fino a 10 bar)	Idrogeno gassoso, temperatura ambiente, alta pressione (da 200 a 500 bar)
Rifornimento della stazione	Trasferimento dell'idrogeno liquido dal trailer al sistema di accumulo	Principalmente scambio (= pieno per vuoto)

Pressurizzazione dell'idrogeno	Pompa di liquido (<i>liquid pump</i>) e vaporizzatore (<i>vaporizer</i>) richiesto per la fornitura di H ₂ gassoso	Compressore (<i>compressor</i>)
--------------------------------	---	-----------------------------------

3.4 Stazione di rifornimento con stoccaggio di idrogeno gassoso - attrezzatura

3.4.1 Serbatoi di stoccaggio buffer di idrogeno gassoso

I serbatoi di accumulo *buffer*, ossia di “tamponamento”, che siano ad alta o a bassa pressione, sono progettati allo scopo di immagazzinare l'idrogeno compresso. Il sistema può essere posizionato tra un generatore di idrogeno e un compressore per mantenere un flusso uniforme di gas al compressore o tra il compressore e il sistema di erogazione per l'accumulo di gas in pressione per il rifornimento dei veicoli.

I recipienti di stoccaggio per l'idrogeno gassoso dovrebbero essere fabbricati in conformità con uno standard nazionale/regionale comunemente usato e progettati per il ciclo di vita previsto. Lo stoccaggio buffer può includere idrogeno assorbito in un sistema di stoccaggio a idruri metallici.

Se sono interconnessi serbatoi di stoccaggio buffer con pressioni nominali diverse, questi devono essere protetti in modo tale che i serbatoi tarati per una bassa pressione non possano essere sovra-pressurizzati a causa di eventuali malfunzionamenti.

La progettazione dell'impianto di stoccaggio buffer deve includere mezzi adeguati a prevenire rotture in caso di incendio se ritenuto necessario dalla valutazione del rischio. I metodi di prevenzione idonei possono includere uno o più dei seguenti:

- Sistemi di sfiato del gas, come i TPRD;
- Schermatura termica o barriera al fuoco;
- Impossibilità per un liquido infiammabile di accumularsi sotto il serbatoio;
- Protezione fissa antincendio con acqua.

Vale la pena notare che i serbatoi di stoccaggio compositi possono richiedere una protezione maggiore rispetto ai serbatoi metallici. I serbatoi devono essere fissati alla base, che insieme ai supporti deve essere in grado di resistere alle forze che possono essere previste per tale posizionamento. La progettazione del layout dei serbatoi di stoccaggio dell'idrogeno gassoso e delle tubazioni deve considerare il rischio di impatto diretto di jet fires da potenziali punti di perdita o sfiati su un serbatoio adiacente. La valutazione del rischio della stazione deve includere considerazioni di mitigazione sulla transizione da deflagrazione a detonazione (DDT) nell'area dell'idrogeno compresso. Ciascun gruppo di serbatoi di stoccaggio buffer che possono essere isolati con valvole manuali o automatiche, dovrebbe essere dotato di un proprio set di dispositivi di sicurezza.

Lezione 12: Stazioni di rifornimento e infrastruttura dell'idrogeno

Si noti che quando l'idrogeno viene consegnato in bombole trasportabili, trailer tubolari o contenitori per gas a elementi multipli (MEGC)¹, i dispositivi di sicurezza all'interno della bombola/gruppo di contenitori non sono sempre inclusi. Tuttavia, quando le bombole trasportabili, trailer tubolari o MEGC sono incorporati in una stazione di rifornimento, a seguito di un'adeguata valutazione del rischio che affronti le considerazioni di progettazione potenzialmente diverse, in particolare il ciclo di pressione, qualsiasi sistema di compressione dell'idrogeno in loco dovrebbe includere un serie di dispositivi di sicurezza per proteggere i tubi di stoccaggio dalla sovra-pressurizzazione.

3.4.2 Compressore di idrogeno

Ciascun compressore deve essere dotato di dispositivi di sfogo della pressione o di sistemi di sicurezza equivalenti per prevenire la sovrappressione. Il compressore e i sistemi ausiliari, ove applicabile, devono essere coerenti con l'uso nel sistema di tubazioni. Dovrebbe essere fornita una compensazione sufficiente per potenziali vibrazioni o movimenti del compressore in modo tale che i sistemi di tubazioni non vengano danneggiati e che non si verifichino perdite. Eventuali vibrazioni che possono influire sulla resistenza delle tubazioni, dei raccordi e dei componenti non devono essere trasferite alle tubazioni. I compressori dovrebbero essere progettati con particolare riferimento all'uso con idrogeno e per ridurre al minimo l'introduzione di contaminanti. L'ingresso di aria all'aspirazione del compressore deve essere sempre evitato per prevenire la formazione di miscele infiammabili. Devono essere valutati i rischi associati all'installazione, alla manutenzione e al funzionamento dei compressori e devono essere definite e implementate contromisure per proteggere le apparecchiature e prevenire il verificarsi di eventi potenzialmente pericolosi. Ciascun compressore deve essere dotato di mezzi per depressurizzare completamente tutte le parti del sistema per scopi di manutenzione. Quando la revisione per l'attenuazione del rischio di un sistema di compressione raccomanda l'uso di uno spurgo inerte, devono essere forniti i mezzi per spurgare il compressore con gas inerte prima delle operazioni di manutenzione, inclusa una procedura scritta, per consentire un'inertizzazione efficace.

Devono essere installati dei controlli di sicurezza per garantire che i livelli di temperatura e pressione non superino o scendano al di sotto dei livelli operativi impostati, ad esempio per la pressione di ingresso, la temperatura e la pressione di scarico, con il sistema di controllo che attiva un allarme e/o l'arresto se necessario, o misure alternative appropriate. Oltre agli strumenti e ai controlli normalmente previsti per i sistemi di compressione del gas, dovrebbero essere considerate le seguenti precauzioni specifiche per l'idrogeno.

Evitare sempre l'ingresso di aria all'ingresso del compressore per prevenire la formazione di una miscela infiammabile. Se questa condizione non è più garantita, il compressore deve essere

¹ assemblaggio multimodale di bombole, tubi o gruppi di bombole che sono interconnessi da un collettore e assemblati all'interno di un'intelaiatura, comprese le attrezzature di servizio e le attrezzature strutturali necessarie per il trasporto dei gas.

Lezione 12: Stazioni di rifornimento e infrastruttura dell'idrogeno

spento. Ad esempio, la pressione di ingresso dovrebbe essere monitorata da un indicatore/interruttore di pressione, con il sistema di controllo che attiva un allarme e/o un arresto a seconda dei casi, per evitare un vuoto nella linea di ingresso e il conseguente ingresso di aria. Questo indicatore/interruttore di pressione dovrebbe far spegnere il compressore prima che la pressione di ingresso raggiunga la pressione atmosferica.

Se esiste la possibilità di contaminazione da ossigeno in condizioni operative normali a causa di una bassa pressione di ingresso, la misurazione del contenuto di ossigeno nell'idrogeno può essere considerata una misura di mitigazione durante la valutazione del rischio. Ad esempio, se il contenuto di ossigeno raggiunge una frazione di volume dell'1%, il compressore può essere spento automaticamente. Possono essere adottati mezzi alternativi per prevenire situazioni critiche.

La temperatura dopo la fase finale di compressione, o la temperatura dopo il refrigeratore, se presente, deve essere monitorata da un indicatore/interruttore di temperatura con il sistema di controllo che attiva un allarme e/o un arresto a seconda dei casi a una temperatura massima predeterminata.

La pressione dopo la fase finale di compressione deve essere monitorata da un indicatore/interruttore con il sistema di controllo che attiva un allarme e/o un arresto a seconda dei casi, o avvia azioni alternative, come il riciclaggio, a una pressione massima predeterminata inferiore a quella della protezione da sovrappressione.

Il sistema dell'acqua di raffreddamento deve essere monitorato da un indicatore/interruttore, con il sistema di controllo che attiva un allarme e/o un arresto a seconda dei casi in caso di bassa pressione, flusso o alta temperatura.

Laddove il motore e l'attrezzatura ausiliaria siano spurgati da un gas inerte, o protetti da pressurizzazione con aria compressa o gas inerte, la bassa pressione/flusso deve essere indicata da un allarme, che deve essere predisposto per spegnere il motore e gli ausiliari come richiesto dall'IEC 60079-2.

Quando il carter del compressore è spurgato da un gas inerte o protetto da pressurizzazione con aria compressa o gas inerte, la bassa pressione/portata deve essere indicata da un allarme, che deve essere predisposto per spegnere il compressore.

3.4.3 Dispositivo di preraffreddamento

Il preraffreddamento è un processo di abbassamento della temperatura dell'idrogeno prima dell'erogazione. Il costo dell'unità di preraffreddamento costituisce circa il 10% del costo totale dell'attrezzatura della GHRS [3] ed è necessaria una comprensione più approfondita del suo impatto sul costo totale per ottenere la massima riduzione possibile dei costi della GHRS. Contrariamente agli studi sui compressori e sui sistemi di accumulo, sono disponibili informazioni relativamente limitate sull'unità di preraffreddamento. Il preraffreddamento dell'idrogeno prima che venga erogato nel serbatoio del veicolo è fondamentale per evitare il

Lezione 12: Stazioni di rifornimento e infrastruttura dell'idrogeno

surriscaldamento del serbatoio. Il protocollo di rifornimento SAE J2601 stabilisce un processo di rifornimento limitato per garantire un riempimento rapido e sicuro di FCV [4].

Il protocollo di rifornimento SAE J2601 stabilisce un intervallo di temperatura di preraffreddamento dell'idrogeno per ogni tipo di stazione di rifornimento di idrogeno; ad esempio, è richiesto che una stazione T40 debba preraffreddare l'idrogeno tra -33 e -40 °C prima di erogarlo agli FCV. L'unità di preraffreddamento, situata tra l'accumulatore buffer ad alta pressione e l'erogatore, preraffredda l'idrogeno gassoso ad una temperatura di almeno -33 °C entro 30 s dall'inizio del rifornimento. Mantiene quindi una temperatura nell'intervallo prescritto per l'intera durata del rifornimento.

La velocità alla quale gli FCV possono essere riforniti è direttamente correlata, tra gli altri fattori, alla temperatura di preraffreddamento dell'idrogeno, alla temperatura ambiente e alla pressione iniziale del serbatoio a bordo [5]. Maggiore è la temperatura ambiente, maggiore sarà il tempo necessario per riempire il serbatoio e viceversa. Tuttavia, tra questi tre fattori chiave, il preraffreddamento ha l'impatto più significativo sul tempo di rifornimento. Poiché il tempo di rifornimento è uno dei parametri critici che influenza l'esperienza di rifornimento dell'FCV, il sistema di preraffreddamento dovrebbe essere progettato per fornire la velocità di rifornimento e la capacità richieste in condizioni estreme e al minor costo possibile.

