



European Train the Trainer Programme for Responders

Lezione 1

Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i vigili del fuoco

LIVELLO IV

Specialista

Le informazioni contenute in questa lezione sono rivolte al livello **Specialista**.

La lezione è disponibile anche al livello I (Vigile del Fuoco).

La lezione fa parte del materiale didattico per i livelli I – IV: Vigile del Fuoco, Capo Squadra, Funzionario di Guardia e Specialista. La lezione di introduzione 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: Specialista	6
1.2 Livello di competenza: Specialista.....	6
1.3 Prerequisiti per l'apprendimento: Specialista	6
2. Introduzione, scopo e obiettivi.....	6
3. Panoramica della produzione, stoccaggio ed uso industriale dell'idrogeno	8
3.1 Produzione dell'idrogeno	8
3.1.1 Elettrolisi dell'acqua	8
3.1.2 Elettrolizzatori PEM	9
3.1.3 Elettrolizzatori alcalini.....	11
3.1.4 Tecnologie di reforming	14
3.1.5 Altre tecnologie.....	14
3.1.6 Produzione di idrogeno decentralizzata.....	16
3.2 Stoccaggio dell'idrogeno.....	16
3.3 Uso dell'idrogeno nell'industria.....	18
4. Veicoli FC	19
4.1 Le caratteristiche fondamentali dei veicoli FC	20
4.2 Auto FC	21
4.2.1 Sistema di stoccaggio dell'idrogeno	21
4.2.2 Sistema di erogazione del carburante idrogeno	22
4.2.3 Sistema FC	22
4.2.4 Propulsione elettrica e sistema di gestione della potenza	22
4.2.5 Caratteristiche e concetti di sicurezza.....	23
4.3 Autobus FC	24
4.4 Carrelli elevatori FC.....	28
4.5 Aviazione	29
4.5.1 L'idrogeno come carburante per la propulsione	31
4.5.2 Celle a combustibile ad idrogeno per l'aviazione.....	32
5. Trasporto dell'idrogeno.....	34
5.1 Automezzi pesanti (<i>Heavy goods vehicles</i> , HGV).....	34
5.1.1 Automezzi: trasporto di gas	34

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

5.1.2	Automezzi: trasporto di liquido criogenico	36
5.2	Treni	38
5.3	Gasdotti	39
6.	Applicazioni stazionarie.....	42
6.1	Sistemi di cogenerazione di calore ed energia (CHP).....	42
6.2	Generazione di potenza di back-up	43
7.	Applicazioni marittime.....	45
8.	Sistemi di accumulo dell'energia basati sull'idrogeno	49
9.	Panoramica dei possibili incidenti.....	53
9.1	Incidenti con sistemi ed infrastrutture FCH	53
9.2	Incidenti durante la produzione di idrogeno	54
9.3	Incidente in una stazione di rifornimento.....	55
10.	Introduzione al quadro e agli standards dell'ingegneria della sicurezza dell'idrogeno.....	55
11.	Introduzione ad e-Laboratory	59
11.1	Principi scientifici.....	60
11.1.1	Rilasci senza ignizione.....	60
11.1.2	Similarity law (legge di similarità)	61
11.1.3	Effetto del galleggiamento	62
11.1.4	Blowdown	63
11.1.5	Ventilazione passiva	64
11.1.6	Ventilazione forzata	65
11.1.7	Pressure peaking phenomenon.....	65
11.1.8	Distanze di sicurezza per un jet fire	66
11.1.9	Mitigazione delle deflagrazioni	67
11.1.10	Onda d'urto e fireball dopo la rottura di un serbatoio in un incendio	68
11.2	Sommario di e-Laboratory.....	69
	Bibliografia.....	69

1. Target audience

Le informazioni contenute in questa lezione sono indirizzate al Livello di Specialista. Le lezioni sono anche disponibili per il livello I: Vigile del Fuoco.

La descrizione del ruolo, livello di competenza e aspettative di apprendimento per lo Specialista sono descritte di seguito.

1.1 Descrizione del ruolo: Specialista

Gli specialisti assistono i funzionari di guardia con consigli e dirigendo e supervisionando le operazioni tecniche che implicano l'uso di conoscenze, abilità o attrezzature relative a rischi o attività di intervento specifici. Gli incidenti tipici coinvolgono materiali pericolosi, veicoli di trasporto, eventi climatici, cedimenti strutturali e di altri tipi di costruzioni, e la logistica di intervento alle emergenze.

