



European Train the Trainer Programme for Responders

## Lezione 1

# Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i vigili del fuoco

## LIVELLO I

### Vigile del Fuoco

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

La lezione è disponibile anche al livello 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; gli output del progetto HyResponse sono stati utilizzati come materiale di riferimento



### 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 fornisce un'introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i vigili del fuoco ed i soccorritori. L'idrogeno è stato ampiamente utilizzato a lungo nell'industria come gas compresso o in forma liquefatta. L'idrogeno non è più o meno pericoloso di altri combustibili comuni, ma è diverso, con proprietà e rischi specifici. Un uso crescente delle applicazioni FCH richiede una profonda comprensione dei processi, pericoli e rischi, caratteristiche e concetti di sicurezza, nonché personale professionalmente formato per affrontare possibili incidenti in modo sicuro. Tutto ciò richiede un cambiamento significativo nella cultura della sicurezza, soprattutto per i vigili del fuoco, che saranno i primi a far fronte a situazioni di emergenza che potrebbero coinvolgere idrogeno pressurizzato o liquefatto, sia all'interno che all'esterno, nelle aree residenziali urbane, sulle strade, zone periferiche e in molti altri ambienti diversi.

In questa lezione viene fornita una panoramica dei sistemi e delle infrastrutture FCH. Sono stati considerati potenziali pericoli, rischi e misure di sicurezza associati alle applicazioni FCH sia stazionarie che di trasporto. È stata inoltre fornita una panoramica dei principali usi dell'idrogeno, dei principali metodi di produzione, delle opzioni di stoccaggio e delle modalità di distribuzione.

Si ringrazia il progetto HyResponse poiché il materiale qui presentato è basato sulle lezioni originali di HyResponse (<http://www.hyresponse.eu>).

## Keywords

Celle a combustibile, idrogeno, produzione, stoccaggio, applicazioni, sicurezza dell'idrogeno

## Indice

Sommario .....	3
Keywords .....	3
1. Target audience.....	6
1.1 Descrizione del ruolo: Vigile del Fuoco .....	6
1.2 Livello di competenza: Vigile del Fuoco .....	6
1.3 Prerequisiti per l'apprendimento: Vigile del Fuoco.....	6
2. Introduzione, scopo e obiettivi.....	6
3. Panoramica della produzione, stoccaggio ed uso industriale dell'idrogeno .....	8
3.1 Produzione dell'idrogeno .....	8
3.2 Stoccaggio dell'idrogeno.....	9
3.3 Uso dell'idrogeno nell'industria.....	12
4. Veicoli a FC.....	13
4.1 Le caratteristiche fondamentali dei veicoli a FC.....	13
4.2 Auto a FC .....	14
4.2.1 Sistema di stoccaggio dell'idrogeno .....	15
4.2.2 Sistema di erogazione dell'idrogeno.....	15
4.2.3 Sistema FC.....	16
4.2.4 Propulsione elettrica e sistema di gestione della potenza .....	16
4.2.5 Caratteristiche e concetti di sicurezza.....	16
4.3 Autobus FC .....	18
4.4 Carrelli elevatori FC.....	21
4.5 Aviazione .....	23
5. Trasporto dell'idrogeno.....	24
5.1 Automezzi pesanti ( <i>Heavy goods vehicles</i> , HGV).....	25
5.1.1 Automezzi: trasporto di gas .....	25
5.1.2 Automezzi: trasporto di liquido criogenico .....	27
5.2 Treni .....	28
5.3 Gasdotti .....	29
6. Applicazioni stazionarie.....	30
6.1 Sistemi di cogenerazione di calore ed energia (CHP).....	30
6.2 Generazione di potenza di back-up .....	31
7. Applicazioni marittime.....	33
8. Sistemi di accumulo dell'energia basati su idrogeno.....	37

Lezione 1: Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i soccorritori

9.	Panoramica dei possibili incidenti.....	41
9.1	Incidenti con sistemi ed infrastrutture FCH .....	41
9.2	Incidenti durante la produzione di idrogeno .....	42
9.3	Incidente ad una stazione di rifornimento .....	43
10.	Introduzione ad e-Laboratory .....	43
	Bibliografia.....	45

## 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 (DPI), compresi autorespiratori (AR), 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 DPI, AR 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 (POS). È richiesta la capacità pratica di valutare dinamicamente il rischio per la propria sicurezza e quella 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, scopo e obiettivi

Le applicazioni delle celle a combustibile e dell'idrogeno (FCH) sono disponibili nel mercato odierno sia nel settore dei trasporti che in quello energetico, ed è abbastanza probabile che i vigili del fuoco si occuperanno di possibili incidenti/inconvenienti nel prossimo futuro. Lo sviluppo delle tecnologie FCH richiede una migliore e approfondita comprensione da parte dei vigili del fuoco dei pericoli, dei rischi, dei processi e delle caratteristiche di sicurezza associati ai sistemi e alle infrastrutture FCH. Una gran parte dei sistemi e applicazioni con idrogeno è ancora sconosciuta ai vigili del fuoco: la produzione di idrogeno mediante elettrolisi e reforming del gas naturale; applicazioni decentralizzate per la produzione di idrogeno; stoccaggio dell'idrogeno gassoso e liquefatto; applicazioni per il trasporto dell'idrogeno e la movimentazione dei materiali; veicoli a FC (es. auto, autobus, carrelli elevatori); stazioni di rifornimento di idrogeno; applicazioni stazionarie delle FC; i sistemi di accumulo di energia a

## Lezione 1: Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i soccorritori

base di idrogeno. Inoltre, mancano procedure standardizzate di intervento in caso di incidenti con i suddetti sistemi e infrastrutture.

Lo scopo di questa lezione è presentare ai Vigili del Fuoco una serie di applicazioni FCH, per familiarizzare con i rischi specifici e delineare i principali approcci dell'ingegneria della sicurezza dell'idrogeno. I Vigili del Fuoco dovrebbero rendersi conto che l'idrogeno non è più o meno pericoloso di qualsiasi altro combustibile comune. L'idrogeno è diverso e la conoscenza delle sue proprietà specifiche faciliterà il processo decisionale appropriato sulla scena di un incidente. I Vigili del Fuoco dovrebbero essere formati professionalmente per gestire sistemi a idrogeno a pressioni fino a 100 MPa e temperature fino a -253 °C (idrogeno liquefatto) sia all'aperto che al chiuso.

Questa lezione è la prima di una serie di lezioni e si basa sul materiale sviluppato e fornito nell'ambito del progetto HyResponse (<http://www.hyresponse.eu/>). Un curriculum internazionale per la formazione sulla sicurezza dell'idrogeno per i Vigili del Fuoco è stato inizialmente sviluppato all'interno del progetto HyResponse (<http://www.hyresponse.eu/curriculum.php>). Questo è stato il primo passo verso la creazione della piattaforma europea di formazione sulla sicurezza dell'idrogeno per i Vigili del Fuoco. Questo curriculum è stato ulteriormente sviluppato nell'ambito del progetto HyResponder (<https://hyresponder.eu>) per riflettere l'attuale stato dell'arte ed è stato ampliato per incorporare ulteriori dettagli su idrogeno liquefatto, spazi confinati, recipienti pressurizzati, ecc.

Gli allievi sono incoraggiati a utilizzare questo documento come a supporto ai loro studi e per cercare fonti per ulteriori informazioni.

Alla fine della lezione il Vigile del Fuoco /allievo sarà in grado di:

- Riconoscere la novità e benefici delle tecnologie FCH nella società moderna;
- Comprendere il ruolo dell'idrogeno come nuovo vettore energetico;
- Indicare le principali vie di produzione, trasporto, consegna e utilizzo dell'idrogeno;
- Riconoscere le difficoltà nella percezione pubblica delle tecnologie dell'idrogeno e delle celle a combustibile;
- Definire i principali metodi di produzione industriale dell'idrogeno. Sebbene questa lezione non sia progettata per fornire agli allievi una conoscenza approfondita di tutti i metodi di produzione, fornisce uno schema descrittivo di un *reformer*, PEM (membrana a scambio protonico) ed elettrolizzatori alcalini con un'enfasi posta su caratteristiche e concetti di sicurezza;
- Descrivere il principio di funzionamento di una cella a combustibile (FC) e di uno stack di celle a combustibile;
- Spiegare i principi operativi e gli aspetti di sicurezza di una gamma di applicazioni delle FCH tra cui veicoli a FC, stazioni di rifornimento, stoccaggio stazionario di

## Lezione 1: Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i soccorritori

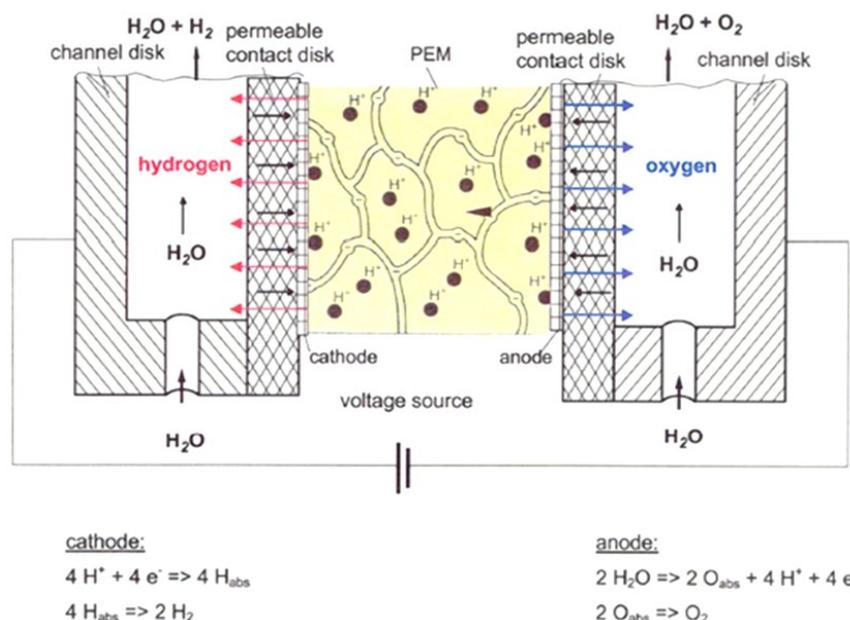
idrogeno, applicazioni per l'utilizzo e la distribuzione di idrogeno, generazione di energia di back-up e sistemi a FC per la produzione combinata di calore ed energia;

- Fornire esempi di incidenti che potrebbero verificarsi con le applicazioni FCH.

## 3. Panoramica della produzione, stoccaggio ed uso industriale dell'idrogeno

### 3.1 Produzione dell'idrogeno

Le molecole di idrogeno non possono essere trovate nella loro forma pura in natura. Pertanto, l'idrogeno deve essere prodotto dai composti in cui è contenuto, ad esempio da acqua, metano, metanolo, ammoniaca, etanolo, biomassa, ecc. La produzione di idrogeno può essere suddivisa in due categorie: produzione centralizzata su larga scala e produzione decentralizzata su piccola o media scala. La produzione centralizzata si riferisce a impianti chimici consolidati su larga scala, che producono idrogeno che viene poi trasportato ai clienti. In questo caso, l'idrogeno viene trasportato, a volte su lunghe distanze, tramite gasdotti, su strada o via nave. Alcuni esempi includono i grandi *steam reformer* (a vapore) di proprietà delle principali società del gas come Air Liquide, Linde, Air Products e altri. Esistono diverse tecnologie consolidate attualmente disponibili sul mercato per la produzione industriale di idrogeno. Esistono due vie commerciali per la produzione di idrogeno: l'elettrolisi dell'acqua (risalente alla fine del 1920) e le tecnologie di *reforming* (introdotte nel 1960). L'elettrolisi dell'acqua è un processo in cui l'acqua viene scissa in idrogeno e ossigeno utilizzando energia elettrica come mostrato nell'equazione (1):



Fonte: Areva, 2015.

Figura 1. Principio di funzionamento di un elettrolizzatore PEM – *channel disk*: disco del canale; *permeable contact disk*: disco di contatto permeabile; *cathode*: catodo; *anode*: anodo.

## Lezione 1: Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i soccorritori

I meccanismi dell'elettrolisi dell'acqua con membrana a scambio protonico (PEM) sono mostrati nella [Figura 1](#). Nella PEM, l'acqua viene scissa elettrochimicamente in idrogeno al catodo e ossigeno all'anodo. Durante il funzionamento dell'elettrolizzatore PEM, l'acqua viene pompata nei canali dell'anodo dove viene scissa in ossigeno, protoni ed elettroni. I protoni viaggiano attraverso la membrana PEM tra l'anodo e il catodo e arrivano al lato del catodo. Gli elettroni viaggiano dall'anodo al catodo attraverso il circuito di alimentazione esterno, che fornisce la forza motrice, cioè il voltaggio di cella (*voltage source* in [Figura 1](#)), per la reazione. Al catodo, protoni ed elettroni si ricombinano per produrre idrogeno.

La formazione di un'atmosfera esplosiva (ATEX) idrogeno-ossigeno nel separatore può essere causata da un malfunzionamento della linea di trasferimento dell'acqua o da una perforazione della membrana. Le seguenti misure di sicurezza sono usate per evitare la formazione di un'ATEX nel separatore:

- imporre un livello minimo dell'acqua nel separatore di gas superiore al 55% della sua altezza;
- controllare il livello dell'acqua nei separatori di gas H<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>;
- controllare la pressione e la differenza di pressione tra le linee H<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>;
- controllare la concentrazione di idrogeno all'uscita del separatore di gas ossigeno.

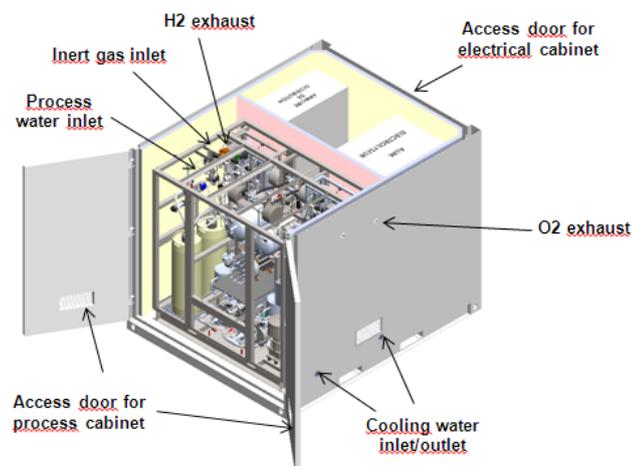


Figura 2. Schema di un elettrolizzatore con PEM [1]. *Access door for process cabinet*: porta di accesso al container di processo; *cooling water inlet/outlet*: entrata/uscita dell'acqua di raffreddamento; *O<sub>2</sub> exhaust*: gas esausti di O<sub>2</sub>; *access door for electrical cabinet*: porta di accesso per il container elettrico; *H<sub>2</sub> exhaust*: gas esausti di H<sub>2</sub>; *inert gas inlet*: entrata del gas inerte; *process water inlet*: entrata per l'acqua di processo.

### 3.2 Stoccaggio dell'idrogeno

Questa sezione fornisce una panoramica delle opzioni di stoccaggio dell'idrogeno. Le perdite di idrogeno, gli incendi e le esplosioni, nonché l'interazione dell'idrogeno con i materiali utilizzati per lo stoccaggio sono estremamente rilevanti e verranno trattati nelle lezioni

## Lezione 1: Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i soccorritori

successive. Lo stoccaggio dell'idrogeno è una tecnologia abilitante per una vasta gamma di applicazioni FCH, dallo stoccaggio a bordo dei veicoli a FC alle applicazioni stazionarie delle FC. Non esiste una soluzione di immagazzinamento universale che possa essere installata su tutti i sistemi. Una soluzione di stoccaggio dell'idrogeno deve essere selezionata per adattarsi all'applicazione specifica. Ad esempio, le dimensioni e il peso sono fattori limitanti per i veicoli di passeggeri, mentre il peso può essere un fattore desiderabile per i carrelli elevatori. Le soluzioni di stoccaggio sono una delle sfide chiave per l'economia dell'idrogeno e queste tecnologie sono oggetto di notevole interesse sia da parte della comunità scientifica che industriale.