Una tipica unità di preraffreddamento in una GHRS utilizza un ciclo di refrigerazione (*refrigeration cycle*) termodinamico; fa circolare un refrigerante attraverso un compressore a due stadi (*1st stage e 2nd stage compression*), un condensatore (*condenser*), una valvola di espansione termostatica e uno scambiatore di calore evaporatore (Figura 9). Questo ciclo di refrigerazione prevede un sotto-raffreddamento del refrigerante per massimizzare l'effetto di refrigerazione all'evaporatore facendo circolare una porzione del refrigerante in uscita dal condensatore attraverso la valvola di espansione, lo scambiatore di calore del sotto-raffreddatore (*sub-cooling*) e il secondo stadio del compressore. L'idrogeno erogato viene preraffreddato rilasciando energia al refrigerante a bassa temperatura attraverso lo scambiatore di calore dell'evaporatore. Lo scambiatore di calore dell'evaporatore può essere progettato con una grande massa termica (principalmente per fungere da buffer e quindi ridurre la capacità di refrigerazione richiesta), oppure può avere un design compatto per l'imballaggio.

Lezione 12: Stazioni di rifornimento e infrastruttura dell'idrogeno

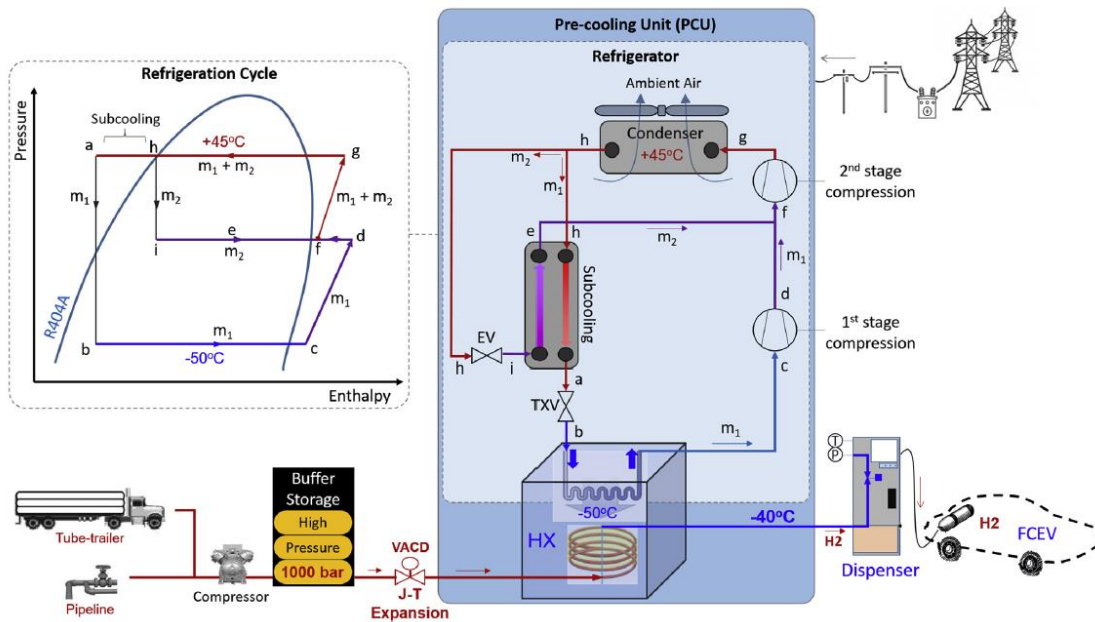


Figura 9. Schema del funzionamento dell'unità di preraffreddamento presso una GHRS composta da compressore (*compressor*), accumulo buffer ad alta pressione (*high pressure buffer storage*), unità di preraffreddamento (*Pre-cooling unit*) ed erogatore (*dispenser*).

Due fattori principali influenzano le prestazioni di refrigerazione e il dimensionamento dell'unità di preraffreddamento: il processo di espansione JT (Lezione 2) al dispositivo di controllo ad area variabile (*variable area control device*, VACD) a monte dello scambiatore di calore di preraffreddamento e il requisito della stazione di essere in grado di riempire un dato numero di veicoli back-to-back (B2B). L'effetto J-T è correlato alla temperatura di ingresso del carburante idrogeno che scorre nell'unità di preraffreddamento, mentre il fabbisogno di riempimento B2B è associato alla domanda oraria di punta di rifornimento al distributore [6].

L'effetto J-T si riferisce alla variazione di temperatura di un gas quando è forzato attraverso una valvola ad entalpia costante (espansione adiabatica). Tutti i gas hanno una "temperatura di inversione" al di sotto della quale subiscono un calo di temperatura durante il processo di espansione J-T. La temperatura di inversione è direttamente correlata alla temperatura critica del gas. Le sostanze con temperatura critica estremamente bassa (ad esempio, idrogeno, elio e neon) hanno temperature di inversione ben al di sotto della temperatura ambiente, e quindi le loro temperature aumentano durante l'espansione isentalpica al di sopra delle loro temperature di inversione (< 224 K per l'idrogeno). Quando l'idrogeno ad alta pressione proveniente dall'accumulo buffer scorre attraverso un VACD, subisce una caduta di pressione durante l'espansione. L'espansione e la caduta di pressione dell'idrogeno nel VACD causano un aumento della temperatura del gas idrogeno, poiché l'idrogeno ha coefficienti JT negativi alla pressione e alla temperatura di espansione (circa -0,05 K/bar a 900 bar e -0,03 K/bar a 1 bar e 25 °C) [7]. Detto questo, la caduta di pressione massima attraverso il VACD potrebbe teoricamente portare la temperatura del combustibile a idrogeno ad aumentare di 40 °C prima che entri nello scambiatore di calore di preraffreddamento. Questo aumento significativo della

Lezione 12: Stazioni di rifornimento e infrastruttura dell'idrogeno

temperatura potrebbe introdurre un onere aggiuntivo per l'unità di preraffreddamento, in modo tale che sarà necessaria una maggiore potenza di raffreddamento per compensare la maggiore caduta di temperatura richiesta attraverso lo scambiatore di calore. Analogamente, un aumento del numero di riempimenti B2B che la stazione deve soddisfare può aumentare la capacità richiesta dell'unità di preraffreddamento, poiché lo scambiatore di calore sarà dimensionato per la domanda di picco B2B, anche se la domanda durante la maggior parte della giornata è molto più basso.

Il numero desiderato di rifornimenti B2B ha un forte impatto sulle capacità e sui costi dei componenti di rifornimento. Nel riempimento B2B, un FCV dopo l'altro si avvicina al distributore per il rifornimento, con una breve pausa di circa 2 minuti tra i rifornimenti [6]. La mancanza di tempi di inattività durante una serie di rifornimenti B2B fornisce poco tempo ai componenti GHRS per recuperare e ricaricare. Un numero elevato di riempimenti B2B (ad es. 5) aumenterà il carico sullo scambiatore di calore in modo da compromettere la capacità della sua massa termica di mantenere la temperatura dell'idrogeno al di sotto di $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$. In tali casi, il sistema di refrigerazione potrebbe non avere tempo sufficiente per raffreddare lo scambiatore di calore tra un riempimento e l'altro. Senza considerare il picco di domanda associato al rifornimento B2B nella progettazione dei componenti di rifornimento, l'unità di preraffreddamento potrebbe essere sottodimensionata, il che mette a rischio le prestazioni di rifornimento e la soddisfazione del cliente.

Oltre all'effetto J-T e al rifornimento B2B, è importante considerare il compromesso tra i diversi concetti di progettazione delle unità di preraffreddamento. Un'unità di preraffreddamento può impiegare uno scambiatore di calore con una massa termica maggiore che è in grado di mantenere una piccola variazione di temperatura durante il raffreddamento del flusso di idrogeno, richiedendo così una minore potenza di raffreddamento dal sistema di refrigerazione. D'altra parte, uno scambiatore di calore compatto deve essere abbinato a una capacità di refrigerazione che soddisfi il carico di raffreddamento istantaneo (ovvero, fornisce il raffreddamento su richiesta). Inoltre, a causa del suo minore effetto tampone (dovuto alla sua minore massa termica), la capacità di raffreddamento con uno scambiatore di calore compatto sarà più sensibile ai fattori che influenzano la sua temperatura di ingresso, come la temperatura ambiente e l'effetto JT a monte dello scambiatore di calore

A temperature ambiente più elevate, la temperatura dell'idrogeno all'ingresso dello scambiatore di calore aumenterà, quindi potrebbe essere necessario un blocco dello scambiatore di calore con una massa termica maggiore per mantenere la sua temperatura entro l'intervallo di progettazione. Tuttavia, in un sistema di scambiatori di calore compatto, una temperatura ambiente più elevata deve essere contrastata da una maggiore potenza di raffreddamento su richiesta. Uno degli svantaggi termodinamici di avere uno scambiatore di calore con una grande massa termica è che consuma più energia per mantenere lo scambiatore di calore a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ rispetto al suo omologo scambiatore di calore compatto. D'altra parte, una configurazione di raffreddamento con scambiatore di calore on-demand compatto richiede un refrigeratore più

Lezione 12: Stazioni di rifornimento e infrastruttura dell'idrogeno

potente ma consuma meno energia per il raffreddamento di mantenimento. In altre parole, esiste un trade-off tra la potenza frigorifera e la massa termica dello scambiatore di calore. In termini di costo, uno scambiatore di calore compatto tende ad avere una struttura più complessa per un rapido trasferimento di calore su richiesta, quindi il suo costo di produzione è probabilmente superiore a uno scambiatore di calore con una grande massa termica. Tuttavia, le ridotte dimensioni del sistema mantengono bassi i costi di materiale, spedizione e installazione degli scambiatori di calore compatti rispetto agli scambiatori di calore a massa termica di grandi dimensioni.

Se viene utilizzato il preraffreddamento dell'idrogeno erogato, il sistema di erogazione deve essere dotato di un mezzo per confermare che la temperatura del carburante dell'erogatore preraffreddato sia corretta e che il controllo soddisfi i limiti di temperatura sia superiore che inferiore del protocollo di rifornimento. Se il protocollo di rifornimento utilizza la comunicazione della temperatura del serbatoio sul veicolo e si verifica un'interruzione della comunicazione, il sistema dovrebbe eseguire uno spegnimento o continuare con un rifornimento senza comunicazioni se consentito dal protocollo.

3.4.4 Erogatore dell'idrogeno - dispenser

Il sistema di erogazione è a valle del sistema di fornitura dell'idrogeno comprendente tutte le apparecchiature necessarie per eseguire l'operazione di rifornimento dell'idrogeno compresso al veicolo. Il dispenser di idrogeno è un'apparecchiatura del sistema di erogazione che comprende la cabina dell'erogatore e la struttura di supporto, che è fisicamente situata nell'area di rifornimento.