1.2 Livello di competenza: Specialista

Una base scientifica, ingegneristica ed empirica nell'area disciplinare con competenze, estese dall'esperienza, per applicare tali informazioni, conoscenze in modo interpretato e utile per consentire al funzionario di guardia e agli altri vigili del fuoco sotto la direzione dello specialista di rispondere in modo efficace e sicuro alla situazione di emergenza.

1.3 Prerequisiti per l'apprendimento: Specialista

EQF 5 Conoscenza completa, specializzata, fattuale e teorica all'interno di un campo di lavoro o di studio e consapevolezza dei confini di tale conoscenza. Una gamma completa di abilità cognitive e pratiche necessarie per sviluppare soluzioni creative a problemi astratti. Esercizio di gestione e supervisione in contesti di lavoro o attività di studio in cui vi è un cambiamento imprevedibile; rivedere e sviluppare le prestazioni proprie e degli altri.

2. Introduzione, scopo e obiettivi

Le applicazioni delle celle a combustibile e dell'idrogeno (*Fuel Cell Hydrogen* - 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 FC (*Fuel Cell*, es. auto, autobus, carrelli elevatori); stazioni di rifornimento di idrogeno; applicazioni stazionarie FC; i sistemi di accumulo di energia a base di idrogeno. Inoltre, mancano procedure standardizzate di intervento in caso di incidenti con i suddetti sistemi e infrastrutture.

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

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 soccorritori 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 soccorritori 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 e si basa sui materiali sviluppati e forniti nell'ambito del progetto HyResponse (<http://www.hyresponse.eu/>). Un curriculum internazionale sulla formazione sulla sicurezza dell'idrogeno per i Vigili del Fuoco è stato inizialmente sviluppato all'interno del progetto (<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 per assisterli nei loro studi indipendenti e per cercare fonti per ulteriori informazioni.

Alla fine della lezione il soccorritore/allievo sarà in grado di:

- Riconoscere la novità e i 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 FCH tra cui veicoli FC, stazioni di rifornimento, stoccaggio stazionario di idrogeno, applicazioni per l'utilizzo e la distribuzione di idrogeno, generazione di energia di back-up e sistemi FC per la produzione combinata di calore ed energia;

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

- Fornire esempi di incidenti che potrebbero verificarsi con le applicazioni FCH;
- Fornire informazioni sul quadro dell'ingegneria della sicurezza dell'idrogeno;
- Avere una conoscenza di e-Laboratory per la sicurezza dell'idrogeno;
- Elaborare condizioni/parametri essenziali per la sicurezza in scenari differenti.

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 in serie e 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).

3.1.1 Elettrolisi dell'acqua

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):



Questo processo avviene in un elettrolizzatore che converte l'energia elettrica in energia chimica e può essere visto come un dispositivo che funziona in modo opposto a una cella a combustibile (*Fuel Cell* - FC). L'elettricità può provenire da diverse fonti e a seconda di ciò l'elettrolisi può avvenire con o senza emissioni di CO₂ anidride carbonica. Se l'elettricità è prodotta da fonti rinnovabili (energia eolica, idroelettrica, solare o delle maree) non verrà emessa CO₂, se è prodotta da combustibili fossili allora viene emessa CO₂ (anche se a distanza) come risultato della produzione di idrogeno. L'idrogeno gassoso prodotto è molto puro e può essere utilizzato immediatamente o immagazzinato per un uso successivo. La capacità degli elettrolizzatori varia da meno di 500 m³/h a più di 3,3×10⁵ m³/h. L'elettrolizzatore contiene due elettrodi (positivo e negativo), acqua e un elettrolita, ovvero una sostanza contenente ioni liberi che fanno di questa sostanza un conduttore elettrico. La decomposizione dell'acqua avviene quando la corrente elettrica passa tra due elettrodi all'interno della cella elettrolitica. L'idrogeno

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

viene prodotto all'elettrodo negativo (catodo) e l'ossigeno si forma all'elettrodo positivo (anodo).