Lo stoccaggio di grandi quantità di idrogeno per lunghi periodi di tempo è un passo fondamentale nella costruzione dell'infrastruttura FCH, che regolerà il consumo e la produzione di idrogeno e garantirà la continuità della fornitura ai clienti. Sono stati studiati vari schemi di stoccaggio dell'idrogeno sotterraneo. Un'opzione include lo stoccaggio di idrogeno gassoso in formazioni geologiche come giacimenti di gas esauriti, falde acquifere o caverne di sale. Un'altra opzione è lo stoccaggio sotterraneo in serbatoi interrati e l'idrogeno viene immagazzinato come gas compresso o in forma liquida. Lo stoccaggio geologico è solitamente situato vicino a un sito di produzione di idrogeno, mentre i serbatoi interrati sono più vicini al punto di utilizzo, ad esempio alle stazioni di rifornimento. Sono disponibili numerose tecnologie di stoccaggio dell'idrogeno e potrebbero essere classificate nei seguenti gruppi:

- Stoccaggio di H<sub>2</sub> gassoso compresso
- Stoccaggio di H<sub>2</sub> liquefatto
- Stoccaggio allo stato solido

Il modo più comune per immagazzinare l'idrogeno come gas compresso o come liquido criogenico è in bombole o serbatoi metallici o compositi (Figura 3). La tecnologia criocompressa è un'altra utile alternativa che consiste nello stoccaggio di idrogeno gassoso ad alta pressione e bassa temperatura. Le bombole possono avere diverse dimensioni, capacità (da 20 a 300 L) e pressioni (20-70 MPa) e per alcune applicazioni possono essere assemblate in un fascio o raggruppate in pacchi bombole per il trasporto.



a



b



c

Lezione 1: Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i soccorritori

Figura 3. Stoccaggio di idrogeno a bordo di veicoli (a), fascio di bombole (b) pacchi bombole per il trasporto (c).

L'idrogeno può essere compresso a 20-100 MPa. I problemi principali dello stoccaggio di idrogeno come gas compresso sono la quantità di energia necessaria per il processo di compressione, i problemi di sicurezza inerenti allo stoccaggio dell'idrogeno a pressioni elevate, i costi aggiuntivi ed il peso delle bombole progettate per immagazzinare l'idrogeno ad alte pressioni. Problemi come la permeazione e l'infragilimento sono proporzionali alla pressione del gas, quindi a pressioni più elevate questi possono presentare un problema maggiore. In Europa, la maggior parte delle bombole trasportabili ha solo una valvola di sicurezza. Negli USA le bombole trasportabili sono dotate di dispositivi di limitazione della pressione. Questa prescrizione è molto controversa perché spesso tali dispositivi diventano fonti di perdite. Lo stoccaggio di idrogeno come gas compresso è solitamente integrato nei sistemi di stoccaggio di idrogeno stazionari e per lo stoccaggio di idrogeno a bordo dei veicoli a FC [1].

L'idrogeno criogenico si ottiene quando viene raffreddato a una temperatura inferiore al suo punto di ebollizione 20 K (-253 °C) ed è la seconda categoria principale di stoccaggio dell'idrogeno. In questa forma l'idrogeno può essere immagazzinato per un certo periodo di tempo o trasportato. Questa opzione di stoccaggio è anche molto costosa a causa della notevole energia richiesta per la liquefazione. Devono essere considerati anche il costo ed il peso dei materiali idonei per immagazzinare e mantenere l'idrogeno a basse temperature. L'idrogeno può anche essere immagazzinato all'interno della struttura o sulla superficie di alcuni materiali solidi. Questa tecnologia di stoccaggio non richiede né alte pressioni né basse temperature come nei due metodi precedenti e pertanto offre vantaggi per quanto riguarda la sicurezza dei materiali. Esistono tre meccanismi principali per immagazzinare l'idrogeno in materiali solidi: assorbimento, adsorbimento (Figura 4a) e reazioni chimiche (Figura 4, b-d). Gli esempi di materiali e composti adatti per lo stoccaggio dell'idrogeno allo stato solido sono mostrati di seguito nella Figura 4.

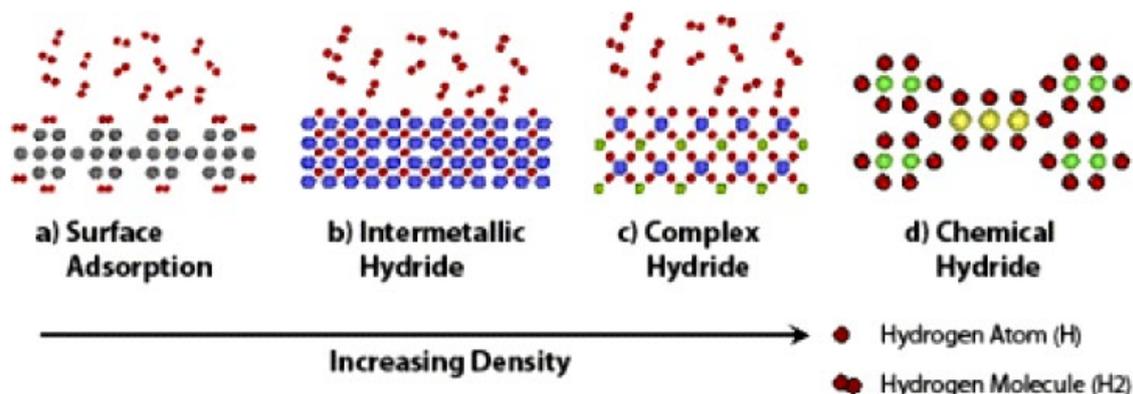


Figura 4. Materiali utilizzati per lo stoccaggio solido dell'idrogeno [2]. a) adsorbimento; b) idruro intermetallico; c) idruro complesso; d) idruro chimico.

## Lezione 1: Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i soccorritori

Tutte e tre queste opzioni hanno i loro vantaggi e svantaggi; anche i problemi di sicurezza sono diversi e saranno considerati in dettaglio nella Lezione 3 sulla "Sicurezza dello stoccaggio dell'idrogeno". I sistemi di stoccaggio dell'idrogeno possono essere utilizzati per diversi scopi: come contenitori per il suo trasporto; come sistemi di stoccaggio fissi in loco (sotto o fuori terra) o come serbatoi di stoccaggio a bordo dei veicoli a FC.

### 3.3 Uso dell'idrogeno nell'industria

L'idrogeno è stato utilizzato nell'industria e stoccato in modo sicuro come gas compresso o liquefatto da oltre 100 anni. L'idrogeno è ampiamente utilizzato per una vasta gamma di applicazioni, tra cui: raffinazione del petrolio greggio; come refrigerante nei grandi generatori elettrici a turbina; come propellente nella propulsione di razzi e applicazioni missilistiche; durante la produzione di ammoniaca per i fertilizzanti; nella metallurgia per estrarre metalli puri dai loro minerali; nell'industria dei semiconduttori, del vetro, farmaceutica, petrolchimica, chimica e alimentare; ecc. Le statistiche sugli incidenti legati all'idrogeno indicano che attualmente gli incidenti che si verificano nei laboratori sono i più frequenti (circa il 32 %) [3]. Il basso tasso di incidenti può essere spiegato dalle rigide misure di sicurezza già in atto per la produzione e l'uso finale dell'idrogeno. Tuttavia, questa tendenza potrebbe cambiare nei prossimi anni a causa dell'espansione delle applicazioni FCH in ambito pubblico e dell'uso più frequente delle tecnologie FCH da parte di privati senza una formazione specifica sulla sicurezza. L'analisi degli incidenti mostra anche che di tutti gli incidenti che sono avvenuti fino ad oggi solo una piccola percentuale ha registrato la perdita di vite umane (4,6%) [4]. Sebbene i problemi di sicurezza dell'idrogeno siano stati controllati in modo efficiente nel settore fino ad oggi, saranno necessari ulteriori approcci di sicurezza, in particolare per quanto riguarda le procedure di intervento di emergenza sia nel settore dei trasporti che dei combustibili residenziali, principalmente a causa delle alte pressioni utilizzate per lo stoccaggio dell'idrogeno. L'idrogeno non è più o meno pericoloso di altri combustibili infiammabili tra cui benzina e gas naturale. Infatti, alcune delle sue proprietà come la bassa densità offrono vantaggi in termini di sicurezza rispetto ad altri combustibili. Tuttavia, tutti i combustibili infiammabili devono essere gestiti in modo responsabile. Come la benzina e il gas naturale, l'idrogeno è infiammabile e può comportarsi pericolosamente in determinate condizioni. L'idrogeno può essere gestito in sicurezza se vengono rispettate semplici linee guida e l'utente ha un buon livello di conoscenza delle sue caratteristiche uniche. La comprensione delle proprietà specifiche dell'idrogeno e la conoscenza delle applicazioni FCH porta a un'implementazione sicura dell'idrogeno come combustibile. È necessario stabilire una nuova cultura della sicurezza nella nostra società, sviluppare strategie di sicurezza e soluzioni ingegneristiche innovative. Si ritiene che il livello di sicurezza del consumatore nell'utilizzo dell'idrogeno debba essere simile o superiore a quello corrente con l'utilizzo di combustibili fossili. Pertanto, i parametri di sicurezza dell'idrogeno e dei prodotti a celle a combustibile definiranno direttamente la loro competitività sul mercato [5].

## 4. Veicoli a FC

Le tecnologie a FCH per veicoli stradali e speciali sono oggi di grande importanza. Alcune case automobilistiche, come la Toyota, hanno già avviato la vendita di veicoli a FCH nelle regioni in cui sono già presenti infrastrutture di rifornimento. Gli esempi di veicoli stradali includono autovetture, autobus, scooter, autocarri leggeri, ecc. Tali veicoli sono alimentati ad idrogeno, ma non hanno motori a combustione interna in quanto viene invece utilizzato un motore elettrico che sfrutta l'elettricità generata dalla cella a combustibile. La disponibilità dell'infrastruttura è un passo fondamentale verso il successo commerciale di questi prodotti. Questi veicoli in apparenza sono simili ai veicoli convenzionali, ma a differenza dei veicoli convenzionali, non emettono sostanze inquinanti e sono molto silenziosi durante il funzionamento. Un'altra importante applicazione sono i veicoli speciali. I veicoli speciali sono progettati per scopi specifici e di solito operano in flotte. I carrelli elevatori a FC sono un esempio di veicoli speciali. Questo tipo di veicoli richiede una potenza da 1,5 a 10 kW. Al momento molte aziende private stanno investendo in una flotta di carrelli elevatori a FC e nell'infrastruttura di rifornimento poiché traggono vantaggio dal loro utilizzo quasi immediatamente.

### 4.1 Le caratteristiche fondamentali dei veicoli a FC

Le auto a FC hanno una trasmissione elettrica alimentata da una FC che genera elettricità in una reazione elettrochimica utilizzando l'idrogeno. Sebbene esista un'ampia varietà di prototipi di auto a FC, le seguenti caratteristiche (Figura 5) sono comuni per la maggior parte di esse [6]:

- Sistema di alimentazione ad idrogeno;
- Sistema di stoccaggio dell'idrogeno;
- Sistema di erogazione dell'idrogeno;
- Sistema FC;
- Sistema di propulsione elettrica e di gestione della potenza.

Durante il rifornimento, l'idrogeno viene fornito all'auto attraverso il bocchettone di riempimento (A - *fueling receptacle*) e fluisce nel sistema di stoccaggio dell'idrogeno (B - *hydrogen storage*). L'idrogeno viene fornito e immagazzinato all'interno del sistema di stoccaggio dell'idrogeno, solitamente in forma gassosa compressa. Quando un'auto a FC si avvia, l'idrogeno viene rilasciato dal sistema di stoccaggio. I regolatori di pressione (*regulator*) e altre apparecchiature all'interno del sistema di erogazione dell'idrogeno (C - *hydrogen delivery system*) riducono la pressione al livello appropriato per il funzionamento della FC. L'idrogeno viene combinato elettrochimicamente con l'ossigeno nel sistema FC (D - *Fuel Cell system*) per produrre energia elettrica ad alta tensione. Tale energia elettrica viene fornita al sistema di gestione della potenza di propulsione elettrica (E - *electric propulsion power*).

## Lezione 1: Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i soccorritori

*management*) dove viene utilizzata per alimentare i motori di azionamento elettrico o caricare batterie (*batteries*) e ultra-condensatori (*ultra capacitors*).

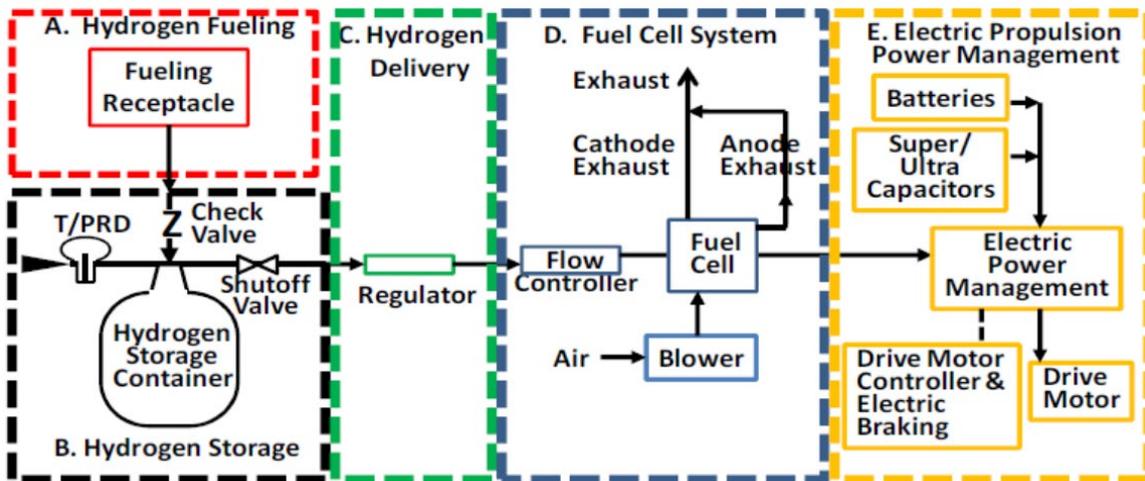


Figura 5. I sistemi caratteristici di un'auto a FC [6]. *Check valve*: valvola di non ritorno; *shut-off valve*: valvola di intercettazione; *flow controller*: controllore del flusso; *blower*: aspiratore; *exhaust*: gas di scarico; *drive motor controller & electric braking*: controller del motore di azionamento e frenatura elettrica.

### 4.2 Auto a FC

La Figura 6 illustra un layout tipico dei componenti chiave di una tipica automobile a FC [6]. Il bocchettone di riempimento (*fueling receptacle*) è posizionato sul pannello posteriore della vettura come in altri veicoli comuni. Come per i sistemi a benzina, i serbatoi di stoccaggio dell'idrogeno (*hydrogen storage*) sono generalmente montati trasversalmente nella parte posteriore dell'auto, ma potrebbero anche essere montati in modo diverso, ad esempio longitudinalmente nel tunnel centrale dell'auto. Le celle a combustibile e gli accessori (*Fuel Cell and auxiliaries*) si trovano solitamente sotto l'abitacolo insieme al sistema di gestione della potenza (*electric power management*), al controller e al motore di azionamento (*Drive motor*). Date le dimensioni e il peso delle batterie di trazione (*batteries*) e degli ultra-condensatori (*capacitors*), questi componenti vengono solitamente posizionati in maniera tale da mantenere il bilanciamento del peso desiderato nell'auto.