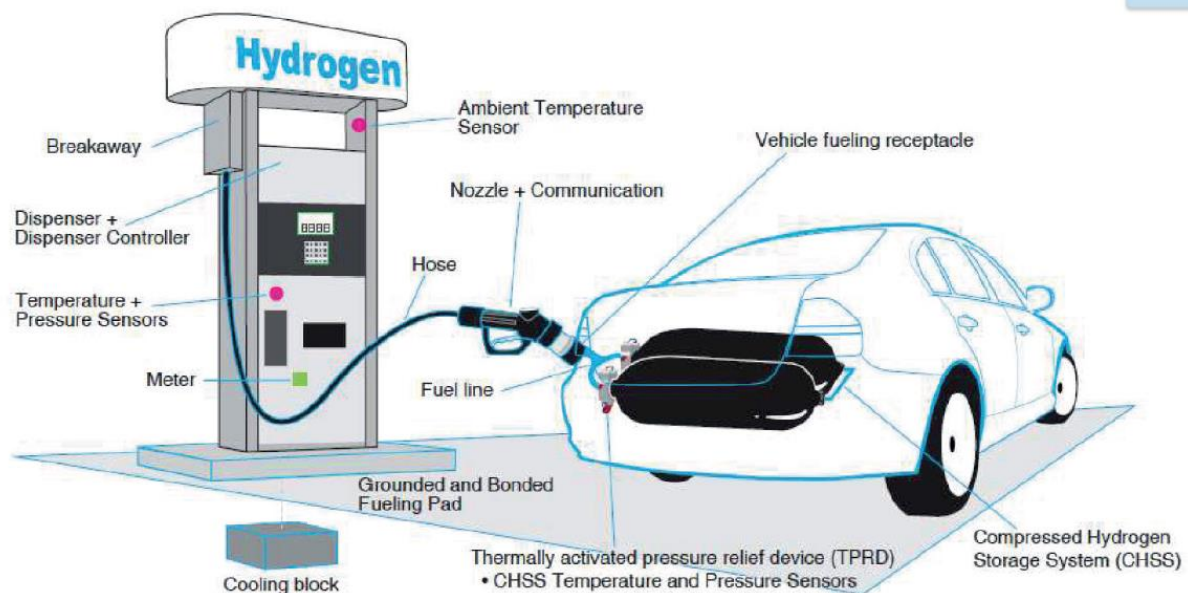


Figura 10. Esempio delle componenti chiave del sistema di erogazione di idrogeno in una stazione di rifornimento [2].

La Figura 10 illustra un esempio dei componenti chiave del sistema di erogazione della stazione di rifornimento, compreso il sistema di idrogeno ad alta pressione nel FCV, comprendente, tra

Lezione 12: Stazioni di rifornimento e infrastruttura dell'idrogeno

gli altri, il recipiente e il sistema di stoccaggio dell'idrogeno compresso (*compressed hydrogen storage system*, CHSS) con sensori di temperatura e pressione, e dispositivi di sfogo della pressione (TPRD). Il CHSS è dotato di dispositivi di limitazione della pressione attivati termicamente per la protezione contro la sovrappressione dovuta a un incendio. Sul lato della stazione è presente un sistema di controllo del sistema di erogazione automatizzato (ad esempio tramite un controllore logico programmabile (PLC)) per l'esecuzione del rifornimento, nonché le procedure di rilevamento e gestione dei guasti. La stazione dispone anche di un dispositivo di protezione da sovrappressione come un dispositivo di sfogo della pressione o equivalente per la protezione contro la sovra-pressurizzazione del sistema di distribuzione e del veicolo.

L'erogatore in una stazione di rifornimento pubblica per veicoli commerciali leggeri è tipicamente progettato con ugelli di rifornimento (*nozzle*) separati per alimentare i veicoli a pressioni di esercizio nominali di 35 MPa e/o 70 MPa. L'ugello di rifornimento della stazione può contenere un ricevitore di comunicazioni e il veicolo può contenere un trasmettitore di comunicazioni (ad es. SAE J2799). Il sistema di comunicazione con associazione dei dati a infrarossi del veicolo (IrDA) può utilizzare il protocollo SAE J2799 per trasmettere la temperatura e la pressione misurate nel sistema di stoccaggio dell'idrogeno compresso sul veicolo all'erogatore di idrogeno. Il sistema di controllo dell'erogazione può utilizzare questi dati per gestire il processo di rifornimento.

Al fine di ottenere la pressione operativa massima (MOP) necessaria per alimentare il CHSS del veicolo a idrogeno nell'intera gamma di condizioni operative, sono consigliati valori nominali minimi di pressione dei componenti del sistema di erogazione dell'idrogeno relativi al livello di servizio dell'erogatore di idrogeno (HSL), la classe di pressione (come definita nella norma ISO 17268) e la pressione di esercizio massima consentita (MAWP). Questi sono mostrati nella Tabella 2.

Tabella 2. Livelli di pressione del sistema di erogazione e pressioni nominali minime consigliate per i componenti.

Livello di servizio dell'idrogeno (HSL)	Classe di pressione	Pressione operativa massima (MOP)	Pressione operativa massima del sistema di erogazione (MAWP)
Uguale al NWP del veicolo rifornito		$1.25 \times \text{HSL}$ Pressione più alta durante il normale rifornimento	$1.375 \times \text{HSL}$ Più alto setpoint permesso per la protezione del sistema di erogazione
25 MPa	H25	31.25 MPa	34.375 MPa
35 MPa	H35	43.75 MPa	48.125 MPa
50 MPa	H50	62.5 MPa	68.75 MPa
70 MPa	H70	87.5 MPa	96.25 MPa

Se vengono utilizzati componenti con una pressione nominale inferiore alla Tabella 2, la MAWP del sistema di erogazione deve essere ridotta in base al componente con la pressione

Lezione 12: Stazioni di rifornimento e infrastruttura dell'idrogeno

nominale più bassa. Il sistema di distribuzione deve inoltre essere protetto contro la sovrappressurizzazione.

Oltre alla pressione nominale, i componenti del sistema di erogazione dell'idrogeno devono soddisfare i seguenti requisiti:

- un intervallo di temperatura ambiente da -40 °C a $+50\text{ °C}$, a meno che le condizioni locali non permettano o richiedano altri limiti di temperatura;
- compatibilità dei materiali normalmente a contatto con l'idrogeno;
- un ciclo di vita specificato prima della manutenzione o della sostituzione.

La durata del ciclo target dovrebbe essere di 100.000 cicli per il gruppo di alimentazione, ma, indipendentemente dal fatto che questo obiettivo venga raggiunto o meno, la durata del ciclo dovrebbe essere definita e dichiarata in modo che le attività di manutenzione pianificate possano prevenire un guasto.

I componenti del sistema di erogazione dell'idrogeno ad alta pressione devono essere contrassegnati con la classe di pressione solo se i componenti sono progettati e verificati per soddisfare o superare i requisiti di pressione, temperatura, compatibilità dei materiali e durata di servizio come definiti sopra. I componenti ad alta pressione devono essere montati nel rigoroso rispetto delle istruzioni del fornitore, seguendo una procedura di montaggio ben definita. La fabbricazione deve garantire che la caduta di pressione tra il sensore di pressione del carburante dell'erogatore che monitora la pressione del veicolo e l'ugello non superi il valore definito nel protocollo di rifornimento durante il flusso di idrogeno al veicolo.

3.5 Stazione di rifornimento con stoccaggio di idrogeno liquido – attrezzatura

La LHRS è tipicamente integrata con lo stoccaggio LH_2 , costituito dallo *skid* LHRS, il serbatoio LH_2 (*LH₂ tank*), linee di interconnessione (*interconnecting lines*), erogatore di idrogeno (*hydrogen dispenser*) e dispositivo di test (*test device*) come parti principali (vedere la Figura 11).

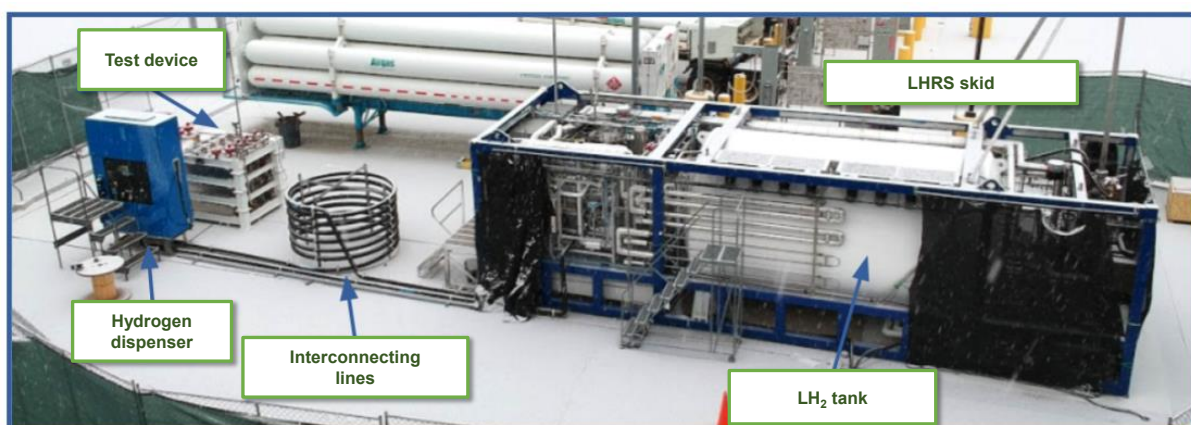


Figura 11. Panoramica delle parti principali di un tipo di LHRS con stoccaggio di LH_2 integrato.

Lezione 12: Stazioni di rifornimento e infrastruttura dell'idrogeno

Il diagramma di flusso generale di processo della stazione di rifornimento ad idrogeno liquido è presentato nella Figura 12.

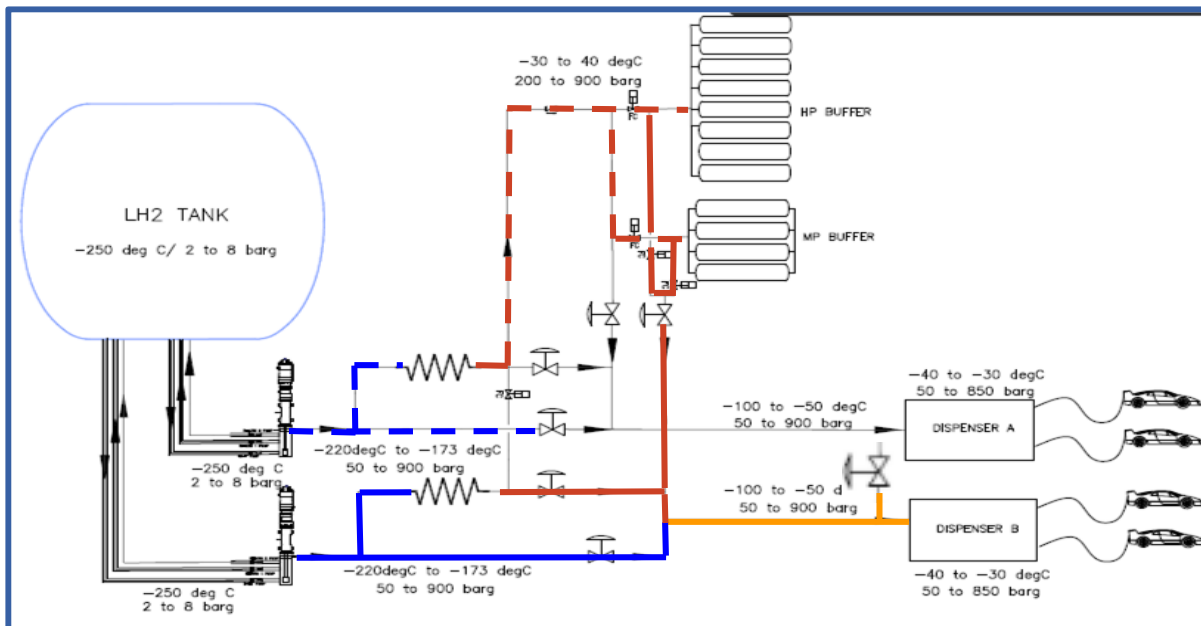


Figura 12. Flusso di processo di una stazione di rifornimento basata sullo stoccaggio di LH₂.