3.1.2 Elettrolizzatori PEM

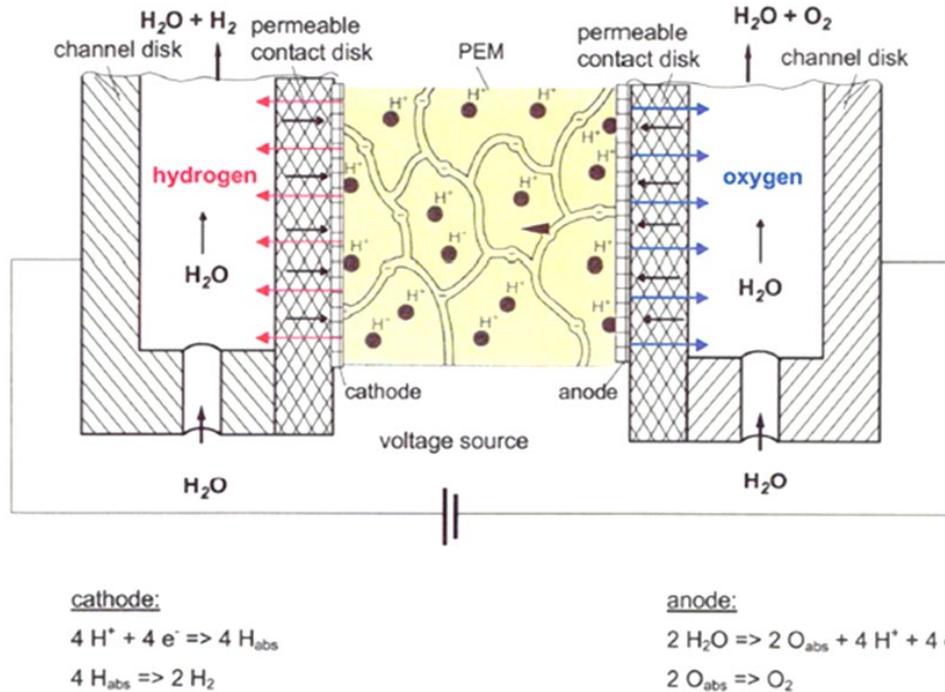
Quando l'elettrolisi avviene in due compartimenti/camere, separati da una membrana a scambio protonico (*Proton Exchange Membrane* - PEM), avremo a che fare con elettrolizzatori PEM. Mediante l'applicazione di una corrente continua (CC) l'acqua si dissocia in idrogeno (H_2) all'elettrodo negativo e ossigeno (O_2) all'elettrodo positivo (Figura 1). Gli elettrodi e la membrana di solito formano un assemblaggio membrana/elettrodo (*Membrane Electrode Assembly* - MEA) e uno *stacking* simile a uno stack FC. I gas vengono raccolti nei contenitori di recupero. Gli elettrolizzatori PEM operano a basse temperature e il PEM funge da elettrolita. Come mostrato in Figura 2, un elettrolizzatore PEM è costituito dai seguenti elementi:

- una camera di processo contenente tutti i componenti di processo quali valvole, tubazioni, gas e acqua, camino, recipienti pressurizzati, pompe, ecc.
- un compartimento elettrico contenente tutti i componenti elettrici (es. strumentazione e controllo, cablaggio, condizionamento dell'energia).
- un sistema di raffreddamento per la dissipazione del calore del processo di elettrolisi.
- una custodia resistente alle intemperie.

Gli eventi indesiderati che potrebbero verificarsi sono associati alla formazione di un ATEX1 (ossia miscela esplosive H_2-O_2) sia nel vano di processo che nel separatore (ovvero un dispositivo per separare H_2 e O_2 gassosi dalle tracce d'acqua) solitamente installato a valle della pila FC. Per evitare l'accumulo di idrogeno nel compartimento di processo, è necessario adottare le seguenti misure:

- controllare la pressione e la differenza di pressione tra le linee dell'idrogeno e dell'ossigeno;
- controllare la concentrazione di idrogeno nel contenitore ($< 0,4$ vol. % H_2);
- limitare il più possibile la quantità di idrogeno nello strato gassoso del separatore per evitare la formazione di una miscela infiammabile idrogeno-aria nel contenitore in caso di perdita catastrofica [1].

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



Fonte: Areva, 2015.

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

La formazione di un 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 un evento 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 H₂ e O₂;
- controllare la pressione e la differenza di pressione tra le linee H₂ e O₂;
- controllare la concentrazione di idrogeno all'uscita del separatore del gas ossigeno.