L'idrogeno può essere fornito all'auto presso una stazione di rifornimento. Attualmente, l'idrogeno viene più comunemente erogato alle auto come gas compresso pressurizzato fino al 125% della pressione di esercizio nominale (NWP) dell'auto per compensare il riscaldamento transitorio dovuto alla compressione adiabatica durante il rifornimento.

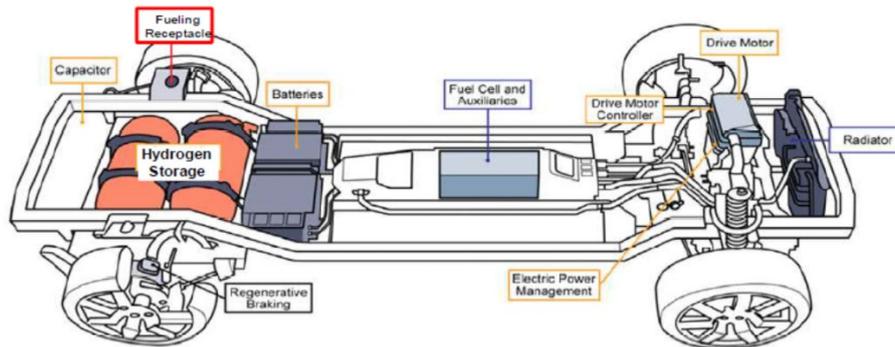


Figura 6. Esempio di auto a FC [6]. *Regenerative braking*: freno rigenerativo; *radiator*: radiatore.

#### 4.2.1 Sistema di stoccaggio dell'idrogeno

Le funzioni chiave del sistema di stoccaggio dell'idrogeno sono ricevere l'idrogeno durante il rifornimento, contenerlo fino al momento del bisogno e rilasciare l'idrogeno al sistema FC per l'utilizzo nell'alimentazione dell'auto. Attualmente, il metodo più comune per immagazzinare e fornire idrogeno a bordo è sotto forma di gas compresso ( $\text{CGH}_2$ ). Serbatoi di gas compresso a 700 bar leggeri in peso sono stati sviluppati per aumentare la capacità di stoccaggio. Sono costituiti da un rivestimento metallico (Tipo III) o polimerico (Tipo IV) posto in una struttura composita rinforzata con fibre (Figura 7). Ulteriori ricerche sono in corso per ridurre i costi di questi serbatoi. Maggiori informazioni relative ai sistemi di stoccaggio dell'idrogeno a bordo delle auto saranno disponibili nelle lezioni successive.



Figura 7. Prototipi di serbatoi a 700 bar sviluppati e testati nell'ambito del progetto Europeo STORHY: (a) Tecnologia tipo III, (b) Tecnologia tipo IV.

#### 4.2.2 Sistema di erogazione dell'idrogeno

Il sistema di erogazione dell'idrogeno trasferisce il gas dal sistema di stoccaggio al sistema di propulsione alla pressione e alla temperatura adeguate per il funzionamento della FC. Ciò si ottiene tramite una serie di valvole di controllo del flusso, regolatori di pressione, filtri, linee del carburante (tubi) e scambiatori di calore. La maggior parte delle linee di erogazione del carburante sono di colore argento, ma a volte potrebbero essere rosse. Se il serbatoio viene chiuso a causa di un incidente, in queste linee sarà presente solo una piccola quantità di idrogeno. Tuttavia, i vigili del fuoco non dovrebbero tagliare le tubazioni del carburante durante le procedure di estrazione.

### 4.2.3 Sistema FC

Il sistema FC genera l'elettricità necessaria per azionare i motori di azionamento e per caricare le batterie e/o i condensatori del veicolo. Esistono diversi tipi di FC, ma le celle a combustibile PEM sono tipicamente utilizzate nelle applicazioni automobilistiche per la loro temperatura di funzionamento più bassa che consente tempi di avviamento più brevi. Le celle a combustibile PEM combinano elettrochimicamente idrogeno e ossigeno per generare energia elettrica. Le celle a combustibile sono in grado di generare energia elettrica continua se alimentate con idrogeno e ossigeno, generando contemporaneamente elettricità e acqua senza produrre anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) o altre emissioni nocive tipiche dei motori a combustione interna alimentati a benzina/diesel. In generale, le pile a combustibile in un autoveicolo generano una tensione di circa 400 V CC. Un convertitore collega poi la cella a combustibile con la batteria ad alta tensione. La temperatura di esercizio della FC è molto più bassa rispetto a quella del motore a combustione interna in quanto è più efficiente.

### 4.2.4 Propulsione elettrica e sistema di gestione della potenza

L'energia elettrica generata dal sistema FC (stack FC) viene utilizzata per azionare il motore elettrico che muove il veicolo, nonché per alimentare il motore della pompa dell'aria e il motore dell'aria condizionata. Molte autovetture a FC sono a trazione anteriore con il motore di azionamento elettrico e la trasmissione situata nel "vano motore" montata trasversalmente all'asse anteriore; tuttavia, anche altre configurazioni e la trazione posteriore sono opzioni praticabili. Le auto a FC più grandi, tipo SUV, possono essere a trazione integrale con motori elettrici sull'asse anteriore e posteriore o con motori compatti su ciascuna ruota. Il pacco batteria ad alta tensione è solitamente collocato in una custodia di metallo e montato saldamente nel telaio. Diversi veicoli a FC utilizzano diversi tipi di batterie come quelle in nichel idruro metallico o agli ioni di litio. Altri componenti ad alta tensione possono includere un contattore FC, un'unità di controllo della tensione della batteria, un convertitore CC-CC, un'unità di alimentazione e un riscaldatore elettrico. L'elettricità dallo stack di FC e dalla batteria ad alta tensione viene fornita ai motori attraverso una serie di cavi, che si trovano tipicamente all'interno o dietro i componenti chiusi ad alta tensione e sotto il veicolo. Possono essere facilmente identificati attraverso le distinte coperture protettive arancioni.

### 4.2.5 Caratteristiche e concetti di sicurezza

Nelle stazioni di rifornimento le vetture a FC vengono rifornite attraverso uno speciale ugello sull'erogatore di carburante che si collega con il bocchettone di riempimento sull'auto per fornire un "sistema chiuso" di trasferimento di idrogeno all'auto. Il bocchettone di riempimento sull'auto a FC contiene una valvola di non ritorno o un altro dispositivo che impedisce la fuoriuscita di idrogeno dall'auto quando l'ugello di rifornimento è scollegato.

I componenti di un tipico sistema di stoccaggio dell'idrogeno compresso sono mostrati nella [Figura 8](#). Il sistema include il serbatoio e tutti gli altri componenti che formano il "perimetro

## Lezione 1: Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i soccorritori

di pressione primario" che impedisce all'idrogeno di fuoriuscire dal sistema. Ci sono tre dispositivi di sicurezza nel sistema di stoccaggio dell'idrogeno compresso:

- Una valvola di non ritorno (*check valve*);
- Una valvola di intercettazione (*shut-off valve*);
- Un dispositivo di limitazione della pressione ad attivazione termica (TPRD).

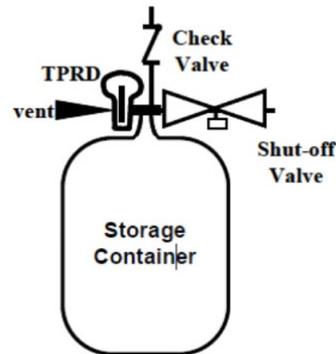


Figura 8. Tipico sistema di stoccaggio dell'idrogeno compresso [6].

Durante il rifornimento, l'idrogeno entra nel sistema di stoccaggio attraverso una valvola di non ritorno. Questa impedisce il riflusso di idrogeno nelle linee di alimentazione. Una valvola di intercettazione automatica dell'idrogeno impedisce il deflusso dell'idrogeno immagazzinato quando l'auto non è in funzione o quando viene rilevato un guasto che richiede l'isolamento del sistema di stoccaggio dell'idrogeno. In caso di incendio, i dispositivi di limitazione della pressione attivati termicamente (TPRD) forniscono un rilascio controllato del gas dai serbatoi di stoccaggio dell'idrogeno compresso prima che le alte temperature dell'incendio indeboliscano le pareti dei serbatoi e causino la loro rottura. I TPRD sono progettati per sfiatare rapidamente l'intero contenuto del contenitore. Non si richiudono né consentono la ri-pressurizzazione del contenitore. I serbatoi di stoccaggio e i TPRD che sono stati soggetti a un incendio dovrebbero essere rimossi e distrutti. L'idrogeno viene solitamente (ma non sempre) scaricato all'esterno del veicolo a FC attraverso una linea di sfiato. La posizione esatta di queste linee di sfiato dipende dal produttore del veicolo e dal suo modello, ma di solito si trova nella parte posteriore del veicolo, vicino al serbatoio dell'idrogeno [6].

Il sistema di erogazione del carburante deve ridurre la pressione dai livelli nel sistema di stoccaggio dell'idrogeno ai valori richiesti dal sistema di celle a combustibile. Nel caso di un sistema di stoccaggio dell'idrogeno compresso da 70 MPa NWP, ad esempio, potrebbe essere necessario ridurre la pressione da un massimo di 87,5 MPa a meno di 1 MPa all'ingresso del sistema di celle a combustibile. Ciò può richiedere più fasi di regolazione della pressione per ottenere un controllo accurato e stabile, ed una protezione da sovrappressione delle apparecchiature a valle in caso di guasto del regolatore di pressione. La protezione da sovrappressione del sistema di erogazione del carburante può essere ottenuta scaricando l'idrogeno in eccesso attraverso valvole limitatrici di pressione o isolando l'alimentazione del

## Lezione 1: Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i soccorritori

gas idrogeno (chiudendo la valvola di intercettazione nel sistema di stoccaggio dell'idrogeno) quando viene rilevata una condizione di sovrappressione a valle [6]. Un certo numero di sensori di idrogeno si trovano nei veicoli a FC. Quando viene rilevata una perdita di idrogeno potenzialmente pericolosa, il sistema di controllo del sistema interrompe automaticamente il flusso di idrogeno dal serbatoio. Ci sono diverse aree in cui è possibile trovare i sensori: sul pannello della strumentazione; accanto ai serbatoi di stoccaggio dell'idrogeno; vicino a un tubo di scarico; sotto il cofano; sopra il rivestimento dell'abitacolo passeggeri, ecc. Quando il sistema di propulsione è "ON", questi sensori monitorano continuamente la concentrazione di idrogeno in queste aree. Ad esempio, secondo la SOP US Vigili del Fuoco (procedura operativa standard), quando viene rilevato idrogeno a un "Livello di allerta" il conducente verrà avvisato dall'icona "H<sub>2</sub>" situata nel quadro strumenti ed il Driver's Information Center (DIC) mostrerà un messaggio "H<sub>2</sub> Detected" (H<sub>2</sub> rilevato). Se viene rilevato idrogeno a un "Livello di allarme", l'icona "H<sub>2</sub>" lampeggerà, verrà emesso un segnale acustico e sul DIC [7] verrà visualizzato il messaggio "H<sub>2</sub> rilevato – Evacuare il veicolo". Vale la pena notare che diversi standard di livelli di pericolo sono stati applicati in diversi paesi sebbene le SOP generali fossero simili. Diverse concentrazioni di idrogeno attiveranno i diversi livelli di allarme nei diversi paesi.

### 4.3 Autobus FC

Gli autobus FC utilizzano la stessa tecnologia delle auto FC. L'idrogeno viene immagazzinato in serbatoi solitamente situati sul tetto dell'autobus. La capacità totale è di circa 40 chilogrammi. Lo stack di celle a combustibile si trova nel vano motore posteriore. Lo stack di celle a combustibile per autobus è più grande di quello per auto FC e genera una tensione maggiore, di circa 600 V. I principali vantaggi degli autobus FC rispetto a quelli convenzionali sono il ridotto inquinamento; minore concentrazione di gas serra; maggiore efficienza energetica e un funzionamento più silenzioso. Esiste una serie di progetti europei associati al trasporto a base di idrogeno. Ad esempio, Clean Energy Partnership (CEP) [8] è il progetto che mira a testare e dimostrare l'uso delle tecnologie FCH nelle applicazioni di trasporto. CEP, fondata nel 2002, è una cooperazione internazionale di 18 partner tra cui le principali case automobilistiche come BMW Group, Honda, Daimler, Ford, Hyundai, GM/Opel, Toyota e Volkswagen. Nel 2011 il CEP è passato alla sua terza fase "Preparazione del mercato". Un altro progetto è HyFLEET: CUTE, che mira a sviluppare e gestire la più grande flotta al mondo di autobus FC. Il progetto HyFLEET: CUTE ha coinvolto l'operazione di 47 autobus alimentati a idrogeno nel regolare servizio di trasporto pubblico in 10 città in tre continenti (Amsterdam, Barcellona, Pechino, Amburgo, Londra, Lussemburgo, Madrid, Perth, Reykjavík) [9]. Questi autobus sono riusciti a fornire dati preziosi a sviluppatori e operatori poiché vengono utilizzati in condizioni difficili, con funzionamento ininterrotto e condizioni climatiche estreme. Un altro aspetto importante di questo progetto è stato quello di familiarizzare il pubblico con questa nuova tecnologia e ottenere così l'accettazione pubblica della sua introduzione [9]. Londra ha ora una flotta di 8 autobus FC che circolano sulla rotta RV1 tra Covent Garden e Tower Gateway (Figura 9). Un progetto FCH JU (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking), della

## Lezione 1: Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i soccorritori

durata di sei anni, JIVE (Joint Initiative for Hydrogen Vehicles in Europe), avviato a gennaio 2017, mira a implementare 139 nuovi autobus a celle a combustibile a emissioni zero e le relative infrastrutture di rifornimento in cinque paesi. Un progetto successivo, JIVE2, iniziato a gennaio 2018, combinato con il progetto JIVE, dispiegherà quasi 300 autobus a celle a combustibile in 22 città in tutta Europa entro i primi anni 2020, la più grande distribuzione in Europa fino ad oggi (<https://www.fuelcellbuses.eu/public-transport-hydrogen/jivejive2mehrlin-leaflet>).



Figura 9. Autobus alimentato ad idrogeno Wright Pulsar 2 sul percorso RV1 a Londra.

“Gli autobus FC si sono evoluti sostanzialmente negli ultimi decenni. Sono state utilizzate diverse configurazioni di progettazione, tra cui l'idrogeno nei motori a combustione interna e varie tecnologie di celle a combustibile. Inoltre, le aziende hanno utilizzato sistemi di azionamento diretto e sistemi di azionamento ibridi, in cui un dispositivo di accumulo di energia (batteria o ultra-condensatore) è incluso all'interno della trasmissione per ridurre i picchi di carico e consentire la frenata rigenerativa” [10]. Un breve confronto tra le principali tecnologie di autobus a idrogeno è presentato nella rassegna svolta nell'ambito del progetto NextHyLights [10]. La Figura 10 mostra un layout del bus FC "All American" di SunLine [11]. In questo esempio l'idrogeno è immagazzinato come gas compresso ( $CGH_2$ ). Adams [12] ha svolto una ricerca esaminando la pressione ottimale di stoccaggio a bordo richiesta dagli autobus dotati di serbatoi  $CGH_2$ . Si è concluso che è necessario un dispositivo di limitazione della pressione di stoccaggio a bordo standardizzato per garantire che un veicolo non venga rifornito a una pressione superiore alla pressione di stoccaggio per la quale è stato progettato. Questa standardizzazione sarebbe necessaria anche per ridurre i costi di sviluppo del sistema non necessari per i veicoli e la relativa infrastruttura di rifornimento, nonché per ridurre il rischio di danneggiare le interfacce di rifornimento a causa dell'incompatibilità. L'energia di compressione all'interno del gas in un contenitore aumenta per una data massa di idrogeno all'aumentare della pressione di stoccaggio; pertanto, l'improvvisa espansione del gas dovuta alla rottura del contenitore potrebbe avere gravi conseguenze che aumenterebbero con pressioni più elevate. Quindi, quando si considerano i sistemi di stoccaggio per gli autobus, dove il

## Lezione 1: Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i soccorritori

volume non è un vincolo così critico come nelle automobili, le pressioni ottimali per gli autobus urbani a piano singolo non articolati sono risultate comprese tra 20 e 35 MPa [12].