Le principali attrezzature della LHRS sono:

- il serbatoio di LH₂,
- la pompa criogenica,
- il vaporizzatore,
- il pannello valvole,
- i buffers,
- il collegamento al distributore,
- il distributore.

Un tipo di skid principale LHRS è mostrato nella figura seguente con l'identificazione delle principali attrezzature funzionali:

- in Figura 13, per il lato “criogenico”
- in Figura 14, per il lato “caldo”.

Le apparecchiature verranno descritte con maggiori dettagli e funzionalità nelle successive sottosezioni dedicate.

Lezione 12: Stazioni di rifornimento e infrastruttura dell'idrogeno



Figura 13. Panoramica skid LHRs – lato “criogenico”. Componenti in senso orario: scarico del trailer, estrazione LH₂, linee coibentate, protezione da urto/impatto di veicoli, scambiatore di calore vaporizzatore LH₂, serbatoio di LH₂, termoconvettore.



Figura 14. Panoramica skid LHRs – lato “caldo”. Componenti in senso orario: pannello valvole principale, interfaccia uomo-macchina, pannello elettrico, buffers alta pressione, protezione da urto o impatto del buffer alta pressione, dewar LN₂, pompe di termo fluidi per il sistema di vaporizzazione.

3.5.1 Stoccaggio dell'idrogeno liquido

Nelle LHRs il serbatoio di idrogeno liquido può essere integrato all'interno di uno skid come mostrato in questa lezione e per la LHRs Linde a Oakland. Tuttavia, lo stoccaggio di LH₂ può essere un vessel/serbatoio autonomo, posizionato verticalmente o orizzontalmente.

Per la LHRs mostrata nella Figura 15, il volume di stoccaggio di LH₂ è di circa 20 m³ per una capacità di 1-t H₂. La temperatura di stoccaggio è di circa -250°C e la pressione di stoccaggio è compresa tra 2 e 8 bar.

Lezione 12: Stazioni di rifornimento e infrastruttura dell'idrogeno

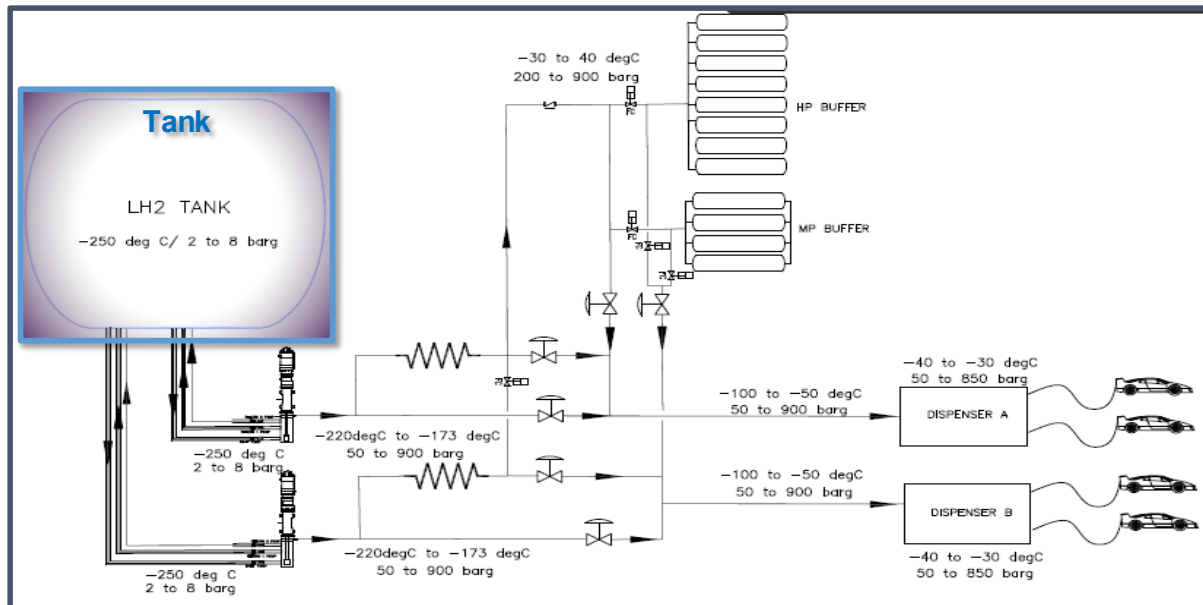


Figura 15. Flusso di processo di una stazione di rifornimento basata su LH₂ – Serbatoio di stoccaggio LH₂ (*tank*).

I parametri principali su questa parte dell'LHRS sono:

- L'isolamento scelto è un isolamento multistrato (MLI) con vacuum per mantenere la temperatura criogenica (vedi Figura 16),
- Il serbatoio è orizzontale per essere integrato all'interno di uno skid e soddisfare i requisiti di autorizzazione (sono possibili altre configurazioni, ad esempio con serbatoio autonomo di capacità maggiore),
- Tutte le interfacce sono su un lato del serbatoio,
 - o Linee di mandata e ritorno per ogni pompa (+ una terza per controllare il livello nel pozzetto della pompa LH₂)
 - o Modalità convenzionale o modalità *thermosiphon*
 - o Sicurezza, linee di sfiato
 - o Linee di riempimento (in basso e in alto)
- La protezione contro gli urti è integrata sul telaio (vedi Figura 17).



Figura 16. Isolamento MLI.

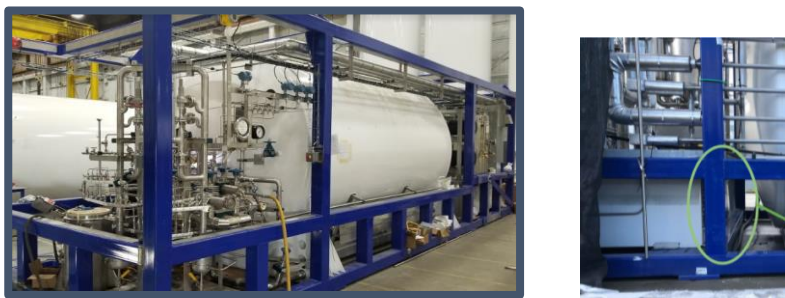


Figura 17. Protezione contro gli urti (in blu) alla base.

Il serbatoio LH₂ viene consegnato da un'autocisterna LH₂. Questa è composta da un serbatoio orizzontale da 40 m³ funzionante tra 1 e 12 bar (inventario: 4 t-H₂). Il collegamento tra lo stoccaggio e il camion avviene tramite una linea di trasferimento flessibile. Il trasferimento viene eseguito senza pompa. Sul rimorchio è presente un piccolo vaporizzatore per produrre un accumulo di pressione nel serbatoio dell'autocisterna e consentire il trasferimento dell'idrogeno liquido nello stoccaggio verticale stazionario.

3.5.2 Pompa criogenica

Le pompe criogeniche installate nelle LHRS sono mostrate in Figura 18.

Lezione 12: Stazioni di rifornimento e infrastruttura dell'idrogeno

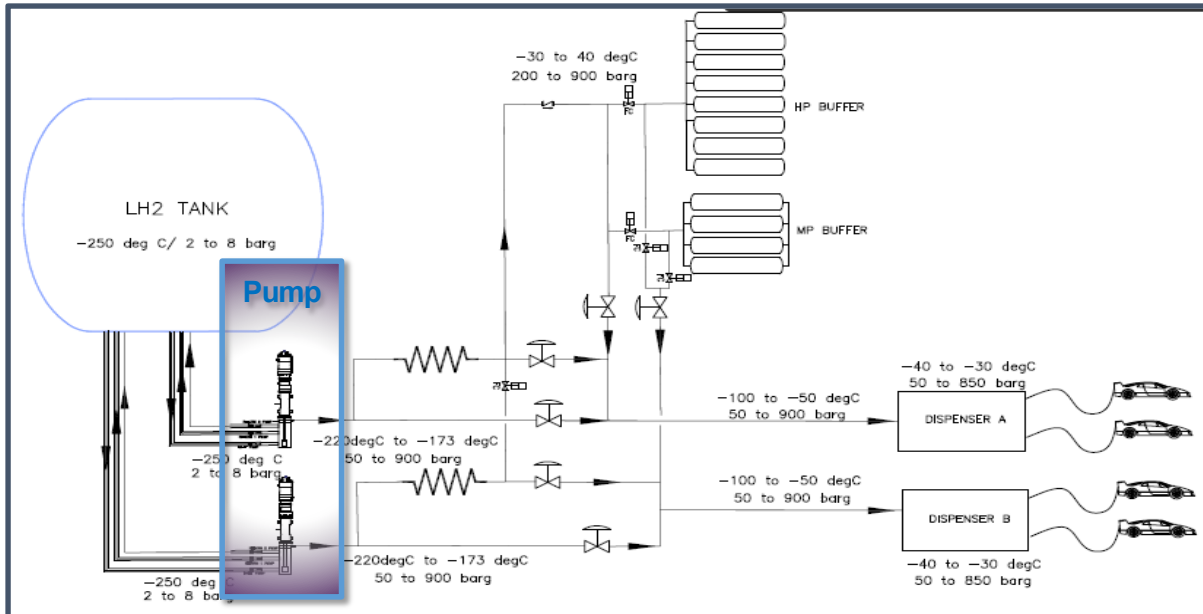


Figura 18. Flusso di processo di una stazione di rifornimento basata su LH₂ – Pompa LH₂ (*pump*).

La pompa criogenica, come mostrato in Figura 19, permette di trasferire il liquido dal serbatoio di accumulo allo scambiatore di calore. La pressione dell'idrogeno liquido è leggermente aumentata tra lo stoccaggio e lo scambiatore di calore.



Figura 19. Pompa criogenica.

La pompa è immersa in un pozzetto sottovuoto come illustrato nella Figura 20.

Lezione 12: Stazioni di rifornimento e infrastruttura dell'idrogeno

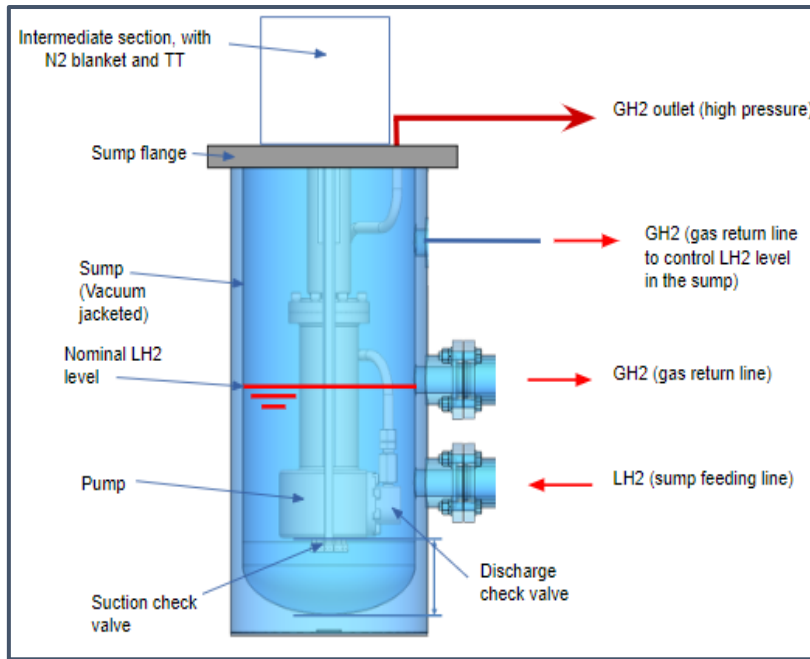


Figura 20. Pompa nel pozzetto sottovuoto. Componenti in senso orario: uscita GH₂ (alta pressione), GH₂ (linea di ritorno del gas per controllare il livello di LH₂ nel pozzetto), GH₂ (linea di ritorno del gas), LH₂ (linea di alimentazione del pozzetto), valvola di non ritorno per lo scarico, valvola di non ritorno per l'aspirazione, pompa, livello LH₂ nominale, pozzetto (isolato con vacuum), flangia del pozzetto, sezione intermedia con strato N₂ e TT.