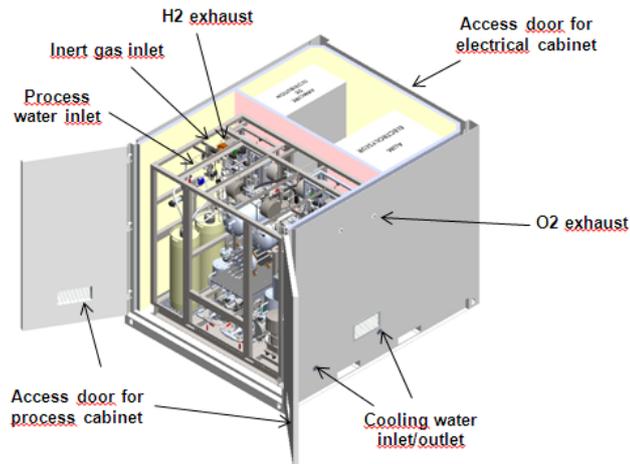


Figura 2. Schema di un elettrolizzatore PEM [1]. *Access door for process cabinet*: porta di accesso al container di processo; *cooling water inlet/outlet*: entrata/uscita dell'acqua di raffreddamento; *O₂ exhaust*: gas esausti di O₂; *access door for electrical cabinet*: porta di accesso per il container elettrico; *H₂ exhaust*: gas esausti di H₂; *inert gas inlet*: entrata del gas inerte; *process water inlet*: entrata per l'acqua di processo.

Nel caso di attivazione dei dispositivi di sicurezza l'elettrolizzatore andrà in arresto (*shut-off*), che comporta non solo la chiusura delle elettrovalvole di isolamento collegate ai serbatoi di accumulo, ma anche la depressurizzazione dell'impianto tramite le elettrovalvole normalmente aperte. Inoltre, lo scarso isolamento degli elettroni può portare a scintille elettriche durante il funzionamento in caso di incidenti, che possono innescare l'idrogeno in un ambiente ricco di ossigeno.

La velocità di produzione di idrogeno di diversi modelli di elettrolizzatore ITM Power, inclusi HGas1SP, HGas2SP, HGas3SP e HGasXMW, varia da 5,5 a 2015 m³/h.

3.1.3 Elettrolizzatori alcalini

L'elettrolisi alcalina è una tecnologia matura per la produzione di idrogeno e anche la più utilizzata nell'industria. L'elettrolisi alcalina utilizza lo stesso principio dell'elettrolisi PEM, cioè la conversione dell'energia elettrica in energia chimica. L'elettrolizzatore alcalino ha due elettrodi immersi in una soluzione acquosa di elettrolita alcalino liquido, idrossido di potassio o KOH a un livello del 25% a 80°C fino al 40% a 160°C. L'uso di KOH è preferibile rispetto all'uso di soda caustica NaOH a causa della sua maggiore conduttività ionica, del suo contenuto di impurità di cloruro inferiore e della sua pressione di vapore saturo inferiore. Gli elettrodi sono separati da un diaframma (*diaphragm*), come mostrato in Figura 3. Questo diaframma ha due funzioni: in primo luogo mantenere separati i gas prodotti (ovvero idrogeno e ossigeno) e in secondo luogo essere permeabili agli ioni idrossido (OH⁻) e alle molecole d'acqua. Il diaframma consente il passaggio degli ioni ma non dell'idrogeno. Generalmente l'elettrolizzatore alcalino è costituito da un numero di celle elettrolitiche costituite da una membrana con elettrodi inseriti tra piastre di flusso bipolari come illustrato nella Figura 4.

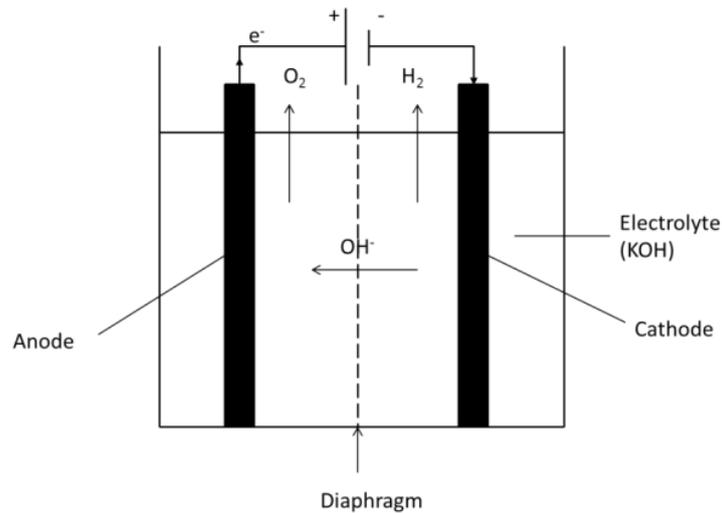


Figura 3. Schema di un elettrolizzatore alcalino [1]