I dispositivi di sicurezza utilizzati negli autobus FC sono simili a quelli utilizzati nelle auto FC. Il dispositivo di limitazione della pressione (PRD) è un dispositivo attivato termicamente non richiudibile progettato per proteggere un serbatoio di idrogeno pressurizzato da una rottura catastrofica nel caso in cui si verificasse una situazione di emergenza come un incendio. Viene utilizzato per garantire che l'impatto termico causato dalle fiamme non aumenti la pressione nel serbatoio di stoccaggio oltre la sua capacità strutturale. Va notato, tuttavia, che gli incendi che provocano l'apertura di un PRD potrebbero non provocare l'accensione immediata dell'idrogeno al momento del rilascio. I serbatoi di idrogeno sono dotati di un dispositivo di limitazione della pressione ad attivazione termica (TPRD) e di tubazioni del carburante e di sfiato in acciaio inossidabile. C'è un pulsante del dispositivo di arresto di emergenza (ESD) situato sul pannello del conducente e uno sulla cella a combustibile stessa nel vano motore.

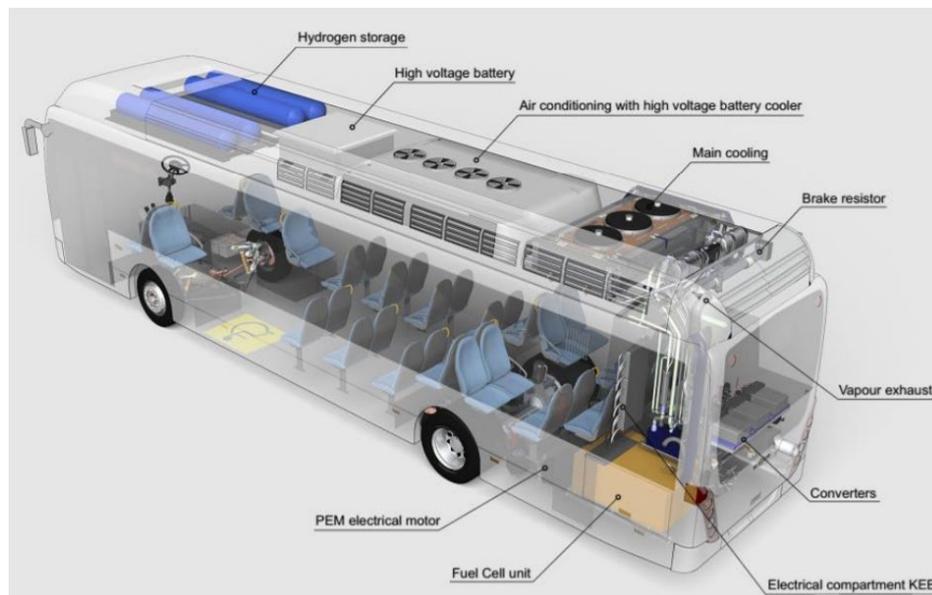


Figura 10. Layout dei componenti principali di un autobus FC [11]. Componenti in senso orario: stoccaggio dell'idrogeno; batteria ad alta tensione; Raffreddamento dell'aria condizionata con batteria ad alta tensione; raffreddamento principale; resistore dei freni; vapori esausti; convertitori; compartimento elettrico KEB; unità fuel cell; motore elettrico della PEM.

I Vigili del Fuoco devono imparare come trattare i veicoli FC in caso di incidenti stradali. I principali pericoli sono associati all'alta tensione (fino a 600 V) e alle alte pressioni del gas (fino a 70 MPa). Per i diversi tipi di veicoli stradali il regolamento EC79/2009 in combinazione con EC406/2010 richiede l'etichettatura dei veicoli FC: per i veicoli leggeri l'etichetta deve essere posizionata in modo visibile vicino al recipiente di rifornimento (un'altra etichetta dovrebbe essere all'interno del vano motore). Sono in corso lavori di aggiornamento delle linee guida in questo campo e si consiglia ai soccorritori di confermare i requisiti per l'etichettatura, ad es. UN ECE Working Group 13 (<https://unece.org/wp29-introduction>).

## Lezione 1: Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i soccorritori

Le schede tecniche di soccorso dovrebbero essere disponibili per tutti i veicoli FC e dovrebbero essere trovate a bordo del veicolo. Idealmente, i vigili del fuoco avranno accesso a queste informazioni tramite collegamenti di comunicazione. Tuttavia, si noti che i livelli di accesso variano in modo significativo e potrebbe non essere sempre possibile. I parametri di identificazione del veicolo dovrebbero anche contenere tutte le caratteristiche di alta tensione e alta pressione che informano i vigili del fuoco con largo anticipo. Analogamente ai veicoli ad alimentazione convenzionale, i seguenti componenti possono rappresentare un pericolo per i vigili del fuoco in caso di incidente stradale: paraurti; ammortizzatori; pneumatici; cofano e montanti del bagagliaio; airbag; pretensionatori delle cinture di sicurezza; sistema di aria condizionata; batterie. Si prega di notare che la disconnessione di un cavo a bassa tensione isolerà e spegnerà tutti i sistemi del veicolo (ad es. serbatoio dell'idrogeno, sistemi ad alta e bassa tensione) in un veicolo FC.

### 4.4 Carrelli elevatori FC

Molte aziende con grandi magazzini o centri di distribuzione attualmente utilizzano carrelli elevatori FC per spostare le merci in operazione 24 ore su 24, 7 giorni su 7 [1]. I carrelli elevatori FC sono veicoli ibridi che accoppiano una cella a combustibile, solitamente da 1,5 a 10 kW, con una batteria. Le bombole di idrogeno sono stoccate all'esterno della struttura/magazzino. L'idrogeno viene consegnato al sito da un fornitore di gas industriale o prodotto in loco utilizzando il reforming del gas naturale o metodi di elettrolisi dell'acqua. Il rifornimento di un carrello elevatore FC con idrogeno avviene principalmente all'interno (ma sono possibili anche distributori all'aperto) e richiede solo pochi minuti. Rispetto ai veicoli speciali alimentati a batteria, i carrelli elevatori FC hanno una durata maggiore; hanno più potenza per un periodo di tempo più lungo e possono essere riforniti in meno di 3 minuti. Un altro punto a favore dei carrelli elevatori FC sono i costi operativi inferiori e l'aumento della produttività grazie a un numero inferiore di viaggi verso una stazione di ricarica della batteria. Dal momento che non sono necessari caricabatterie, depositi o aree di cambio batterie, è disponibile più spazio di magazzino per altri usi. I principali fornitori industriali vendono stazioni di rifornimento di idrogeno da magazzino per carrelli elevatori FC. Un esempio di un carrello elevatore FC e dell'unità a celle a combustibile è illustrato nella Figura 11.

Lezione 1: Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i soccorritori



Un carrello elevatore FC



Fuel cell di un carrello elevatore FC

Figura 11. Un carrello elevatore FC e la sua unità FC [1].

I componenti principali di un'unità FC sono illustrati nella [Figura 12](#). Questi includono:

- cella a combustibile (denominata PAC);
- ausiliari per celle a combustibile;
- serbatoio di stoccaggio dell'idrogeno, il cui volume varia tra 20 e 70 L in acqua e dotato di un sistema di regolazione;
- batteria agli ioni di litio che ha superato i test richiesti dalle Nazioni Unite (ONU) specificati nel Manuale delle prove e dei criteri delle Nazioni Unite (*United Nations Manual of Tests and Criteria*), Sezione 38.3;
- vasca di raccolta dell'acqua.

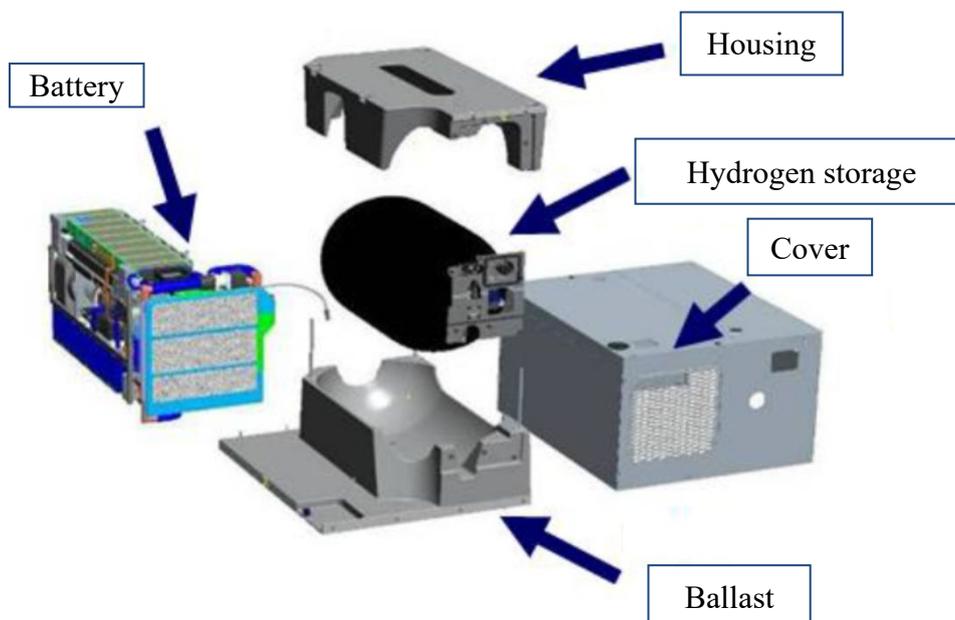


Figura 12. Componenti della fuel cell di un carrello elevatore. In ordine orario: batteria; custodia; serbatoio di idrogeno; copertura, ancoramento.

## Lezione 1: Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i soccorritori

Dal punto di vista della sicurezza, lo stoccaggio dell'idrogeno è protetto con un TPRD (attivato da un fusibile termico) situato tra la valvola di isolamento del carrello elevatore e la bombola. Il fusibile si apre a 109°C e permette il rapido rilascio dell'idrogeno pressurizzato. C'è anche una valvola di non ritorno sulla porta di riempimento per impedire la fuoriuscita del gas dallo stoccaggio. Inoltre, tutti i componenti della FC sono incorporati in un involucro in ghisa, a sua volta protetto da un coperchio. I vantaggi di questo involucro in ghisa sono due: fornisce protezione contro i danni meccanici esterni e consente lo sfogo del flusso di idrogeno in caso di attacco termico esterno.

### 4.5 Aviazione

Lo studio sull'utilizzo dell'idrogeno come carburante negli aeroplani è iniziato nel 1956. Gli Stati Uniti hanno realizzato un aereo B57 Canberra che utilizzava carburante a idrogeno pressurizzato con elio in uno dei suoi motori [13]. Dopo il B57, i sovietici hanno testato la conversione sperimentale di una prima produzione di Tu-154 che aveva un motore funzionante a idrogeno nel 1988. Il motore alimentato a idrogeno liquido è stato testato ad altezze fino a 7000 m e con accelerazioni di 900 km/h. Sfortunatamente, il programma per l'idrogeno liquido (LH<sub>2</sub>) è stato ridotto a soli cinque voli e si è deciso di non continuare con tali combustibili a causa dei costi elevati e della mancanza di infrastrutture per l'idrogeno [14]. Fino ad oggi, molti prototipi di velivoli a idrogeno come il Tupolev Tu-155 (Tupolev, 2009), l'Antares DLR-H2 (Fuel Cell Works, 2009), il Boeing Phantom Eye (Jackson e Haddox, 2010) e l'ENFICA-FC Rapid 200-FC (Commissione europea, 2011) sono stati costruiti utilizzando metodi di stoccaggio per compressione e liquefazione [15]. La cronologia storica dello sviluppo di velivoli alimentati a idrogeno liquido e a celle a combustibile è illustrata nella Figura 13. Nel settembre 2016, il primo aereo passeggeri a quattro posti alimentato a celle a combustibile a idrogeno, HY4, ha completato il suo primo volo dall'aeroporto di Stoccarda. In questo futuro taxi elettrico, il carburante a idrogeno viene immagazzinato a una pressione compresa tra 4.300 PSI e 5.800 PSI in due serbatoi in fibra di carbonio che si trovano nelle due fusoliere. In questo aereo con una velocità massima di 200 km/h, la cella a combustibile converte direttamente l'idrogeno in elettricità e l'unico prodotto di scarto che esce da questo processo è l'acqua [16]. Il 21 settembre 2020, Airbus ha rivelato tre concetti per il primo aereo commerciale al mondo a emissioni zero che potrebbe entrare in servizio entro il 2035. Questi concetti rappresentano ciascuno un approccio diverso per raggiungere il volo a emissioni zero, esplorando vari percorsi tecnologici e configurazioni aerodinamiche al fine di sostenere l'ambizione dell'azienda di aprire la strada alla decarbonizzazione dell'intera industria aeronautica. Tutti questi concetti si basano sull'idrogeno come fonte di energia primaria, un'opzione che Airbus ritiene sia promettente come carburante pulito per l'aviazione e come probabile soluzione per l'aerospaziale e molte altre industrie per raggiungere i loro obiettivi climaticamente neutri.

## Lezione 1: Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i soccorritori

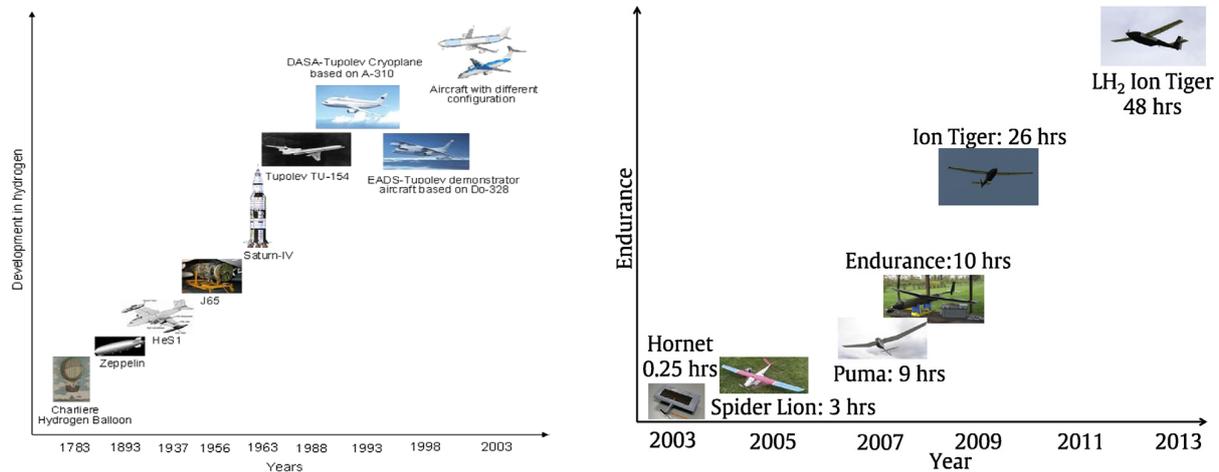


Figura 13. Cronologia storica dello sviluppo di velivoli ad idrogeno (sinistra) e fuel cell (destra).