3.5.3 Vaporizzatore LH₂

Il vaporizzatore delle LHRS è mostrato in Figura 21.

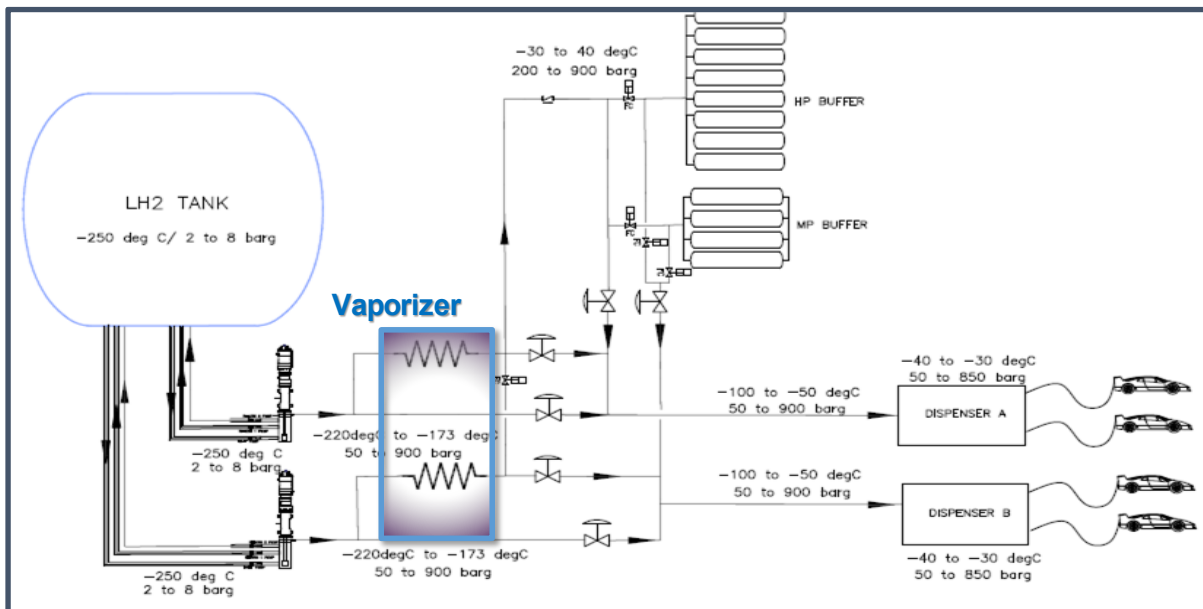


Figura 21. Flusso di processo di una stazione di rifornimento basata su LH₂ – vaporizzatore (vaporizer).

Lo scopo del vaporizzatore è aumentare la pressione dell'idrogeno gassoso che verrà stoccato in buffers intermedi ad una pressione fino a 900 bar. Anche la temperatura dell'idrogeno viene aumentata da -220 a -30°C.

Lezione 12: Stazioni di rifornimento e infrastruttura dell'idrogeno

Diverse tecnologie sono disponibili per questo scambiatore di calore. Le principali sono:

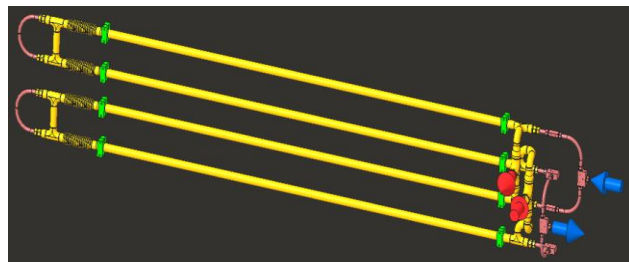
- vaporizzatore atmosferico,
- e vaporizzatore “tubo-in-tubo”.

Il vaporizzatore “tubo-in-tubo”, come mostrato in Figura 22, è preferito per le stazioni di rifornimento per i seguenti motivi:

- semplice e facile da fabbricare,
- soluzione compatta rispetto al vaporizzatore atmosferico,
- nessuna creazione di zona arricchita in O_2 ,
- basso consumo energetico rispetto al riscaldatore elettrico (8 volte inferiore).



(A)



(B)

Figura 22. (A) Scambiatore di calore tubo-in-tubo nello skid LHRS (B) Principio di vaporizzazione dell'LH₂ (frece blu).

Lezione 12: Stazioni di rifornimento e infrastruttura dell'idrogeno

3.5.4 Pannello valvole

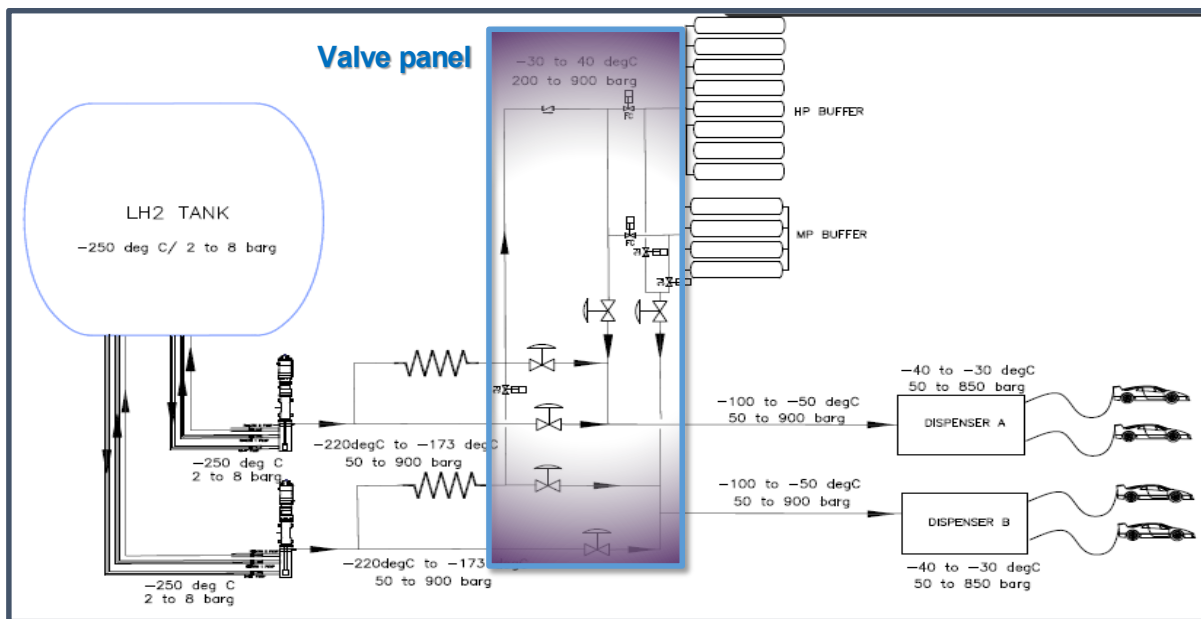


Figura 23. Flusso di processo di una stazione di rifornimento basata su LH₂ – Pannello valvole (*valve panel*).

Il pannello delle valvole nelle LHRS è mostrato in Figura 23.

Una vista del pannello valvole è mostrata nella Figura 24. Questa parte del processo è abbastanza semplice, ma è una potenziale fonte di perdite di idrogeno gassoso a causa dell'elevato numero di connessioni per valvole, trasmettitori di pressione e altre apparecchiature necessarie per il funzionamento della stazione.



Figura 24. Pannello valvole.

Lezione 12: Stazioni di rifornimento e infrastruttura dell'idrogeno

In questa fase l'idrogeno è gassoso e la pressione massima raggiunge i 900 bar.

3.5.5 Buffers gassosi

I buffer gassosi nelle LHRS sono mostrati nella Figura 25.

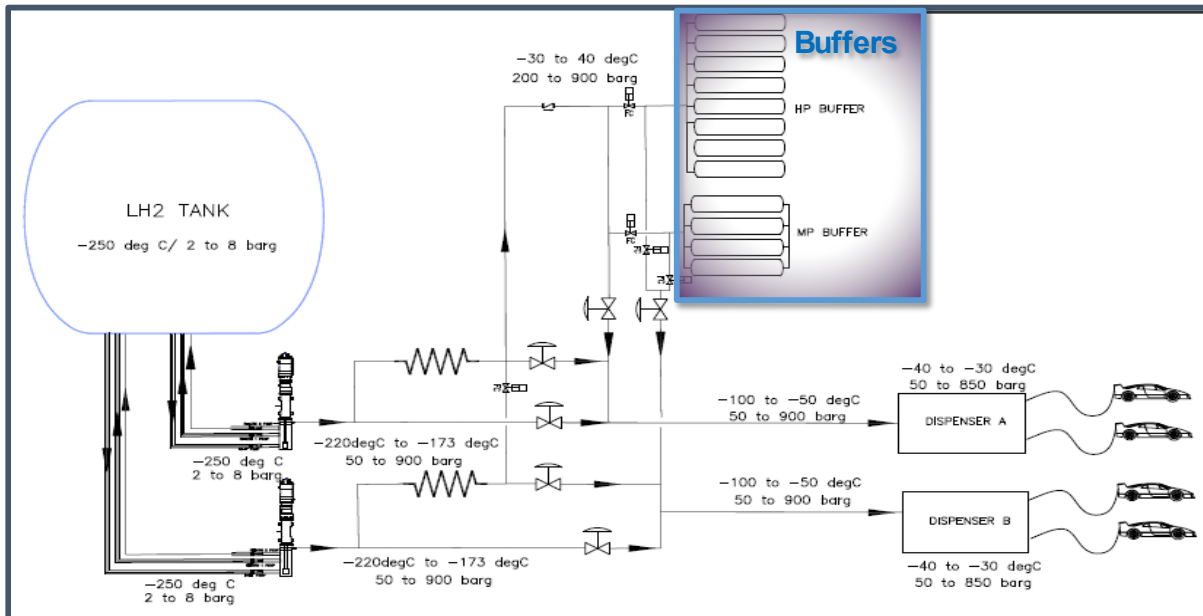


Figura 25. Flusso di processo di una stazione di rifornimento basata su LH₂ – Buffers gassosi.

La pressione di esercizio massima consentita (MAWP) dei buffer è di 1000 bar (100 MPa). Vengono utilizzati cilindri di tipo II in acciaio e avvolti in carbonio per rafforzare la resistenza meccanica dei cilindri. Nella configurazione della stazione presentata, i cilindri selezionati hanno un volume di 123 L. Questi cilindri sono raggruppati in 3 fasci da 4 come mostrato nella Figura 26 e integrati nel mainframe.