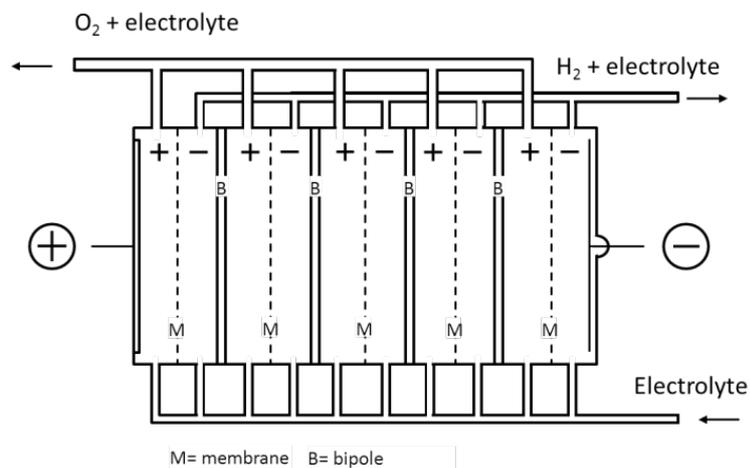
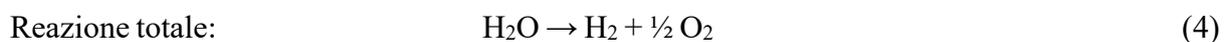
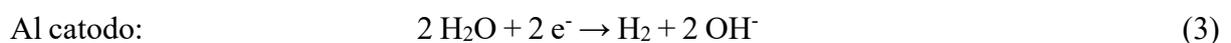
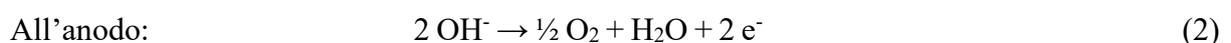


Figura 4. Schema di uno stack di elettrolisi [1]

Le reazioni che avvengono agli elettrodi sono mostrate di seguito:



Un tipico elettrolizzatore alcalino è composto da:

- Un alimentatore ed un sistema di controllo e strumentazione;
- Un sistema di elettrolisi contenente un'unità per la purificazione dell'acqua, un'unità per la purificazione dell'idrogeno, un essiccatore di gas e un separatore.
- Un compressore.

Le Figure 5 and 6 mostrano esempi di elettrolizzatori alcalini industriali.



Figura 5. Elettrolizzatore alcalino, IHT tipo S-556, 760 m³/h e 30 bar [1]



Figura 6. Vista esterna e interna dell'HySTAT elettrolizzatore Hydrogenics, 10-60 m³/h [1]

In maniera simile all'elettrolizzatore PEM, il rischio principale del sistema di elettrolisi alcalino deriva dalla formazione di una miscela idrogeno-ossigeno, che può portare a un'esplosione interna all'elettrolizzatore. Diversi sensori sono installati per rilevare il malfunzionamento dell'elettrolizzatore:

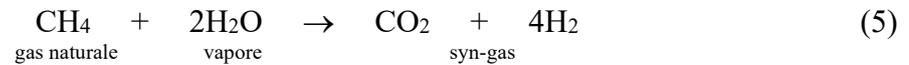
- misurazione della concentrazione di idrogeno nella linea dell'ossigeno;
- misurazione di tensione e corrente;
- misurazione della temperatura all'ingresso e all'uscita delle celle di elettrolisi;
- misurazione della concentrazione ionica dell'elettrolita.

Un altro tipo di rischio è associato all'esposizione a una soluzione corrosiva in caso di perdita di elettrolita. La scheda tecnica dell'idrossido di potassio raccomanda l'uso di un serbatoio per perdite per evitare il contatto di KOH con l'ambiente circostante [1].