Un aeromobile ha un peso massimo al decollo fino a 640 tonnellate. Per trasportare questi carichi, sono necessari motori grandi e potenti, e questi motori richiedono molto carburante. Questo fabbisogno presenta vantaggi e sfide relative alla sicurezza del carburante, al suo costo, all'energia specifica e all'efficienza energetica equivalente. Oggi gli aerei utilizzano principalmente combustibili a base di petrolio ottenuti da combustibili fossili. Tra questi combustibili, il costo del cherosene più comunemente usato è inferiore rispetto ad altri combustibili [15, 17]. Sebbene il cherosene e alcune miscele di benzina siano preferibili come carburante per l'aviazione, le loro riserve sono limitate e l'aumento delle emissioni di gas serra incide negativamente sull'ambiente. Di conseguenza, ricercatori e produttori stanno valutando nuovi modi e forme di utilizzo dell'energia con combustibili alternativi/rinnovabili.

Alla luce di queste considerazioni, i combustibili fossili convenzionali utilizzati in aeronautica vengono sostituiti con combustibili alternativi. Uno tra i più importanti è l'idrogeno, diventato il centro dell'attenzione di ricercatori ed esperti di combustione negli ultimi anni a causa della disponibilità, delle migliori proprietà energetiche specifiche e dei benefici ambientali.

Ci sono due modi in cui l'idrogeno è tipicamente usato negli aeroplani, o come combustibile al posto del cherosene nei grandi aeroplani o come combustibile nelle celle a combustibile PEM nei motori a reazione nei piccoli aeroplani ad elica [15].

## 5. Trasporto dell'idrogeno

Come menzionato in precedenza, l'idrogeno è stato utilizzato nell'ambito industriale per molti decenni. Dopo che l'idrogeno è prodotto in un sito di produzione centralizzato, viene solitamente trasportato agli utenti finali o altre rilevanti applicazioni FC. L'idrogeno può essere trasportato sia come gas compresso che come liquido criogenico. Esistono quindi diversi percorsi per il suo trasporto: su strada in autocarri/cisterne e container o tramite tubazioni.

## 5.1 Automezzi pesanti (*Heavy goods vehicles, HGV*)

### 5.1.1 Automezzi: trasporto di gas

Le flotte di automezzi sono attualmente utilizzate dalle società del gas industriale per trasportare cilindri in acciaio senza saldatura di idrogeno gassoso compresso (CGH<sub>2</sub>) per distanze di 200-300 km da un sito di produzione centralizzato. Sui *trailers*, ossia i rimorchi, vengono installate bombole cilindriche singolarmente o in gruppi, o lunghi tubi cilindrici (Figura 14). La pressione di stoccaggio varia da 200 a 300 bar e un trailer può trasportare da 2.000 a 6.200 Nm<sup>3</sup> di CGH<sub>2</sub> per autocarro, con una limitazione di peso di 40 tonnellate. La quantità di idrogeno così trasportata è relativamente bassa (da 180 a 540 kg a seconda del numero di tubi o fasci), che rappresenta circa l'1-2% della massa totale dell'autocarro. I rimorchi attuali utilizzano bombole/cilindri di stoccaggio di tipo I (ovvero interamente in metallo). Per aumentare le loro prestazioni, è possibile utilizzare fasci di cilindri o tubi avvolti ad anello con compositi leggeri (Tipo II). Questa modalità di consegna è relativamente semplice, ma deve essere adattata alle quantità di idrogeno e alle distanze per essere competitiva in termini di costi. Le principali restrizioni nella consegna degli autocarri con gas compresso sono i costi di capitale, il funzionamento e la manutenzione, inclusi i costi del lavoro degli autisti e del carburante.



Source: AirLiquide, 2014.

Figura 14. Due tipologie di trailer CGH<sub>2</sub> operati da AirLiquide in Europa: (a) trailer tubolari, trasporto da 2,000 a 3,000 Nm<sup>3</sup> di idrogeno e (b) trailer di cilindri compositi, trasporto di 6,200 Nm<sup>3</sup> di idrogeno.

Il trasporto allo stato gassoso su autocarro (trailer tubolare, bombole) è una delle modalità più selezionate per il trasporto su brevi distanze e per piccole quantità di idrogeno. Le maggiori limitazioni sono la bassa capacità di stoccaggio per i clienti con consumi elevati (che richiedono consegne frequenti) e la bassa pressione dell'idrogeno erogato, che richiede una compressione aggiuntiva, ad esempio presso una stazione di rifornimento. Pertanto, vengono studiate tecnologie alternative con una pressione più elevata, una capacità di trasporto dell'idrogeno più elevata e sistemi a costi inferiori come descritto di seguito. Lincoln Composites sviluppa tubi compositi di capacità superiori. Il materiale di un serbatoio è un rivestimento in plastica completamente avvolto con fibra di carbonio impregnata con resina epossidica per la consegna dell'idrogeno gassoso in tubi su trailer. Ad esempio, il serbatoio TITANTM (1,08 metri di diametro, 11,5 metri di lunghezza, 8.400 litri di volume d'acqua e

## Lezione 1: Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i soccorritori

2.087 kg di peso) funziona a una pressione di 250 bar. Può fornire 2-3 volte più idrogeno rispetto alla quantità di idrogeno immagazzinata/trasportata in serbatoi di acciaio di massa simile. La [Figura 15](#) mostra l'unità di stoccaggio contenente quattro serbatoi composti in grado di immagazzinare 600 kg di idrogeno a 250 bar. I serbatoi adatti a pressioni più elevate sono attualmente in fase di sviluppo.



Fonte: Lincoln Composites, 2014.

Figura 15. Trailer trasportante quattro contenitori composti sviluppati dalla Lincoln Composites.

Le tecnologie ibride sono esplorate presso il Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) come la crio-compressione che combina pressione e bassa temperatura per aumentare la quantità di idrogeno che può essere immagazzinata per unità di volume ed evitare le penalizzazioni energetiche associate alla liquefazione dell'idrogeno. L'idrogeno compresso a temperature criogeniche è molto più denso rispetto ai normali serbatoi compressi a temperatura ambiente. Questi nuovi *vessel* avrebbero il potenziale per immagazzinare idrogeno a temperature fino a 80 K sotto pressioni di 200-400 bar. Questo approccio richiede lo sviluppo di serbatoi composti pressurizzati con isolamento termico. In alternativa si potrebbe considerare l'utilizzo di serbatoi di gas idrogeno freddo che richiederebbero meno raffreddamento. Potrebbe esserci una combinazione ottimale di pressione e temperatura nell'intervallo 80-200 K. Recentemente, LLNL ha identificato materiali in fibra di vetro poco costosi per lo stoccaggio di gas idrogeno freddo (~ 150 K e fino a 500 bar), prevedendo una riduzione del 50% del costo del trailer.

I principali dispositivi di sicurezza utilizzati negli automezzi per il trasporto di gas idrogeno sono le valvole di sicurezza manuali. Durante il trasporto tutti i serbatoi di stoccaggio dell'idrogeno sono isolati da una valvola. In servizio sono previsti diversi dispositivi e procedure di sicurezza:

- La procedura di cambio del semirimorchio o semi-trailer avviene come segue:
  - Il conducente parcheggia il semirimorchio nel luogo previsto,
  - Il conducente mette i cunei in posizione e dispiega il supporto per i lati,
  - Il conducente sgancia l'unità motrice,

## Lezione 1: Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i soccorritori

- Il conducente collega il tubo del semirimorchio pieno, verifica la tenuta del tubo di prelievo e scollega il semirimorchio vuoto,
- L'autista aggancia il semirimorchio vuoto alla motrice e parte.

- Una prova di tenuta manuale durante il collegamento a un semirimorchio. Questo viene fatto nelle fasi seguenti. L'operatore collega il tubo flessibile del semirimorchio alla sede di collegamento dell'impianto. Il tubo è pressurizzato. L'operatore verifica la tenuta mediante un sapone di rilevamento e la stabilizzazione della pressione misurata localmente mediante un manometro.

### 5.1.2 Automezzi: trasporto di liquido criogenico

L'idrogeno può essere trasportato su strada anche in forma liquida (raffreddata sotto i 20 K o - 253 °C) per distribuirne quantità maggiori (centinaia di m<sup>3</sup>/h). In termini di capacità di peso, i le autocisterne super-isolate a idrogeno liquido (LH<sub>2</sub>) possono trasportare fino a 10 volte più idrogeno rispetto ai rimorchi tubolari utilizzati per il trasporto di CGH<sub>2</sub>. Gli automezzi LH<sub>2</sub> operanti a pressione atmosferica hanno capacità volumetriche di circa 50.000 – 60.000 litri e possono trasportare fino a 4.000 kg (Figura 16). Questa è la modalità di distribuzione preferita per quantità medio/grandi di idrogeno su lunghe distanze, il che spiega perché il business dell'LH<sub>2</sub> è stato sviluppato maggiormente in Nord America (la capacità di liquefazione dell'idrogeno in Nord America è circa dieci volte maggiore rispetto a quella europea). L'idrogeno liquido trasportato nell'automezzo viene quindi vaporizzato in un prodotto ad alta pressione per l'uso presso la sede del cliente.



Fonte: AirLiquide Image Bank, 2015

Figura 16. Autocisterna su strada usata da Air Liquide per il trasporto di LH<sub>2</sub> all'utente finale.

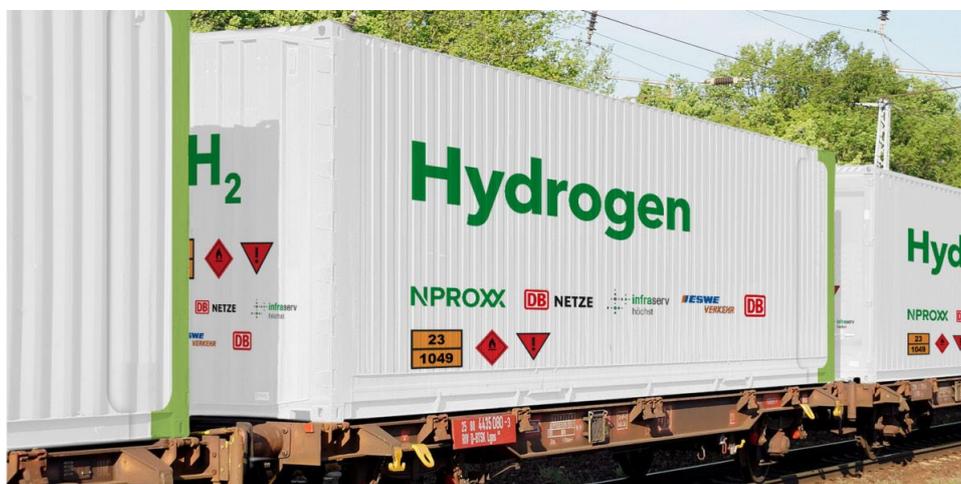
Il problema principale per questa modalità di trasporto è il processo di liquefazione ad alto costo. L'input energetico per la liquefazione rappresenta il 30-40% del potere calorifico inferiore dell'idrogeno (rispetto al 10% richiesto per la compressione del gas) [21]. I costi dell'elettricità rappresentano il 50-80% dei costi di liquefazione. La distanza è il principale fattore decisivo tra il trasporto di LH<sub>2</sub> e l'idrogeno gassoso CGH<sub>2</sub>. Il numero di automezzi per il trasporto di LH<sub>2</sub> dipenderà dalla domanda di idrogeno e dalla localizzazione del punto di liquefazione. Tuttavia, essendo la capacità molto superiore a quella di un automezzo di gas compresso, questa modalità di consegna dipende meno dalla distanza di trasporto. Il costo del

## Lezione 1: Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i soccorritori

capitale degli automezzi e il costo operativo (carburante, manodopera) sono molto inferiori. Di conseguenza, il trasporto di liquidi è più economico del trasporto di gas per lunghe distanze (da circa 400 km a migliaia di chilometri) e medie quantità di idrogeno. Tuttavia, bisogna considerare la disponibilità di LH<sub>2</sub>. Attualmente il mercato dell'idrogeno industriale è servito da quattro impianti di liquefazione in Europa e dieci in Nord America. Mercati più grandi giustificerebbero la costruzione di nuovi impianti di liquefazione. Sono possibili riduzioni significative dei costi dovute agli effetti di ridimensionamento delle apparecchiature di liquefazione. Tuttavia, questa modalità di consegna si basa sul prezzo dell'energia elettrica e sulla decisione di installare nuove unità di liquefazione. Tecnologie migliori potrebbero offrire nuove opportunità per ridurre i costi di capitale, migliorare l'efficienza energetica del processo di liquefazione e ridurre la quantità di idrogeno persa a causa dell'evaporazione (*boil-off*) durante lo stoccaggio e il trasporto (il tasso di evaporazione che dipende dalle dimensioni, dalla forma, dall'isolamento del contenitore e la durata dello stoccaggio, è tipicamente dell'ordine dello 0,2 %/giorno per un container da 100 m<sup>3</sup>). Sono in corso numerosi studi per migliorare le tecnologie di liquefazione e proporre nuovi approcci (ad esempio, miglioramento della conversione orto-para, sviluppo della refrigerazione magnetica, ecc.).

### 5.2 Treni

Il primo treno a idrogeno nel Regno Unito, sviluppato attraverso il progetto HydroFLEX, ha iniziato il suo primo viaggio sui binari della linea principale nel Warwickshire nel settembre 2020. Altri treni a celle a combustibile verranno messi in funzione in tutta la Germania nei prossimi anni. Ma resta la domanda su come fornire al meglio l'idrogeno alle stazioni di rifornimento dei treni. Un potenziale percorso è quello ferroviario, approvato dall'Agenzia statale per l'energia dell'Hesse. L'agenzia ha incaricato DB Energie, il fornitore di energia dell'operatore ferroviario nazionale tedesco Deutsche Bahn, di indagare su come raggiungere questo obiettivo in termini di fattibilità tecnica, operativa e legale. Questa domanda è stata esaminata sulla base di una fonte di idrogeno esistente nel parco industriale di Höchst a Francoforte sul Meno su due percorsi specifici nell'area del Reno-Meno (vedi [Figura 17](#)).



Fonte: NPROXX, 2020

Figura 17. Trasporto di idrogeno su ferrovia.

## Lezione 1: Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i soccorritori

Secondo gli esperti di DB Energie sarebbe possibile soddisfare l'infrastruttura di rifornimento di idrogeno via ferroviaria. Rispetto al trasporto su strada i vantaggi sono molteplici, come la precisa pianificazione dei tempi di trasporto, l'alto livello di affidabilità e sicurezza, la possibilità di trasportare grandi quantità e lo sgravio del traffico stradale nelle aree metropolitane. Non c'è nulla da un punto di vista tecnico e giuridico che si opponga al trasporto ferroviario. Tuttavia, non esistono ancora contenitori per il trasporto di idrogeno omologati per il traffico ferroviario, ma solo per il traffico stradale. Poiché i requisiti sono molto simili, è prevedibile che si possa ottenere presto la certificazione per l'uso su rotaia. Per conoscere la fattibilità e l'efficienza economica, dovrebbe essere analizzato uno studio separato per capire se il trasporto ferroviario è più economico del trasporto su strada. Sulle due tratte esaminate, il traffico ferroviario ha avuto un andamento leggermente peggiore, ma non è stato possibile derivare affermazioni generali da ciò. Tuttavia, il trasporto su strada dell'idrogeno non è una soluzione realmente sostenibile, soprattutto quando i treni a celle a combustibile continueranno a essere riforniti in futuro.