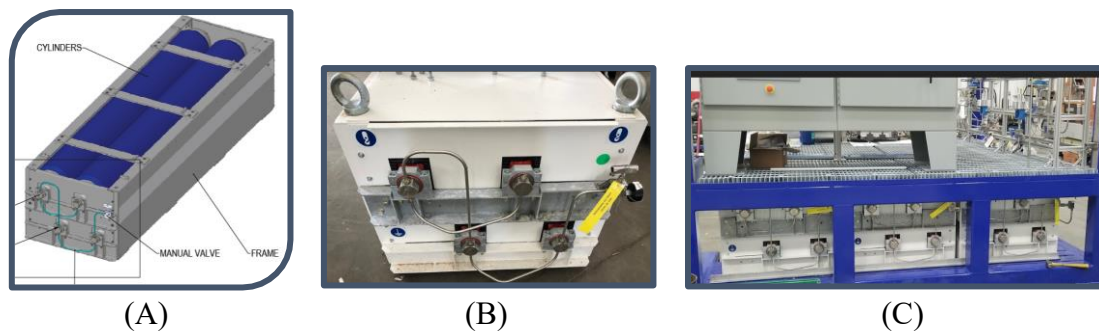


Figura 26. Buffers alta pressione. (A) 4 buffers tipo II buffers in un gruppo, (B) Interconnessioni alla sommità del buffer, (C) Integrazione dei gruppi nello skid LHRS.

Ogni gruppo ha un peso di 3 t. I buffer sono protetti dal fuoco grazie ad un isolamento specifico.

3.5.6 Connessione al dispenser

La connessione al distributore nella LHRS è mostrata in Figura 27.

Lezione 12: Stazioni di rifornimento e infrastruttura dell'idrogeno

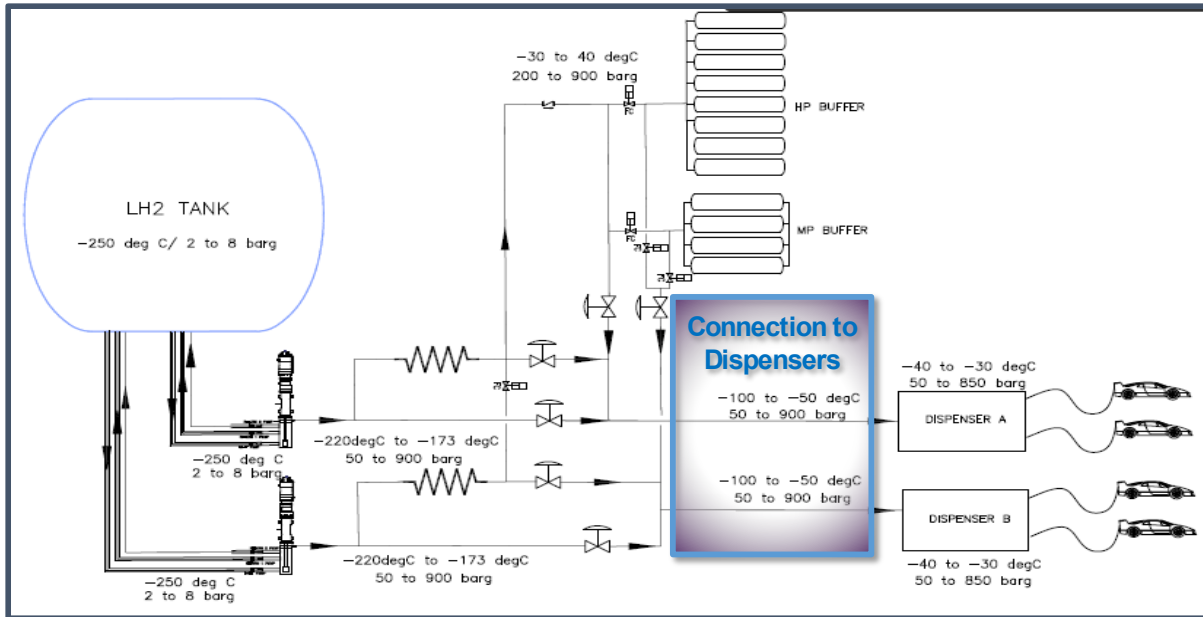


Figura 27. Flusso di processo di una stazione di rifornimento basata su LH₂ – Connessione al dispenser/erogatore (*connection to dispenser*).

Le linee possono essere lunghe più di 60 m (200 piedi). È necessario mantenerle fredde per eseguire con successo il rifornimento. Per far fronte al riscaldamento, è stata trovata una soluzione crossover e sono stati stabiliti specifici processi di riempimento intelligente in base alle variazioni del carico della stazione durante il giorno.

3.5.7 Dispenser

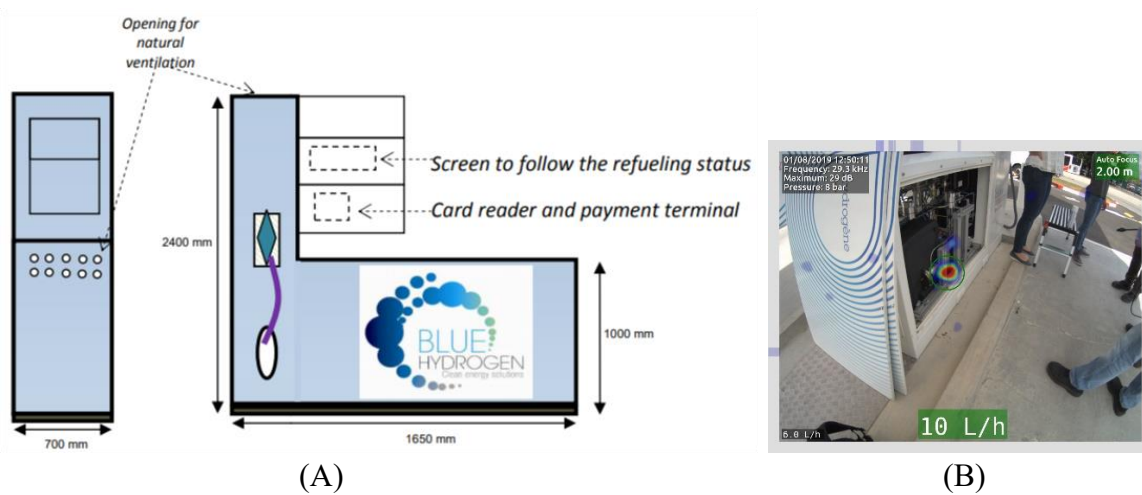


Figura 28. (A) Principali elementi e dimensioni indicative del dispenser, ossia l'erogatore, con aperture per la ventilazione naturale, schermo per seguire lo stato del rifornimento, terminal per il pagamento (B) skid valvole.

Il distributore consente un collegamento veloce, facile e sicuro tra la stazione e il veicolo per effettuare il rifornimento. La configurazione di un tipico erogatore è mostrata in Figura 28.

Il distributore è composto dai seguenti sottogruppi:

Lezione 12: Stazioni di rifornimento e infrastruttura dell'idrogeno

- Distribuzione: struttura e quadro valvole con valvola di riempimento automatica, ugello e sistema per il distacco,
- Controllo: HMI - Controllo automatico riempimento – Quadro elettrico – Controllo accessi.

Come mostrato in Figura 29, tra le caratteristiche tecniche del distributore si possono evidenziare:

- Il rifornimento è automatico e richiede azioni minime da parte del cliente (ugello + pulsante di avviamento),
- Il connettore o l'ugello del veicolo sarà facile da usare e approvato secondo lo standard SAE J2600,
- Un accoppiamento con distacco garantisce l'interruzione meccanica del rifornimento nel caso in cui il veicolo si allontani dall'erogatore senza rimuovere l'ugello,
- Ugello IR (conforme a SAE J2799) per linea 700 bar.



(A)



(B)

Figura 29. (A) Vista di un distributore doppio, (B) ugello per il rifornimento.

La stazione è in grado di erogare idrogeno contemporaneamente attraverso due postazioni di rifornimento a veicoli leggeri (2-10 kg) con il doppio erogatore.

Le pressioni di erogazione in base al tipo di erogatore sono:

- 350 bar per auto con range extender,
- 700 bar per auto a celle a combustibile,
- 350 bar per autobus e camion.

Le portate massime sono:

- 60 g/s per rifornimento auto,
- 120 g/s per il rifornimento di autobus e camion 350 bar.

Lezione 12: Stazioni di rifornimento e infrastruttura dell'idrogeno

La temperatura di mandata va da -30°C a $+40^{\circ}\text{C}$ (protocollo di rifornimento: SAE J2601 H70 T40).

In termini di sicurezza, molto vicino al distributore o all'interno, sono presenti:

- Rilevatore di H_2 all'interno del distributore,
- Ventilazione naturale dell'erogatore,
- Rilevatore di fiamma vicino all'erogatore,
- Pulsanti di arresto di emergenza.

4. Produzione

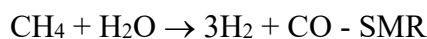
4.1 Steam reforming del metano

Il processo di steam reforming del metano (SMR) utilizza vapore e un catalizzatore per produrre idrogeno da un idrocarburo leggero come metano o propano (vedi la Figura 30 e la Figura 31). Il processo sostanzialmente sottrae l'idrogeno all'idrocarburo e all'acqua convertendo tutto il carbonio e l'ossigeno rimanenti in CO_2 .

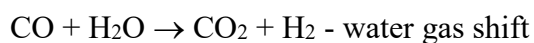


Figura 30. Impianto SMR di Air Liquide.

I due passaggi principali della conversione sono i seguenti:



- Reazione endotermica: $\Delta H^{\circ} = + 206 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$
- Reazione catalitica: $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$
- 20 - 30 bar, $900 - 1000^{\circ}\text{C}$, pochi minuti



Lezione 12: Stazioni di rifornimento e infrastruttura dell'idrogeno

- Reazione lievemente esotermica
- Reazione catalitica: CuO; Fe₂O₃; Cr₂O₃
- 20 - 30 bar, 400°C (alta temperatura) / 200°C (bassa temperatura)

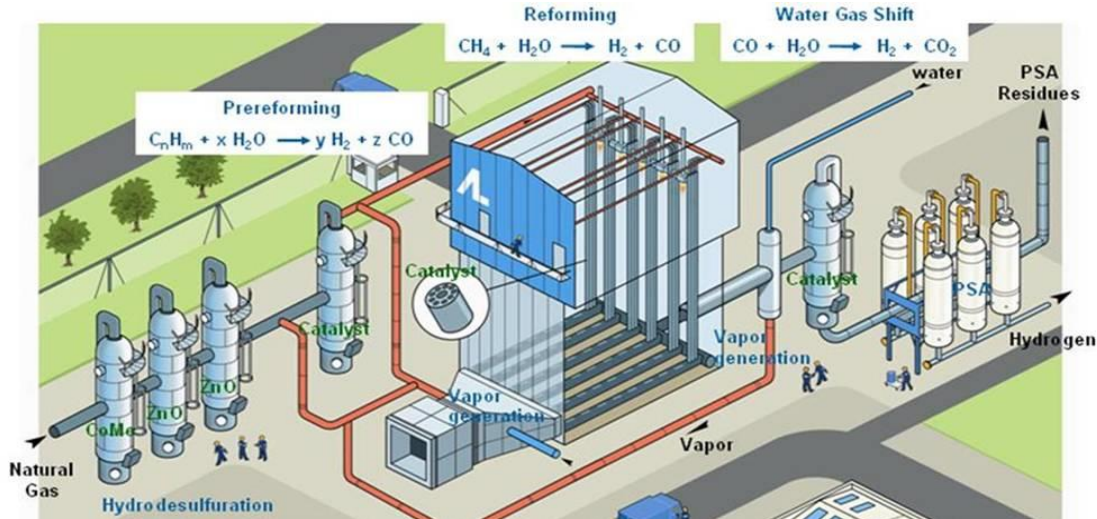


Figura 31. Schema di un impianto di steam reforming del metano.