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

3.1.4 Tecnologie di reforming

Attualmente il metodo più comune di produzione di idrogeno è lo *steam reforming* del gas naturale. La reazione di reforming del gas naturale (metano CH₄) è data nell'equazione 5:



Questo è un processo endotermico (cioè richiede temperature elevate) di conversione del metano e del vapore in idrogeno e anidride carbonica CO₂. Questo è solitamente un processo in due fasi con i tipici sottoprodotti del reforming che sono il monossido di carbonio CO e l'anidride carbonica CO₂. Un reformer può essere azionato 24 ore su 24, 7 giorni su 7 a carico costante. La capacità dei reformer varia da 100 a più di 100.000 m³/h. L'efficienza del reformer supera raramente l'80%, e lo svantaggio di questo metodo è che l'idrogeno prodotto non è puro (è contaminato da CO/CO₂) ed è a pressione atmosferica. Per migliorare la sostenibilità del processo di reforming sono necessari la cattura e il sequestro della CO₂. Un esempio di installazione di steam reforming è mostrato nella [Figura 7](#).

Lo steam reforming è un processo industriale consolidato e non verrà trattato in modo più dettagliato in questa lezione. Per ulteriori dettagli tecnici, fare riferimento ai documenti sulla sicurezza nelle industrie di reforming forniti nel Curriculum internazionale sulla formazione per i vigili del fuoco sulla sicurezza dell'idrogeno. Come notato sopra, il processo avviene ad alta temperatura e pressione, quindi i problemi di sicurezza dell'idrogeno affrontati nelle prossime lezioni su perdite, incendi, rilevamento, mitigazione, ecc., sono ovviamente rilevanti anche per il reforming del vapore.



Figura 7. Steam reformer di AirLiquide [1]

3.1.5 Altre tecnologie

In questa lezione viene fornita una panoramica dei metodi non principali per la produzione di idrogeno. I vigili del fuoco dovrebbero essere a conoscenza di una varietà di metodi di produzione di idrogeno poiché il mercato FCH si sta espandendo rapidamente. Per ulteriori

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

informazioni sulle tecnologie di produzione di idrogeno alternative, utilizzare i riferimenti nel curriculum internazionale sulla formazione sulla sicurezza dell'idrogeno per i vigili del fuoco.

L'idrogeno può essere prodotto - dall'acqua tramite:

- Metodi nucleari (radiolisi o termolisi);
- Foto-elettrolisi (sistemi fotovoltaici accoppiati con elettrolizzatori);
- Ciclo termochimico;
- Metodo del ferrosilicio (acqua, idrossido di sodio e ferrosilicio);
- Water splitting fotobiologico (due fasi: fotosintesi e produzione di H catalizzata dalle idrogenasi);
- Scissione fotochimica dell'acqua;
- Vie biologiche (fermentative, enzimatiche, microbiologiche e biocatalitiche).

- da combustibili fossili tramite:

- Parziale ossidazione del petrolio;
- Gassificazione del carbone;
- Plasma reforming (idrocarburi leggeri riscaldati dal plasma a 1600 °C per produrre idrogeno e carbonio, nessuna emissione di CO₂);
- Dry reforming (reforming gas naturale nel flusso di CO₂)

- da idruri metallici complessi:

- $$\text{NaBH}_4 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NaOH} + \text{HBO}_3 + 5\text{H}_2 \quad (36 \% \text{ massa}) \quad (6)$$

Boroidruro di sodio
- $$\text{LiBH}_4 + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{LiOH} + \text{HBO}_3 + 5\text{H}_2 \quad (46 \% \text{ massa}) \quad (7)$$

Boroidruro di litio

Questi complessi idruri metallici sono attualmente oggetto di un'intensa ricerca al fine di sviluppare nuovi materiali adatti allo stoccaggio solido dell'idrogeno.