### 5.3 Gasdotti

Oggi vengono utilizzati numerosi gasdotti commerciali per distribuire grandi quantità (decine di migliaia di m<sup>3</sup>/h) di idrogeno gassoso al mercato industriale. Le loro lunghezze vanno da meno di un chilometro a diverse centinaia. Gli attori principali sono le società industriali del gas, ovvero Air Liquide, Air Products, Linde e Praxair. In risposta ad un aumento della domanda di idrogeno da parte della maggior parte delle raffinerie, le reti esistenti si stanno espandendo e vengono costruite nuove porzioni. Ad esempio, nel marzo 2009 Air Products ha annunciato l'estensione di 60 km della rete di gasdotti della costa del Golfo degli Stati Uniti in Louisiana. La rete dell'idrogeno è stimata in circa 1.600 km in Europa e 1.100 km in Nord America. La maggior parte delle condutture si trova dove vengono consumate grandi quantità di idrogeno nei settori della raffinazione e della chimica. Questi includono sistemi nel Nord Europa (Paesi Bassi, Francia settentrionale e Belgio), Germania (aree della Ruhr e Lipsia), Regno Unito (Teesside) e in Nord America (Golfo del Messico, Texas-Louisiana, California, Alberta). Sistemi più piccoli esistono anche in Sud Africa, Brasile, Tailandia, Corea, Singapore e Indonesia. Complessivamente, le lunghezze di questi gasdotti sono ridotte rispetto al sistema mondiale di gasdotti di trasporto del gas naturale, che supera i 2.000.000 di km.

La [Figura 18](#) mostra alcune parti della rete mondiale di gasdotti. Ad esempio, il gasdotto lungo 240 km nell'area della Ruhr in Germania ([Figura 18a](#)) acquisito da Air Liquide nel 1998 è in funzione dal 1938. All'interno del progetto Europeo "Zero Region" per applicazioni di energia a idrogeno Linde ha installato un gasdotto per idrogeno da 900 bar (1" di diametro) su una distanza di 1,7 km nel parco industriale di Francoforte-Hoechst per rifornire veicoli passeggeri a celle a combustibile.

Lezione 1: Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i soccorritori

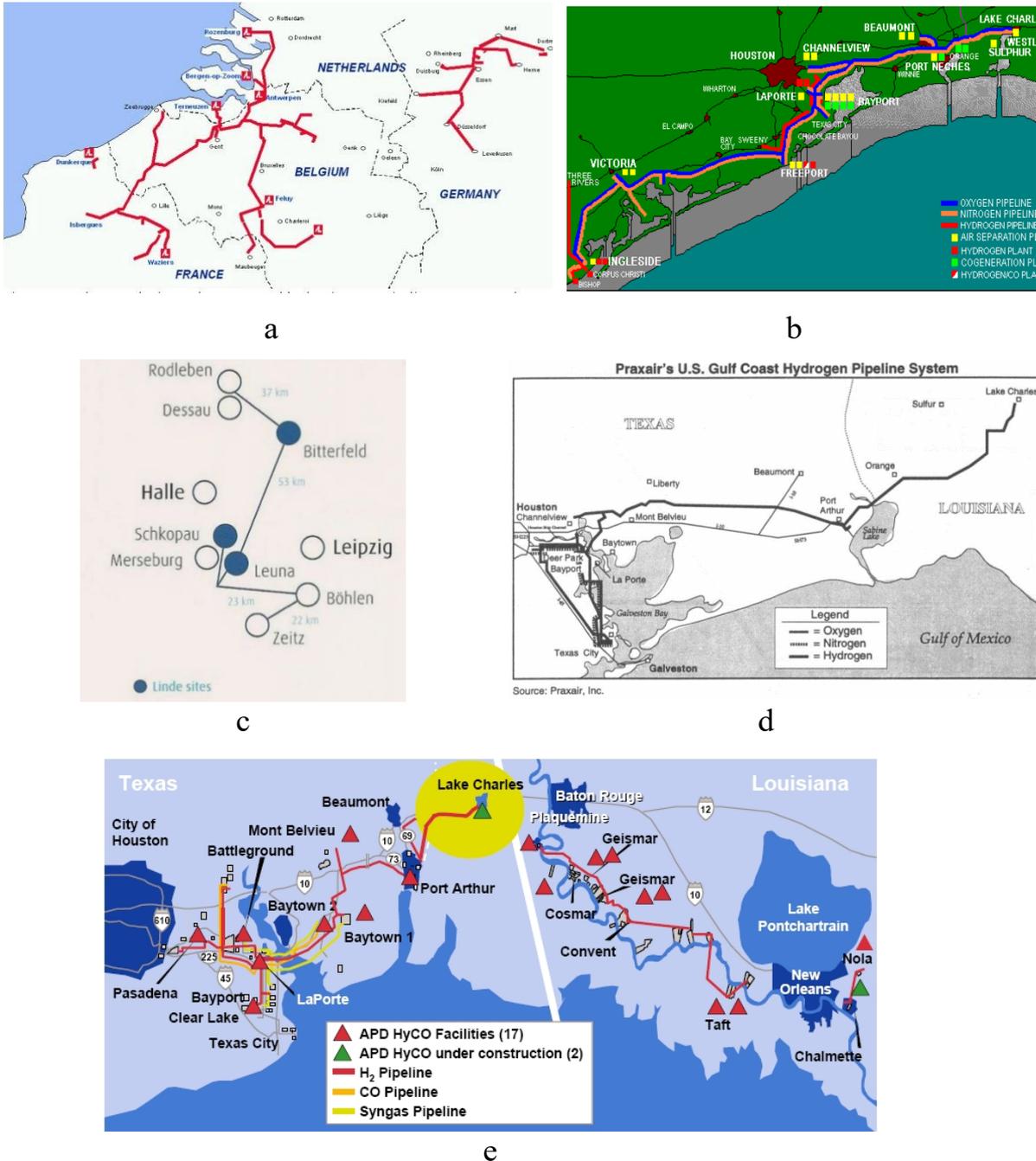


Figura 18. Principali gasdotti di idrogeno nel mondo: (a) Air Liquide - Benelux, Francia e Germany (area di Ruhr); (b) Air Liquide - costa del Golfo (USA); (c) Linde - Germania; (d) Praxair - costa del Golfo (USA); (e) Air Product - costa del Golfo (USA).

## 6. Applicazioni stazionarie

### 6.1 Sistemi di cogenerazione di calore ed energia (CHP)

Negli impianti di cogenerazione (CHP) tradizionali l'elettricità e il calore sono prodotti dalla combustione del gas naturale nel motore a combustione interna o nella turbina. I sistemi di cogenerazione basati su FC generano elettricità e riscaldano l'acqua nella reazione elettrochimica descritta in precedenza. Sono considerate due tecnologie FC: Solid Oxide Fuel

Lezione 1: Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i soccorritori

Cell (SOFC) e PEM FC. Il gas naturale viene convertito per produrre idrogeno e una miscela di idrogeno, anidride carbonica e monossido di carbonio (chiamato syngas) con impurità viene alimentata direttamente all'FC per generare energia. Nei sistemi PEM FC, che utilizzano temperature più basse, il syngas necessita di un'ulteriore purificazione per rimuovere monossido di carbonio e composti contenenti zolfo. Le installazioni Micro CHP sono state introdotte in Europa nell'ambito del progetto Callux (<http://enefield.eu/>).

## 6.2 Generazione di potenza di back-up

L'obiettivo principale di questo tipo di tecnologia è fornire energia istantanea in caso di blackout. La potenza di questo impianto è compresa tra 16 e 80 kW con un massimo di nove bombole di idrogeno. I principali vantaggi di questa applicazione sono:

- Elevata affidabilità e avvio rapido.
- Autonomia scalabile, dipendente solo dal volume di stoccaggio del gas.
- Bassa manutenzione.
- Funzionamento pulito e silenzioso [1].

I potenziali utenti di questo tipo di applicazione includono: telecomunicazioni, data center, ospedali, industrie, hotel di lusso, ecc. Un esempio del sistema è illustrato nella **Figura 19** che mostra un'unità di alimentazione di back-up FC utilizzata nel progetto IP Energy (Aix-en-Provence, Francia). Il sistema di alimentazione di back-up da 30 kW installato nel 2008 è la prima soluzione in container. Lo stoccaggio interno del gas ha consentito una capacità operativa di 4 ore.



Figura 19. Un sistema di alimentazione di back-up FC nel data center IP Energy.

Le caratteristiche e i concetti di sicurezza del sistema sono i seguenti:

- Il sistema FC ha due linee di sfiato separate, una per l'ossigeno e una per l'idrogeno, che scaricano il gas sul tetto del contenitore a distanza di sicurezza per evitare la miscelazione di ossigeno e idrogeno durante lo scarico. Dopo una scarica, all'interno del sistema sussiste una quantità residua di idrogeno.
- Il compartimento di processo è dotato di due sensori di idrogeno che possono attivare un arresto di emergenza se la concentrazione di idrogeno nei contenitori è superiore a 0,4

## Lezione 1: Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i soccorritori

vol. %. Se viene rilevata una concentrazione anomala di idrogeno, viene attivato un arresto di sicurezza e verranno eseguite le seguenti azioni:

- Arrestare tutti i processi di sistema.
  - Attivare le ventilazioni meccaniche.
  - Isolare gli accumulatori di gas chiudendo le elettrovalvole.
- Il rilevamento dell'idrogeno viene monitorato continuamente anche quando il sistema è in modalità standby. In caso di perdita di rilevamento, il sistema attiva un arresto di sicurezza.
- I container sono dotati di rilevatori antincendio. In caso di loro attivazione devono essere intraprese le seguenti azioni:
- Arrestare tutti i processi di sistema.
  - Isolare i sistemi di accumulo di gas chiudendo le elettrovalvole.
  - Interrompere le ventilazioni.
- Le atmosfere esplosive pericolose risultanti da potenziali perdite o rilasci di idrogeno devono essere evitate nel compartimento FC. Le misure di prevenzione passiva includono, ma non si limitano a: l'uso di giunti fissati in modo permanente e costruiti in modo da limitare il tasso di rilascio massimo a un valore prevedibile; ventilazione naturale. I metodi di prevenzione attiva includono ma non sono limitati a: ventilazione attiva; un sistema di rilevamento di gas infiammabili; altri mezzi di rilevamento delle perdite (ad es. attraverso misurazioni di pressione relative alle impostazioni di controllo).
- L'interno del container, dove l'idrogeno può fuoriuscire o diffondersi, non è classificato in quanto ATEX e le barriere di sicurezza garantiscono l'assenza di idrogeno pericoloso nel punto di fuoriuscita o per accumulo. Tuttavia, tutte le apparecchiature installate sotto il soffitto del container e in grado di innescare miscele infiammabili idrogeno-aria sono certificate per ATEX zona 2. In particolare, questo riguarda i sensori di idrogeno e antincendio e il sistema di ventilazione. Inoltre, il compartimento elettrico è sistematicamente separato da quello di processo.
- L'ossigeno non è infiammabile nell'aria ma favorisce il processo di combustione. Una perdita di ossigeno può essere l'origine di un incendio. Il rischio di incendio aumenta quando l'atmosfera è arricchita di ossigeno. Eventuali contatti tra l'ossigeno e le sostanze organiche devono essere evitati a causa del rischio di incendio.
- Nella progettazione e nell'utilizzo di questo sistema vengono adottate misure generali di prevenzione dei rischi:
- Scelta corretta dei materiali (es. inox sgrassato), utilizzo di tubazioni protette e senza curve brusche, raccordi a tenuta, ecc.

## Lezione 1: Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i soccorritori

- Limitazione dei flussi di ossigeno in funzione della pressione.
  - Protezione delle linee dell'ossigeno mediante filtri per intrappolare la polvere che potrebbe infiammarsi.
  - Ventilazione naturale e forzata nel compartimento di processo.
  - Riduzione delle lunghezze delle tubazioni in alta pressione, sufficiente distanza tra le tubazioni e i componenti elettrici.
  - Raggruppamento delle unità contenenti ossigeno in una zona delimitata (compartimento).
- Aderenza alle procedure di controllo e manutenzione (prove periodiche) dell'impianto [1].

## 7. Applicazioni marittime

Le celle a combustibile a idrogeno hanno dimostrato le loro prestazioni in una varietà di applicazioni, inclusi autobus, autocarri, automobili, carrelli elevatori e persino treni passeggeri. Grazie al loro successo nei veicoli terrestri pesanti, le celle a combustibile vengono adesso integrate nelle navi marittime. Le celle a combustibile svolgeranno un ruolo chiave nell'aiutare le industrie marittime ad affrontare le emissioni di gas serra (GHG) sull'acqua e nei porti.

Il trasporto marittimo è noto per essere una fonte significativa di emissioni di gas serra. Gli alti GHG sono il risultato del tradizionale carburante di bassa qualità utilizzato nei motori delle navi che generano elevate emissioni. Negli ultimi anni, la pressione pubblica sull'inquinamento atmosferico e sui cambiamenti climatici ha spinto i governi e altre autorità ad agire per ridurli. Di conseguenza, in tutto il mondo vengono messe in atto normative sulla riduzione dei gas a effetto serra mirate al traffico marittimo. Per esempio:

- Il Parlamento norvegese, nel 2018, ha promulgato una risoluzione per proteggere i fiordi del paese patrimonio dell'umanità: questa risoluzione fermerà tutte le emissioni delle navi da crociera e dei traghetti nei fiordi entro il 2026 [22].
- Gli standard sulle emissioni visibili dello Stato dell'Alaska limitano l'opacità di tutte le navi marittime entro tre miglia dalla loro costa.
- L'Organizzazione marittima internazionale (IMO) ha adottato misure obbligatorie per ridurre le emissioni di gas a effetto serra ed eliminarle completamente entro la fine di questo secolo. La loro strategia iniziale ridurrà le emissioni totali di gas a effetto serra dalle spedizioni internazionali di almeno il 50% dei livelli del 2008 entro il 2050.
- L'Organizzazione europea per la sicurezza marittima (EMSA) prevede di ridurre le emissioni di anidride carbonica dell'UE dal trasporto marittimo di almeno il 40% (dai livelli del 2005) entro il 2050. Ulteriori ECA sono in discussione per l'Artico, l'America centrale, il Mediterraneo e il Mar Nero, Giappone, Corea e Australia.

## Lezione 1: Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i soccorritori

Queste normative sulle emissioni avranno un impatto significativo sulle navi marittime e sulle organizzazioni che le gestiscono. Per adeguarsi a questi cambiamenti, gli operatori delle flotte hanno bisogno di soluzioni che riducano drasticamente le emissioni. Con così tanti diversi tipi di imbarcazioni in acqua, l'industria nautica ha bisogno di una vera soluzione a emissioni zero che possa essere applicata a diversi tipi di imbarcazioni.

Le batterie sono una soluzione di alimentazione a emissioni zero per imbarcazioni più piccole che operano con cicli di lavoro brevi, ad esempio piccoli traghetti passeggeri e battelli di servizio lacustre. Tuttavia, una densità di potenza inferiore e un peso maggiore limitano l'utilizzo delle batterie per molte applicazioni. Per le navi marittime, le celle a combustibile sono l'unica valida opzione a emissioni zero. Proprio come le batterie, le celle a combustibile producono elettricità ad alta efficienza attraverso un processo elettrochimico. La differenza è che con una cella a combustibile l'energia viene immagazzinata separatamente sotto forma di idrogeno. Finché il carburante è disponibile, i sistemi di alimentazione a celle a combustibile produrranno elettricità come un generatore. Le uniche emissioni di una cella a combustibile sono il vapore acqueo e il calore.

Inoltre, il combustibile a idrogeno può essere prodotto da fonti rinnovabili, tra cui energia solare, eolica, idroelettrica e geotermica. Il costo dell'idrogeno rinnovabile continua a diminuire ogni anno, soprattutto quando iniziano a emergere progetti di produzione su larga scala in Europa, Australia e Cile. Quando alimentato da idrogeno rinnovabile, un sistema di alimentazione a celle a combustibile è una vera fonte di energia a zero emissioni.