4.2 Elettrolizzatore

L'elettrolisi dell'acqua comprende la scissione delle molecole d'acqua nelle loro parti costituenti (H₂ e O₂) mediante il passaggio di una corrente elettrica (vedi Figura 32).



Figura 32. Principi del processo di elettrolisi.

La Figura 33 fornisce uno schema del processo di elettrolisi. L'acqua viene scissa dall'elettricità per generare idrogeno e ossigeno. La purezza dell'idrogeno generato è estremamente elevata.

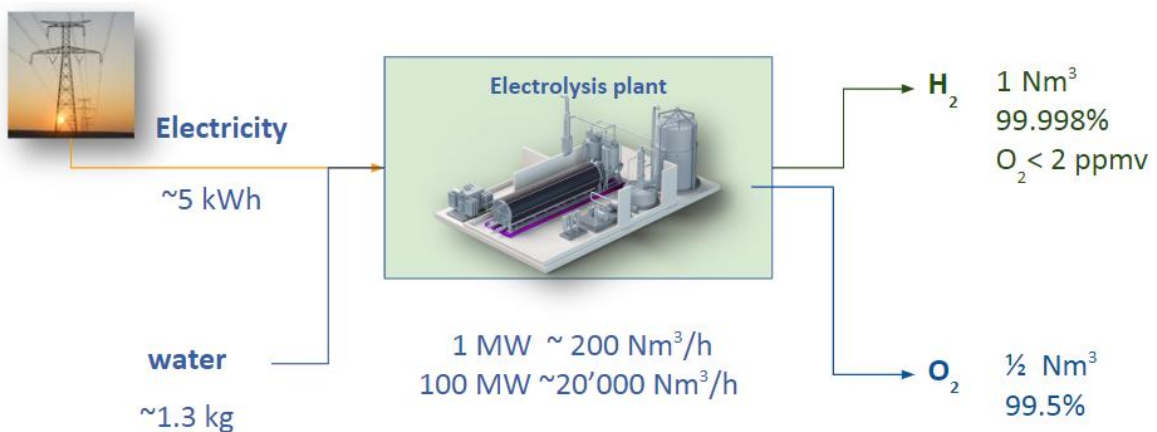


Figura 33. Sistema di elettrolisi.

Lezione 12: Stazioni di rifornimento e infrastruttura dell'idrogeno

Esistono diverse tecnologie di elettrolisi con diversi livelli di maturità (denominati anche livello di disponibilità tecnologica (TRL)):

- Elettrolizzatore a membrana a scambio protonico (PEM) – TRL 8
- Elettrolizzatore alcalino – TRL 9
- Elettrolizzatore ad ossido solido – TRL 6

Le principali tecnologie di elettrolisi sono quelle alcaline, contenenti elettroliti liquidi (idrossido di potassio o sodio) ed elettrolita polimerico solido, ad es. PEM. Le principali reazioni dei diversi elettrolizzatori sono mostrate nella Figura 34.

	Proton Exchange Membrane	Alkaline Electrolysis	Solid Oxide Electrolysis
Cathode	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$	$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$	$\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}^{2-}$
Anode	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	$2\text{HO}^- \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$	$\text{O}^{2-} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^-$
	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2$	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2$	$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2$

Figura 34. Principali reazioni al catodo e all'anodo per le tecnologie: membrana a scambio protonico, elettrolisi alcalina, elettrolisi ad ossido solido.

Le principali differenze tra queste tecnologie sono:

- Il separatore: diaframma o membrana.
- L'elettrolita: liquido, solido, acido o basico.

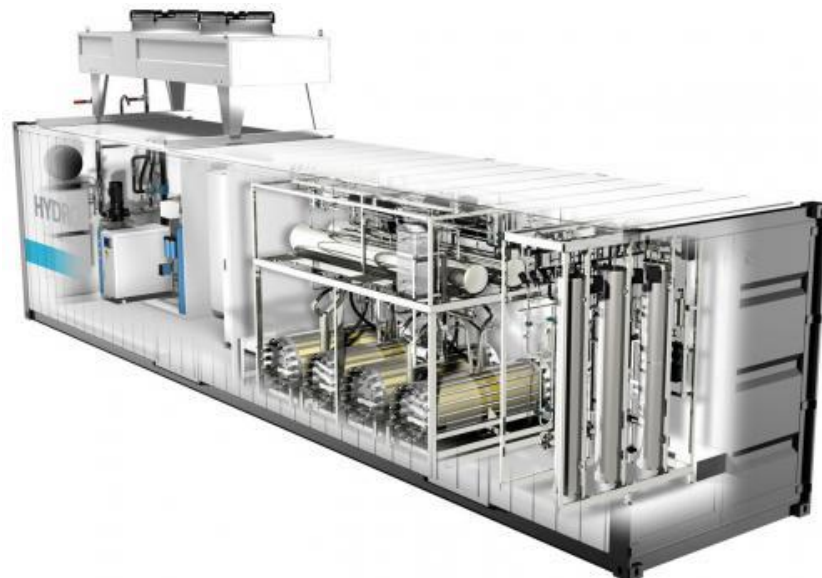


Figura 35. Sketch di uno skid dell'elettrolizzatore Hydrogenics.

Lezione 12: Stazioni di rifornimento e infrastruttura dell'idrogeno

Oltre all'unità di elettrolisi, una stazione in loco che genera idrogeno mediante elettrolisi richiede sistemi di purificazione dell'acqua e un'unità di purificazione dell'idrogeno ed essiccatore per trattare l'idrogeno prodotto. Molti elettrolizzatori generano idrogeno a pressione relativamente bassa, ad es. da 10 a 25 bar, quindi è necessaria un'ulteriore compressione per elevare la pressione a quelle di stoccaggio.

4.3 Liquefazione

La liquefazione dell' H_2 è un processo ad alta intensità energetica. Il lavoro minimo richiesto per la liquefazione dell'idrogeno (all'equilibrio orto-para) è 3,92 kWh di elettricità/kg di H_2 o 0,12 kWh/kWh di H_2 . I valori tipici per l'intero processo, tuttavia, sono compresi tra 8 e 14 kWh/kg per unità di liquefazione relativamente grandi. La riduzione del consumo energetico degli impianti di liquefazione è un argomento in fase di sviluppo per l'industria LH_2 (vedi ad esempio il progetto IDEALHy FCH JU, <https://www.idealhy.eu/>).

La maggior parte degli stabilimenti (11) si trova in Nord America. In Europa, gli impianti (3) in Francia (vedi Figura 36), Paesi Bassi e Germania hanno una capacità totale di 19 t/giorno. La dimensione maggiore di un impianto è attualmente di 68 t/g (New Orleans, USA). Un ultimo impianto start-up (2017) (10 t/giorno) è di proprietà di Airgas (ora Air Liquide) a Calvert City.



Figura 36. Stazione di rifornimento LH_2 Air Liquide (sinistra: Little Town, USA; destra: Becancour, Canada).

Lezione 12: Stazioni di rifornimento e infrastruttura dell'idrogeno

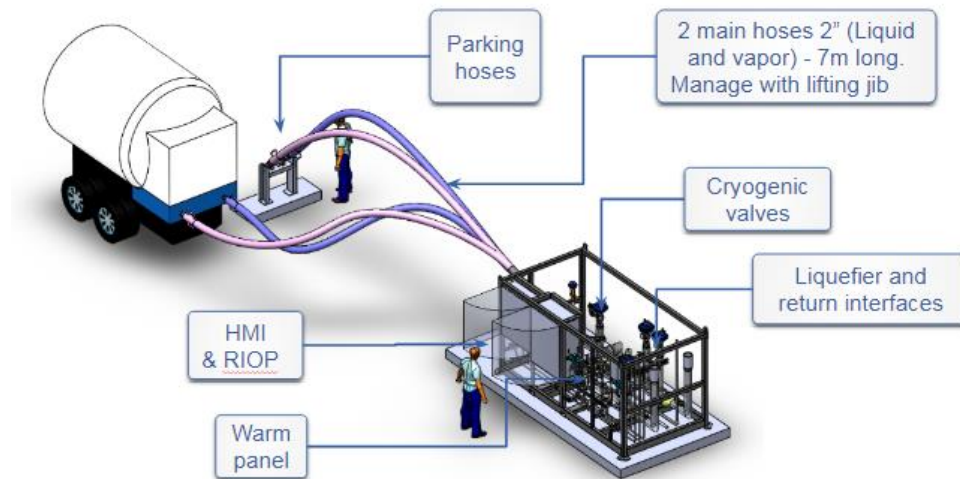


Figura 37. Generico processo di riempimento dell'autocisterna LH₂. Terminologia in senso orario: tubi di stazionamento; due tubi principali 2" (liquido e vapore) – lunghezza 7 m. Posizionamento con gru di sollevamento; valvole criogeniche; liquefazione e interfacce di ritorno; pannello lato caldo; HMI & RIOP.

La Figura 37 mostra il processo di riempimento dell'autocisterna LH₂. Per trasferire l'LH₂ da un deposito a un altro (ad esempio da un grande deposito a una cisterna o da un rimorchio a un deposito nel sito di utilizzo), sono disponibili due metodi:

- accumulo di pressione (aumento di pressione naturale o vaporizzazione volontaria di LH₂ tramite un piccolo scambiatore di calore esterno). Quindi, la pressione nel "magazzino madre" diventa maggiore della pressione nella "magazzino figlia" e il trasferimento di LH₂ è facile. I principali inconvenienti di questo metodo sono un lungo tempo di funzionamento e un aumento della pressione dell'accumulo "madre" che porta a volte alla necessità di uno sfogo di pressione;
- pompaggio nel "magazzino madre" mediante apposita pompa criogenica centrifuga di travaso. I principali svantaggi di questo metodo sono il costo della pompa e la necessità di una frequente manutenzione della pompa principalmente a causa della cavitazione (basso NPSH disponibile - *Net Positive Suction Head*: differenza tra pressione del liquido e pressione di vapore di saturazione del composto considerato - a causa della bassa densità di LH₂).

Lezione 12: Stazioni di rifornimento e infrastruttura dell'idrogeno

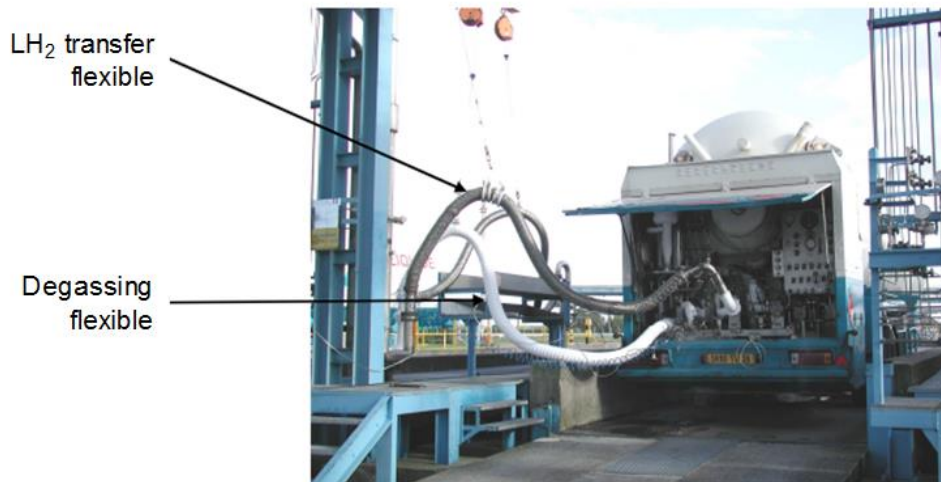


Figura 38. Cisterna LH₂ durante il trasferimento: flessibile di trasferimento dell'LH₂, flessibile di degassamento.