Tradizionalmente l'idrogeno viene prodotto utilizzando le tecnologie di reforming, che non sono "green" poiché si produce anidride carbonica. Sebbene l'idrogeno prodotto dal gas naturale sia certamente un'opzione praticabile a breve termine, non è visto come una soluzione a lungo termine. Si prevede che percorsi di produzione più "green" come l'elettrolisi e il nucleare ricopriranno un ruolo sempre più importante. Le risorse rinnovabili per la produzione di idrogeno includono biomassa, metanolo, etanolo e gas di discarica, parchi eolici, energia delle maree, energia idroelettrica, energia solare e gravitazionale. Poiché l'energia rinnovabile inizia a svolgere un ruolo più significativo nel soddisfare la domanda energetica della società moderna, le questioni del bilanciamento della rete e dello stoccaggio di energia sono oggetto di molte ricerche ed è qui che entra in gioco l'idrogeno come nuovo vettore energetico. Esistono

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

numerosi progetti in base ai quali l'eolico o l'energia solare è accoppiata alla produzione e allo stoccaggio di idrogeno, ad es. il progetto Pure (Scozia), la piattaforma MYRTE (Corsica, Francia), l'impianto di Puertollano (Ciudad Real, Spagna), l'impianto di energia eolica e idrogeni di Utsira (isola di Utsira, Norvegia) e diversi progetti FCH, ad esempio SOPHIA, PECDEMO, HYDROSOL-PLANT ecc.

3.1.6 Produzione di idrogeno decentralizzata

La produzione decentralizzata (o distribuita) di idrogeno si riferisce ai sistemi su un'ampia gamma di scale, da una comunità insulare a un elettrolizzatore domestico per uso personale. Il passaggio alla produzione distribuita può comportare l'indipendenza energetica per l'uso finale; tuttavia, significa anche che è necessaria una nuova "cultura della sicurezza" poiché il pubblico avrà una maggiore responsabilità. Alcuni esempi di sistemi domestici sono stati presentati da Honda e ITM:

- Honda home energy station:
<https://apps.honda.co.uk/environment/designingthefuture/homeenergystation/>
- ITM home system:
<https://www.itm-power.com/h2-stations>

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 successive. Lo stoccaggio dell'idrogeno è una tecnologia abilitante per una vasta gamma di applicazioni FCH, dallo stoccaggio a bordo dei veicoli FC alle applicazioni FC stazionarie. 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 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 per le comunità scientifiche che industriali.

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

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

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 gassoso compresso
- Stoccaggio liquefatto
- Stoccaggio 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 8). La tecnologia criocompressa è un'altra utile alternativa che consiste nello stoccaggio di idrogeno gassoso ad alta pressione e bassa temperatura. Le bombole/*cylinders* possono avere diverse dimensioni, capacità (da 20 a 300 L) e pressioni (20-70 MPa) e per alcune applicazioni possono essere collegate in un fascio o raggruppate in un canestro per il trasporto.

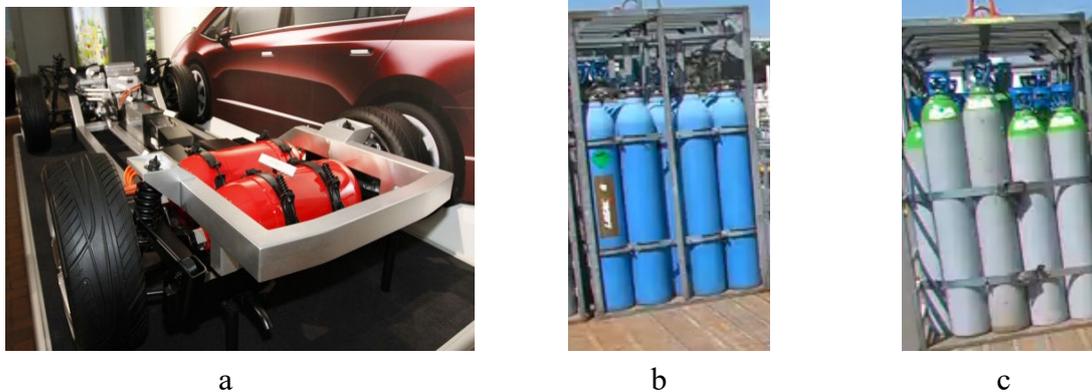


Figura 8. Stoccaggio di idrogeno a bordo di veicoli (a), fascio di cilindri (b) canestro di cilindri per il trasporto (c).

L'idrogeno può essere compresso a 20-100 MPa. I problemi principali con lo stoccaggio dell'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 così elevate e i costi aggiuntivi, ed il peso dei cilindri progettati 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 come caratteristica di sicurezza. Negli USA le bombole trasportabili sono dotate di dispositivi di limitazione della pressione. Questa prescrizione è molto controversa perché spesso diventano fonti di perdite. Lo stoccaggio dell'idrogeno gassoso compresso è solitamente integrato per i sistemi di stoccaggio dell'idrogeno stazionari e per lo stoccaggio a bordo dell'idrogeno nei veicoli FC [1].