La transizione verso una nuova fonte di energia è un'impresa importante. Nel caso delle celle a combustibile per navi marittime, gli ostacoli sono nelle infrastrutture di rifornimento e nella disponibilità di idrogeno nei porti. Prima che gli operatori possano alimentare le proprie navi utilizzando celle a combustibile, è necessario sviluppare ulteriormente l'approvvigionamento di idrogeno e le infrastrutture di rifornimento.

In tempi più brevi, le applicazioni ibride di batterie/celle a combustibile saranno praticabili. Richiedono meno carburante e soddisfano comunque l'obiettivo di emissioni zero. Queste applicazioni sono:

- alimentare navi più piccole, come traghetti e navi fluviali.
- alimentare carichi ausiliari su navi di maggiori dimensioni, come le navi da crociera, dove la richiesta di potenza ausiliaria è elevata.
- fornitura di energia da terra alle navi ormeggiate.

Ci sono tre vantaggi chiave nell'utilizzo delle celle a combustibile per applicazioni marine:

- I sistemi di alimentazione modulari sono adattabili a molti requisiti di carico.



Figura 20. Modulo fuel cell Ballard 100 kW per applicazioni marittime.

Le celle a combustibile Ballard PEM (membrana a scambio protonico) sono modulari (Figura 20), e possono essere utilizzate in varie combinazioni in parallelo per fornire la potenza e la ridondanza necessarie a una nave, da 100 kW a 1 MW o più.

- L'alimentazione CC è compatibile con le architetture elettriche.

Le celle a combustibile Ballard PEM sono una fonte di notevole potenza CC compatibile con le architetture elettriche ibride a batteria. Possono essere implementati in configurazioni parallele e distribuibili per soddisfare i requisiti di alimentazione variabili di:

- propulsione elettrica ibrida.
  - sistemi di alimentazione ausiliari.
- I sistemi di celle a combustibile hanno una configurazione flessibile.

In un sistema a celle a combustibile, la generazione di energia e gli elementi di stoccaggio del carburante sono separati, il che offre all'architetto della nave una maggiore flessibilità rispetto alle batterie. Il sistema di alimentazione a celle a combustibile Ballard ha una configurazione flessibile che si adatterà ai vincoli di spazio della nave. Può essere scomposto in più moduli, posizionati in posizioni diverse. Inoltre, gli esperti di Ballard possono valutare i cicli di lavoro di qualsiasi dimensione o tipo di nave marina. Possono sviluppare una soluzione praticabile e praticabile determinando l'ottimale:

- architettura ibrida.
- alimentazione a celle a combustibile.

## Lezione 1: Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i soccorritori

- requisiti di abbassamento.
- requisiti di stoccaggio del carburante.
- consumo di carburante stimato.

Le celle a combustibile potrebbero essere applicate su vari tipi di navi, ad es. traghetti, navi da crociera, navi fluviali, ecc. Per i traghetti, i sistemi di celle a combustibile modulari e scalabili possono fornire propulsione a emissioni zero per traghetti piccoli e grandi. I primi traghetti a emissioni zero dovrebbero essere alimentati da un'architettura ibrida di celle a combustibile e batterie. Il rapporto specifico tra batterie e celle a combustibile dipenderebbe dalla durata e programmi di percorso. Poiché le celle a combustibile forniscono una notevole potenza CC, possono anche fornire energia che può essere distribuita su un traghetto (o altra nave) per alimentare le sue esigenze elettriche ausiliarie, come illuminazione, riscaldamento, aria condizionata, strumentazione della nave, sistemi di emergenza, cucine e altri sistemi di bordo. Per migliorare l'efficienza, il calore in eccesso generato dalle celle a combustibile potrebbe essere utilizzato per riscaldare l'acqua per HVAC, lavanderia e altri scopi. L'acqua prodotta dalla cella a combustibile può essere recuperata se necessario.

Le applicazioni per navi da crociera potrebbero essere tra i primi usi marittimi delle celle a combustibile. Alcuni porti di navi da crociera richiedono già operazioni a emissioni zero. Per le navi da crociera, le applicazioni della potenza delle celle a combustibile includono la generazione di energia per i carichi degli hotel, i sistemi di emergenza e una parte della potenza propulsiva. Affinché l'industria raggiunga i suoi obiettivi di emissioni zero in questo secolo, le celle a combustibile dovrebbero fornire il 100% dell'energia su molte navi da crociera, man mano che l'infrastruttura dell'idrogeno matura.

Le celle a combustibile sono una soluzione praticabile per la propulsione a emissioni zero su navi fluviali, comprese le chiatte che vengono spinte o trainate da motoscafi e rimorchiatori e navi semoventi. Ballard sta già lavorando a un progetto dimostrativo di potenza di una nave fluviale a Lione, in Francia (Figura 21). Il progetto alimenterà una barca da rimorchio su uno dei fiumi più impegnativi del mondo, il Rodano.



Figura 21. Nave fluviale Ballard a Lione, Francia.

## Lezione 1: Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i soccorritori

Nel tentativo di ridurre l'inquinamento atmosferico e le emissioni di carbonio, i governi, le autorità portuali e le organizzazioni di tutto il mondo stanno inasprendo gli standard sulle emissioni per le navi marittime. Di conseguenza, l'industria nautica si trova sotto pressione per soddisfare le prossime normative sulle emissioni zero. L'energia a celle a combustibile a idrogeno, una soluzione comprovata a emissioni zero per l'alimentazione di autobus di transito, autocarri e altri mezzi di trasporto pesanti, offre un potenziale reale per una varietà di navi marittime. Alimentati da idrogeno rinnovabile, i sistemi a celle a combustibile sono la soluzione a emissioni zero più pratica e fattibile. L'implementazione di questa tecnologia è un passo fondamentale per ridurre le emissioni delle navi marittime e ripulire l'aria per un mondo più vivibile.

## 8. Sistemi di accumulo dell'energia basati su idrogeno

È possibile considerare il Greenenergy Box come esempio di sistema di accumulo di energia a base di idrogeno. Il Greenenergy Box™ è una catena di sistemi ad idrogeno containerizzata composta da un elettrolizzatore (*electrolyzer*), una cella a combustibile, un sistema di gestione del calore e dell'acqua (*energy and water*) e sistemi di conversione elettrici accoppiati con depositi di idrogeno e ossigeno. Il Greenenergy Box™ è un sistema modulare integrato in grado di offrire una potenza da 50 a 500 kW con una capacità di accumulo da 0,2 a 2 MW. La sua linea di processo è indicata in [Figura 22](#). Diversi sistemi possono essere accoppiati per aumentare la potenza e la capacità energetica fornendo la funzione di un sistema di backup per poche ore ad alta potenza [1].

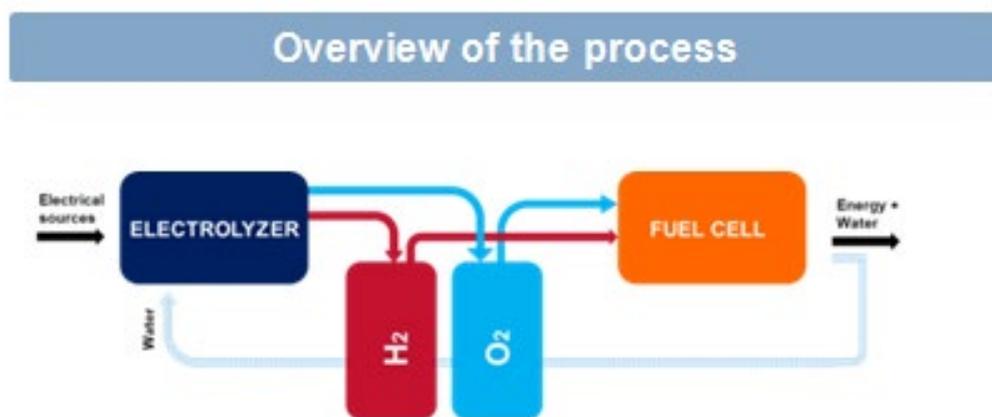


Figura 22. Panoramica della linea di processo del Greenenergy Box.

I pannelli fotovoltaici forniscono energia elettrica alla rete elettrica e il suo surplus viene utilizzato dall'elettrolizzatore per generare idrogeno gassoso e ossigeno (*electrical sources* in [Figura 22](#)). Una volta prodotti, l'idrogeno e l'ossigeno gassosi vengono stoccati in serbatoi separati installati a fianco del Greenenergy Box™. Grazie al sistema FC, l'idrogeno e l'ossigeno immagazzinati possono essere utilizzati per produrre energia elettrica per garantire la parziale autonomia energetica degli edifici nonché il sistema di backup in caso di blackout. Il Greenenergy Box™ gestisce autonomamente l'energia elettrica ricevuta dai pannelli

## Lezione 1: Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i soccorritori

fotovoltaici per l'elettrolisi dell'acqua o per fornire energia elettrica alla rete. Inoltre, il calore prodotto dal sistema sia durante i processi di elettrolisi che di fuel cell, viene gestito ed utilizzato per gli edifici adiacenti. Il Greenenergy Box™ è impermeabile e resistente al vento, e ha tre diversi scomparti: uno scomparto elettrico (*electrical compartment*), uno scomparto cella a combustibile (*fuel cell compartment*) e uno scomparto elettrolizzatore (*electrolyser compartment*) come mostrato nella Figura 23.

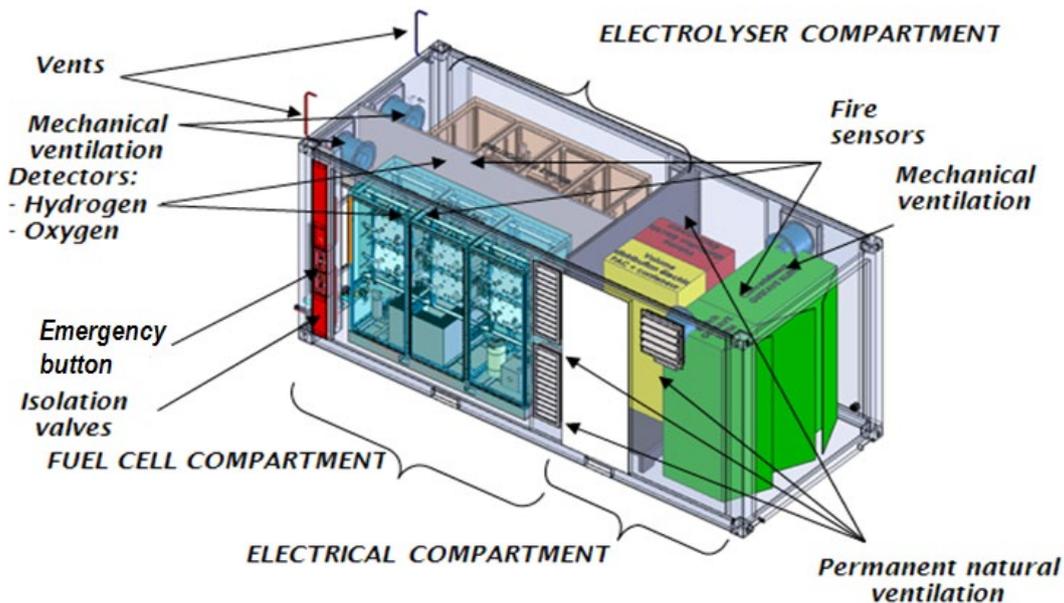


Figura 23. Schema del Greenenergy Box™ [1]. Componenti in senso orario - *fire sensors*: sensori antincendio; *mechanical ventilation*: ventilazione meccanica; *permanent natural ventilation*: ventilazione naturale permanente; *isolation valves*: valvole di intercettazione; *emergency button*: pulsante di emergenza; *detectors*: rilevatori; *vents*: sfiati.

Il Greenenergy Box™ è certificato CE secondo la Direttiva Bassa Tensione LVD 73/23/EEC, la Direttiva sulla Compatibilità Elettromagnetica EMC 89/336/EEC, la Direttiva Macchine MD 98/37/EC, la Direttiva per Apparecchiature in Pressione PED 97/23/EC. La valutazione del rischio per questo sistema viene eseguita in tre fasi. In primo luogo, viene preparato un documento chiamato "Considerazioni di sicurezza di base" che descrive i principali requisiti di sicurezza, che dovrebbero essere seguiti per le fasi di architettura e concezione della catena dell'idrogeno. Una volta che l'architettura del sistema è sufficientemente dettagliata, viene eseguita una revisione HAZOP (HAZard and OPerability Study) di ciascun sottosistema per definire le potenziali cause di ogni deviazione del processo, le potenziali conseguenze associate e valutare le barriere esistenti. Come terza fase, la "*fault tree analysis*" completa la revisione HAZOP per evidenziare possibili guasti, errori di progetto, la configurazione inappropriata del sistema e le fonti esterne di pericolo. Tutto lo studio sulla sicurezza è raccolto in un documento intitolato "Sintesi degli studi sulla sicurezza del Greenenergy Box™" [1]. La strategia di sicurezza complessiva della catena idrogeno è dettagliata di seguito.

## Lezione 1: Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i soccorritori

- Soppressione e controllo delle perdite.
  - L'attrezzatura ed i materiali delle tubazioni sono scelti per essere compatibili per l'uso di idrogeno e ossigeno. In particolare, l'infragilimento del materiale da idrogeno e la corrosione da ossigeno sono i fenomeni sottolineati da IGC15/06, ISO/TR 15916 e ISO 11114-4. I cilindri in acciaio sono comunemente usati per immagazzinare idrogeno e ossigeno pressurizzati. Il carbonio equivalente massimo per l'idrogeno è 0,43 come descritto nella IGC 121/04, § 3.
  - Le connessioni saldate sono preferite e vengono utilizzate come modo pratico per ridurre al minimo le potenziali fonti di perdite. Il numero di giunti e collegamenti montati è ridotto al minimo.
  - Sia il compartimento dell'elettrolizzatore che delle celle a combustibile del Greenenergy Box™ sono dotati di due sensori di idrogeno e di un sensore di ossigeno. Una valvola di arresto di sicurezza si attiva al 10% dell'LFL dell'idrogeno (0,4 vol. % H<sub>2</sub> nell'aria) e un arresto di emergenza avviene al 25% dell'LFL (1 vol. % H<sub>2</sub> nell'aria). Il rilevamento dell'ossigeno si attiva ogni volta che la concentrazione di ossigeno supera il 23 vol. % in aria.
  - Inoltre, le perdite di idrogeno e ossigeno vengono rilevate anche dalla differenza di pressione durante le fasi di standby. Se un serbatoio o una porzione di tubo perde pressione durante una fase di standby, significa potenzialmente che c'è una perdita. Se durante la fase di standby si verifica una perdita di pressione minima, scatta un allarme e se la perdita di pressione è troppo significativa il sistema non sarà in grado di riavviarsi.
  - Prima della messa in servizio, vengono eseguiti i test idraulici e di tenuta come richiesto dalla Direttiva sugli apparecchi a pressione.
  - Ispezioni regolari e programmi di manutenzione preventiva sono organizzati per garantire il massimo livello di sicurezza. In particolare, vengono effettuate regolarmente prove di tenuta su regolatori di pressione, valvole, tubi, giunti e raccordi ecc. Vengono organizzate ispezioni visive regolari per verificare il livello di corrosione. Le informazioni relative alla frequenza delle ispezioni e della manutenzione si trovano nelle Appendici F della IGC 121/04 e IGC 13/02.
- Prevenzione della formazione di atmosfere infiammabili o sovra-ossigenate.
  - Tre scomparti del Greenenergy Box™ sono ventilati naturalmente grazie a prese d'aria laterali poste su entrambi i lati del contenitore ([Figura 23](#)).
  - I compartimenti della cella a combustibile ed elettrolizzatore sono entrambi dotati di ventilazione di tipo ATEX che interviene per concentrazioni di idrogeno e ossigeno rispettivamente superiori a 0,4 vol. % idrogeno o 23 vol. % di ossigeno nell'aria. Le

## Lezione 1: Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i soccorritori

portate massime sono fissate per la dissipazione termica ovvero 2.500 m<sup>3</sup>/h per la cella FC e 2.700 m<sup>3</sup>/h per la cella elettrolizzatore.