5. Pipelines

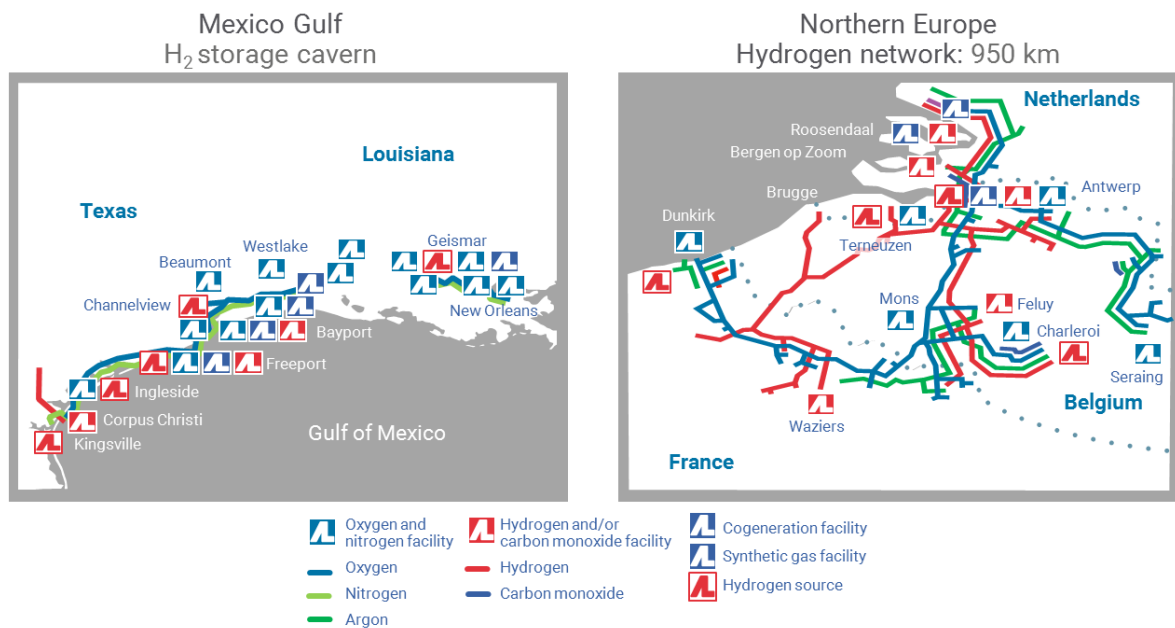


Figura 39. Risorse di idrogeno e rete di distribuzione di Air Liquide.

Le pipelines, ossia le condutture, sono utilizzate per trasportare composti gassosi in grandi quantità. A seconda delle proprietà del gas trasportato e delle esigenze dei clienti, la pressione nelle tubazioni può variare. Per il trasporto dell'idrogeno, la pressione all'interno delle tubazioni può raggiungere i 100 bar. La Figura 39 mostra la rete di gasdotti di Air Liquide e gli impianti di produzione di idrogeno, gas di sintesi e altri gas negli Stati Uniti e nel nord Europa.

Come illustrato nella Figura 39, le pipelines sono installate relativamente vicino agli impianti di produzione. Sulla rete di gasdotti, a seconda della distanza tra l'impianto di produzione e il cliente, possono essere necessarie stazioni di pressurizzazione per mantenere la pressione

Lezione 12: Stazioni di rifornimento e infrastruttura dell'idrogeno

operativa nella condotta. È importante notare che solo alcune stazioni sono direttamente collegate da gasdotti. Le autocisterne sono il mezzo principale per il trasporto. In alcuni casi può invece essere conveniente la produzione in loco.

6. Caratteristiche di sicurezza delle HRS e altre infrastrutture

(cosa / dove / perché / condizioni operative normali e anormali (d'emergenza) / da fare o evitare durante l'intervento)

Tabella 3. Caratteristiche di sicurezza per l'elettrolizzatore.

Cosa	Dove	Perché
Monitoraggio del processo (pressione, temperatura)	Generale	Rilevare perdite e malfunzionamenti
Apparecchiature certificate ATEX	Nello skid che è uno spazio confinato dove può avvenire una perdita	Evitare sorgenti di innesco
Rilevazione di H ₂	Interno allo skid	Attivare l'allarme e le valvole di arresto se necessario in caso di rilasci accidentali
Rilevazioni di fiamme (UV/IR)	Esterno allo skid	Attivare l'allarme e le valvole di arresto se necessario in caso di rilasci accidentali

Tabella 4. Caratteristiche di sicurezza per i trailer con idrogeno gassoso.

Cosa	Dove	Perché
Valvole di isolamento	Cilindri	Secondo il DLR, durante il trasporto tutti gli accumuli sono isolati da una valvola
TPRD	Nello specifico su trailers con cilindri di tipo-IV Posizionato sul tetto del trailer con direzione verticale verso l'alto	Evitare la pressurizzazione e rottura del cilindro nel caso di incendio NB: non obbligatorio ma installata su alcuni trailer con alta capacità con cilindri di tipo-IV
Prova di tenuta	Cisterna del trailer	Evitare perdite significative dopo il rifornimento del trailer

Lezione 12: Stazioni di rifornimento e infrastruttura dell'idrogeno

Tabella 5. Caratteristiche di sicurezza per le pipelines di idrogeno ad alta pressione.

Cosa	Dove	Perché
Monitoraggio della pressione	Pipeline	Rilevare perdite significative sulla rete
Ispezione periodica	Pipeline	Rilevare difetti della copertura e prevenire perdite significative
Protezione catodica	Pipeline	Evitare la corrosione della pipeline

Tabella 6. Caratteristiche di sicurezza per le HRS con idrogeno gassoso.

Cosa	Dove	Perché
Tubi e raccordi certificati e convalidati	Linea di processo e dispenser	Prevenire rilasci accidentali
Sostituzione periodica del tubo flessibile	Dispenser	Prevenire rilasci accidentali
Rilevazione di H ₂	Nel container Nel dispenser	Attivare l'allarme e le valvole di arresto se necessario in caso di rilasci accidentali
Rilevazioni di fiamme (UV/IR)	Nel container Esterno, vicino al dispenser	Attivare l'allarme e le valvole di arresto se necessario in caso di rilasci accidentali
Valvola automatica di arresto	Diverse posizionate tra il serbatoio di H ₂ e il dispenser	Limitare l'inventario di H ₂ nel caso di rilascio accidentale
Monitoraggio della pressione del processo	Generale	Rilevare una caduta di pressione anomala a causa di perdite o rotture delle tubazioni
Spazi confinati ventilati naturalmente	Container Dispenser	Evitare il raggiungimento dei limiti di infiammabilità per le miscele H ₂ -aria nel caso di rilascio accidentale
Ventilazione forzata	Container per alcuni modelli	Evitare il raggiungimento dei limiti di infiammabilità per le miscele H ₂ -aria nel caso di rilascio accidentale se la ventilazione naturale non è possibile o sufficiente
Apparecchiature certificate ATEX	Spazi confinati dove possono avvenire perdite (es. skid o dispenser)	Evitare sorgenti di innesco
Flessibile con messa a terra	Dispenser	Prevenire scintille causate dall'elettricità statica durante il rifornimento
Prova di tenuta automatica prima del rifornimento	Generale	Prevenire rilasci accidentali

Lezione 12: Stazioni di rifornimento e infrastruttura dell'idrogeno

Riduttori del flusso	Generale	Limitare il flusso di massa nel caso di rilascio accidentale o rottura del tubo
Tempo di chiusura automatico	Generale	Chiudere le valvole di alimentazione H ₂ in caso di rottura del tubo o perdita
Dispositivo di distacco del flessibile	Dispenser	Evitare perdite significative chiudendo l'alimentazione del flessibile in caso di mancato scollegamento dal veicolo
Protezione dall'urto (paletti dissuasori)	Dispenser	Proteggere l'erogatore da urti di veicoli ed evitare perdite catastrofiche
Stop di emergenza	Pochi metri dal dispenser	Chiudere le valvole di alimentazione H ₂ in caso di emergenza
Lastra di cemento conduttiva (messa a terra)	Dispenser	Prevenire scintille causate dall'elettricità statica durante il rifornimento

Tabella 7. Caratteristiche di sicurezza per i trailer con idrogeno liquido.

Cosa	Dove	Perché
Due valvole di sicurezza di cui almeno una pneumatica	Serbatoio	Secondo il DLR, durante il trasporto tutti gli accumuli sono isolati da una valvola
Valvola di sicurezza su strada	Serbatoio	Rilasciare la sovrappressione
Disco di rottura	Serbatoio	Evitare la rottura del serbatoio nel caso di aumento della pressione
PRD	Serbatoio	Limitare il rischio di boil-off

Tabella 8. Caratteristiche di sicurezza per lo stoccaggio di idrogeno liquido.

Cosa	Dove	Perché
Monitoraggio della pressione e temperatura	Serbatoio	Rilevare difetto nell'isolamento
Monitoraggio del livello	Serbatoio	Evitare il sovra-riempimento
Disco di rottura	Serbatoio	Evitare la rottura del serbatoio nel caso di aumento della pressione
PRD	Serbatoio	Limitare il rischio di boil-off

Ringraziamenti

Si ringrazia il progetto HyResponse in quanto il materiale presentato in questa lezione è basato sulle lezioni del progetto HyResponse.

Bibliografia

1. Hydrogen refueling station analysis model (HRSAM). Argonne National Laboratory. <https://hdsam.es.anl.gov/index.php?content=hrsam> [access on 26.05.2021]
2. Gaseous hydrogen – Fuelling stations. Part 1: General requirements. BSI Standards Publication. BS ISO 19880-1: 2020.
3. Reddi K, Elgowainy A, Rustagi N, Gupta E. Impact of hydrogen refueling configurations and market parameters on the refueling cost of hydrogen. *Int J Hydrogen Energy* 2017;42:21855-21865.
4. Reddi K, Elgowainy A, Rustagi N, Gupta E. Impact of hydrogen SAE J2601 fueling methods on fueling time of light-duty fuel cell electric vehicles. *Int J Hydrogen Energy* 2017;42:16675-16685.
5. SAE (Society of Automotive Engineers). Fueling protocols for light duty gaseous hydrogen surface vehicles. Surface Vehicle Standard. J2601. July 2014.
6. Elgowainy A, Reddi K, Sutherland E, Joseck F. Tube-trailer consolidation strategy for reducing hydrogen refueling station costs. *Int J Hydrogen Energy* 2014;39:20197-20206.
7. NIST (National Institute of Standards and Technology). Thermophysical properties of fluid systems. 2016. Retrieved from: <http://webbook.nist.gov/chemistry/fluid/>. [Accessed 26 May 2021].