- La modellizzazione di una perdita accidentale di idrogeno con una portata di 750 L/min utilizzando l'approccio LES (Large Eddy Simulation) sviluppato presso l'Università dell'Ulster evidenzia che occorrono circa 10 s affinché un sensore di idrogeno rilevi una concentrazione di idrogeno superiore a 0,4 vol. % nel compartimento elettrolizzatore ventilato naturalmente. Considerando l'ipotesi conservativa di 30 s per un tempo di risposta del sensore di idrogeno, si può osservare che dopo 40 s di rilascio continuo e costante la concentrazione di idrogeno-aria formatasi al di sotto del soffitto è ancora al di sotto del LFL dell'idrogeno in aria cioè inferiore a 4 vol. % in aria. Da questo momento, il sensore di idrogeno invia un segnale al comando di controllo che attiva la ventola di aspirazione dell'aria alla sua velocità massima. Si può osservare che la nube d'aria-idrogeno è completamente diluita in meno di 2 s.
- Soppressione/Riduzione delle sorgenti di innesco.
- L'interno del Greenenergy Box<sup>TM</sup> dove l'idrogeno può fuoriuscire o diffondersi non è classificato in quanto le barriere di sicurezza garantiscono l'assenza di un ATEX di idrogeno pericoloso nel punto di fuoriuscita o per accumulo. Tuttavia, tutte le apparecchiature installate appena sotto il soffitto del container e in grado di innescare una miscela idrogeno-aria infiammabile sono certificate per la zona ATEX 2. In particolare, queste riguardano i rilevatori di incendio, i sensori di idrogeno e ossigeno e il sistema di ventilazione.
  - Il Greenenergy Box<sup>TM</sup> e i serbatoi sono provvisti di messa a terra e sono collegati per fornire protezione contro i rischi di correnti elettriche vaganti ed elettricità statica.
- Protezione contro le sovrappressioni.
- Il serbatoio e le tubazioni del Greenenergy Box<sup>TM</sup> al serbatoio di stoccaggio sono dotati di una valvola limitatrice di pressione (PRV). La pressione limite della valvola è impostata in modo che il PRV si attivi quando la pressione all'interno del serbatoio raggiunge 1,15 della pressione massima di esercizio.
  - Gli sfiati dei serbatoi di stoccaggio sono montati verticalmente ad un'altezza minima di 3 m. Sono dotati di un "cappello", per il quale il peso è tarato per sollevarsi sotto pressione in modo da evitare l'introduzione di acqua all'interno dello sfiato.
  - Il Greenenergy Box<sup>TM</sup> è dotato di due distinti sfiati per idrogeno e ossigeno situati ad un'altezza minima di 1 m sopra il tetto del container e ben separati per evitare la miscela idrogeno-aria arricchita di ossigeno. Ciascuna distinta linea di sfiato è comune all'elettrolizzatore e all'FC e consente la depressurizzazione dell'impianto in meno di 2 minuti in caso di arresto di emergenza.

## Lezione 1: Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i soccorritori

- Arresto di emergenza e di sicurezza.
  - Il comando di controllo utilizzato per pilotare automaticamente il sistema serve anche per attivare le funzioni di sicurezza. Circa 70 funzioni di sicurezza sono registrate nel comando di controllo per rilevare qualsiasi deviazione del processo o perdita di gas o incendio all'interno del sistema. A seconda dell'ampiezza dello scostamento rispetto alla soglia di sicurezza del parametro, viene attivato uno spegnimento di emergenza o di sicurezza seguito da spegnimento dell'alimentazione, depressurizzazione dell'impianto, inertizzazione e attivazione della ventilazione (eccetto per gli incendi).
  - Le principali funzioni di sicurezza ovvero rilevamento idrogeno, ossigeno e incendio, pulsante di arresto di emergenza e comando di controllo sono realizzate tramite cavi SIL (Safety Integrity Level) 1 [1].

## 9. Panoramica dei possibili incidenti

### 9.1 Incidenti con sistemi ed infrastrutture FCH

Un incidente è un evento che ha la capacità di portare alla perdita o all'interruzione di operazioni, servizi o funzioni - che, se non gestito, può degenerare in un'emergenza, una crisi o un disastro [43]. La segnalazione degli incidenti avvenuti sui sistemi o sulle infrastrutture FCH, nonché una valutazione complessa delle loro cause principali e degli insegnamenti tratti da essi, sono un esercizio estremamente prezioso sia per il settore privato che per quello pubblico. Le informazioni su incidenti o inconvenienti relativi alle tecnologie FCH possono essere trovate nei seguenti database:

- “*Hydrogen lessons learned from incidents to and near-misses*” - Lezioni sull'idrogeno apprese da incidenti e quasi incidenti: <http://h2tools.org/lessons/>
- “*Hydrogen Incidents and Accidents Database*” HIAD database - Database degli incidenti con idrogeno: <https://odin.jrc.ec.europa.eu/odin/index.jsp>
- “*Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industries*” (BARPI) <https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/the-barpi/?lang=enbarpi/>

Tutti i database dovrebbero essere aggiornati regolarmente.

Ad esempio, il database H2Incidents (recentemente rinominato Hydrogen Tools. Lessons Learned) è stato creato dal Pacific Northwest National Laboratory con il finanziamento del Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti (<https://h2tools.org/lessons>). In questo database, vengono segnalati incidenti e quasi incidenti senza includere i nomi delle società e altri dettagli in modo che la riservatezza incoraggi la segnalazione degli eventi. Gli incidenti sono classificati in base alle configurazioni, alle attrezzature, ai danni e alle lesioni, alle probabili cause e ai fattori che contribuiscono [3].

Rigas e Amyotte [3] hanno definito le seguenti principali cause di incidenti:

- Guasto del materiale meccanico o dell'attrezzatura.

## Lezione 1: Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i soccorritori

- Attacco da corrosione.
- Sovra-pressurizzazione.
- Infragilimento da idrogeno a basse temperature.
- Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion (BLEVE), ossia un'esplosione di vapore in espansione di liquido bollente.
- Rottura del serbatoio di stoccaggio a causa dell'impatto di onde d'urto o missili di esplosioni adiacenti.
- Errore umano.

In questa prima lezione discuteremo solo alcuni esempi di incidenti relativi alle tecnologie FCH. Tuttavia, le lezioni seguenti includeranno una serie di esempi rilevanti per ciascun sistema FCH studiato.

### 9.2 Incidenti durante la produzione di idrogeno



Fonte: Millet et al, 2011 [45]

Figura 24. Parti danneggiate di elettrolizzatore PEM ad alta pressione.

Un'esplosione di un elettrolizzatore alla pressione operativa di 40 MPa è avvenuta il 7 dicembre 2005, presso uno stand dimostrativo di idrogeno presso l'Università di Kyushu (Giappone) [19]. Probabilmente, a seguito di una perdita dalla membrana, un getto di idrogeno-ossigeno interno ha provocato un incendio del metallo (titanio) e l'esplosione o rottura dell'involucro dell'elettrolizzatore. Il fluido interno e i prodotti della combustione sono stati rilasciati nell'area circostante, compresa l'area di parcheggio all'esterno dell'edificio del laboratorio. I parabrezza di diversi veicoli sono stati danneggiati a causa dell'esposizione all'acido fluoridrico che si è formato durante la decomposizione di un materiale polimerico della membrana [19]. Uno studio franco-russo [20] ha riportato l'analisi dei meccanismi di guasto delle celle elettrolitiche ad acqua PEM, che alla fine possono portare alla distruzione dell'elettrolizzatore. È stato evidenziato un processo in due fasi che prevede inizialmente la perforazione locale dell'elettrolita polimerico solido seguita da una ricombinazione catalitica di idrogeno e ossigeno immagazzinati nei compartimenti di elettrolisi. Le fotografie di un raccordo in acciaio inossidabile e di un dado perforato da una fiamma di idrogeno-ossigeno formata all'interno della pila PEM sono presentate nella [Figura 24](#).

### 9.3 Incidente ad una stazione di rifornimento

Un rilascio di idrogeno si è verificato presso la stazione di rifornimento di Emeryville [23]. A causa di un guasto ad una PRD sono stati rilasciati 300 kg di idrogeno. L'ignizione del gas è avvenuta all'uscita del tubo di sfiato e l'idrogeno ha bruciato per 2,5 ore fino a quando i tecnici non sono stati autorizzati dai vigili del fuoco locali ad entrare nella stazione e fermare il flusso di gas. Durante questo incidente i vigili del fuoco hanno evacuato le aziende e le scuole vicine, e chiuso le strade adiacenti.

Le cause identificate alla radice di questo evento sono:

- l'utilizzo di materiali incompatibili nella fabbricazione del PRD.
- montaggio improprio con conseguente eccessiva coppia del gruppo interno.
- Eccessivo indurimento dei materiali di montaggio interni da parte del produttore della valvola.

Questi problemi avrebbero potuto essere evitati mediante adeguate procedure di garanzia e controllo della qualità durante le revisioni della progettazione e della sicurezza.

## 10. Introduzione ad e-Laboratory

L'istruzione e la formazione per il settore emergente delle celle a combustibile e dell'idrogeno (FCH) sono fondamentali per lo sviluppo professionale della forza lavoro attuale e futura. Ciò è alla base della leadership e della competitività dei prodotti FCH europei. Il repository online di strumenti digitali "e-Laboratory" è stato sviluppato per la prima volta nell'ambito del progetto europeo "*Novel Education and Training Tools based on digital Applications related to Hydrogen and Fuel Cell Technology*" (NET-Tools). L'e-Laboratory NET-Tools incorpora un'ampia gamma di strumenti digitali. Gli strumenti ritenuti più pertinenti per i vigili del fuoco sono stati resi disponibili attraverso l'e-Laboratory for Hydrogen Safety, a cui si può accedere tramite la e-Platform di HyResponder (<https://hyresponder.eu/e-platform/>) o direttamente all'indirizzo <https://elab.hysafer.ulster.ac.uk/>

Il calcolo delle "*hazard distances*" (traduzione letterale: distanze di "pericolo"), il termine introdotto di recente da ISO TC197 Hydrogen Technologies, è un elemento chiave dell'ingegneria della sicurezza dell'idrogeno dei sistemi e delle infrastrutture FCH, ad es. stazioni di rifornimento. I principi alla base dell'e-Laboratory of Hydrogen Safety consentono di valutare le *hazard distances* per i rilasci non innescati (dimensioni della nube infiammabile); rilasci innescati (*jet fires*); propagazione dell'onda d'urto da deflagrazioni, detonazioni e rottura catastrofica del serbatoio di stoccaggio dell'idrogeno ad alta pressione in un incendio, *fireball*, ecc. variando i parametri del sistema come la pressione e il diametro del tubo (perdita). Lo stato dell'arte degli strumenti di sicurezza dell'e-Laboratory of Hydrogen Safety è un'analogia europea ampliata e ad accesso libero dello strumento HyRAM (Hydrogen Risk Assessment

## Lezione 1: Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i soccorritori

Methods), che è stato sviluppato dai Sandia National Laboratories (SNL) durante lo scorso decennio sotto il finanziamento del Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti. L'e-Laboratory dimostra la leadership europea nell'ingegneria della sicurezza dell'idrogeno, ad es. dalla capacità di calcolare le *hazard distances* determinate dagli effetti termici e di sovrappressione da una fireball e da un'onda d'urto dopo la rottura del serbatoio in un incendio, che sono assenti nello strumento HyRAM. Un framework canadese simile (UTRQ) è implementato utilizzando l'ambiente di sviluppo web Smalltalk Seaside.

## Bibliografia

1. HyResponse Deliverable D2.1-Description of selected FCH systems and infrastructure, relevant safety features and concepts (2014). Available from: <http://www.hyresponse.eu> [accessed 10.10.20].
2. Mays, T. (2014). Scientific progress and technological bottlenecks in hydrogen storage. H2FC European Technical School on Hydrogen and Fuel Cells. 23-27 June 2014, Crete, Greece.
3. Rigas, F and Amyotte, P (2013). Hydrogen safety. Boca Raton: CRC press. Taylor and Francis Group.
4. Rigas, F and Amyotte, P (2013). Myths and facts about hydrogen hazards. Chemical Engineering Transactions. Vol. 31.
5. ENVIRONMENTAL GRAFFITI ALPHA (2010). The Hindenburg Disaster in Pictures. Available from: <http://www.environmentalgraffiti.com/anthropology-and-history/news-hindenburgdisaster-accident-waiting-happen>. [accessed 24.12.11].
6. World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations (WP.29), 160th Session, Geneva, 25-28 June 2013.
7. US DoE, US Department of Energy (2008). Hydrogen safety training for first responders. Available from: <http://hydrogen.pnl.gov/FirstResponders/> [accessed on 06.11.20].
8. CEP, Clean Energy Partnership, 2014. Available from: <http://www.cleanenergypartnership.de/tech/site.php?l=en> [accessed on 01.05.14].
9. HyFLEETE-CUTE (2006-2009). Available from: <https://www.fuelcellbuses.eu/wiki/history-fuel-cell-electric-buses/hyfleet-cute-2006-2009> [accessed on 04.11.2020].
10. Zaetta, R and Madden, B (2011). Next HyLights project. Deliverable 3.1: Hydrogen Fuel Cell Bus Technology State of the Art Review.
11. California Fuel Cells Partnership, 2014. Available from: <http://cafcp.org/> [accessed on 06.11.20].
12. Adams, P (2004). Identification of the optimum on-board storage pressure for gaseous hydrogen city buses. European Integrated Hydrogen project – Phase 2 (EIHP2), March 2004.
13. Şenel, K. (2007), Hidrojenin yakıt olarak uçaklarda kullanımı. yüksek lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
14. <http://ram-home.com/ram-old/tu-155.html> [Accessed 06.11.2020]
15. Dincer, I., Acar, C. (2016). A review on potential use of hydrogen in aviation applications. International Journal of Sustainable Aviation, 2: 74-100.
16. <http://www.aerospace-technology.com/projects/hy4-aircraft/> [Accessed 06.11.2020].
17. Bicer, Y., Dincer, I. (2017). Life cycle evaluation of hydrogen and other potential fuels for aircrafts. International Journal of Hydrogen Energy, 42: 10722-10738

Lezione 1: Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i soccorritori

18. Bird, L. (2011). Dictionary of Business Continuity Management Terms. Business Continuity Institute. Available from: <http://www.thebci.org/glossary.pdf> [accessed on 27.12.15].
19. Molkov, V (2012). Fundamentals of hydrogen safety engineering, Part I and Part II. Available from: [www.bookboon.com](http://www.bookboon.com), free download e-book.
20. CEP, Clean Energy Partnership, 2014. Available from: <http://www.cleanenergypartnership.de/tech/site.php?l=en>
21. Barthelemy H, Weber M, Barbier F. Hydrogen storage: recent improvements and industrial perspectives. Int J Hydrogen Energy (2017) 42:7254-7262.
22. Norwegian parliament adopts zero-emission regulations in World Heritage fjords. <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/norway-adopts-zero-emission-regulations-in-world-heritage-fjords-24820> [accessed on 04.11.2020]
23. Harris, AP, Marchi CWS. (2012). Investigation of the hydrogen release incident at the AC transit Emeryville facility (Revised). Sandia report. SAND2012-8642.