L'idrogeno criogenico si forma 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 periodo di tempo o

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

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 opzione di stoccaggio non richiede né alte pressioni né basse temperature come nei due metodi precedenti; questo offre vantaggi per quanto riguarda la sicurezza dei materiali. Esistono tre meccanismi principali per immagazzinare l'idrogeno nei materiali: assorbimento, adsorbimento (Figura 9a) e reazioni chimiche (Figura 9, b-d). Gli esempi di materiali e composti adatti per lo stoccaggio dell'idrogeno solido sono mostrati di seguito nella Figura 9.

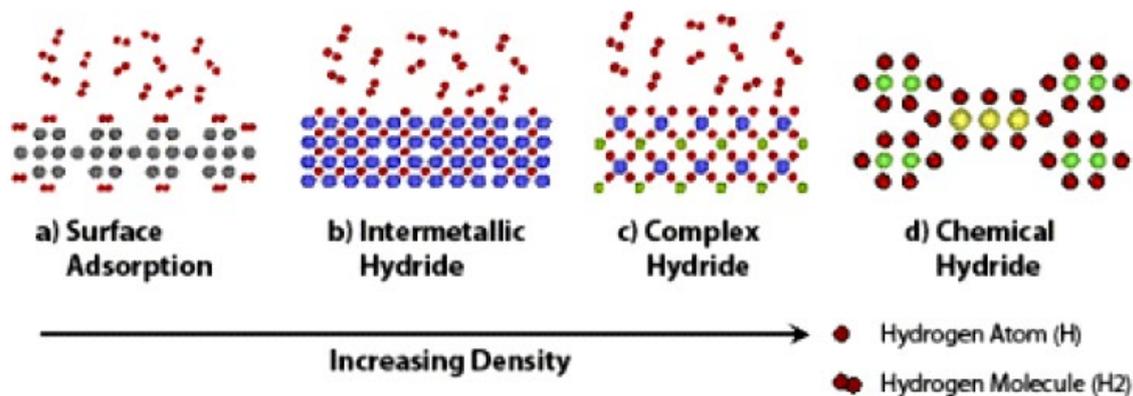


Figura 9. Materiali utilizzati per lo stoccaggio solido dell'idrogeno [2]. a) adsorbimento; b) idruro intermetallico; c) idruro complesso; d) idruro chimico.

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 FC.

3.3 Uso dell'idrogeno nell'industria

L'idrogeno è stato utilizzato nell'industria e conservato 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 nel dominio pubblico e dell'uso più frequente delle tecnologie FCH da parte di privati senza una formazione specifica sulla

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

sicurezza. La segnalazione degli incidenti mostra anche che dal numero totale di incidenti registrati finora solo una piccola percentuale si traduce in una 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 nelle emergenze, 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 galleggiabilità 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 all'interfaccia del consumatore con l'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 FC

Le tecnologie FCH per veicoli stradali e speciali sono oggi di grande importanza. Alcune case automobilistiche, come Toyota, hanno già avviato la vendita di veicoli FCH nelle regioni in cui sono già presenti infrastrutture di rifornimento. Gli esempi di veicoli stradali includono autovetture, autobus, scooter, autocarri leggeri, ecc. Questi usano l'idrogeno come carburante e non hanno motori a combustione in quanto viene invece utilizzata la cella a combustibile ed il motore elettrico. La disponibilità dell'infrastruttura è un passo fondamentale verso il successo commerciale di questi prodotti. Questi veicoli in apparenza sono simili ai veicoli convenzionali. 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 FC sono un buon 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 FC e nell'infrastruttura di rifornimento poiché traggono vantaggio dal loro utilizzo quasi immediatamente.

4.1 Le caratteristiche fondamentali dei veicoli FC

Le auto 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 FC, le seguenti caratteristiche (Figura 10) sono comuni per la maggior parte di esse [6]:

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

Durante il rifornimento, l'idrogeno viene fornito all'auto attraverso il recipiente di rifornimento (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 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 dell'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 management*) dove viene utilizzata per alimentare i motori di azionamento elettrici o caricare batterie (*batteries*) e ultra-condensatori (*ultra capacitors*).

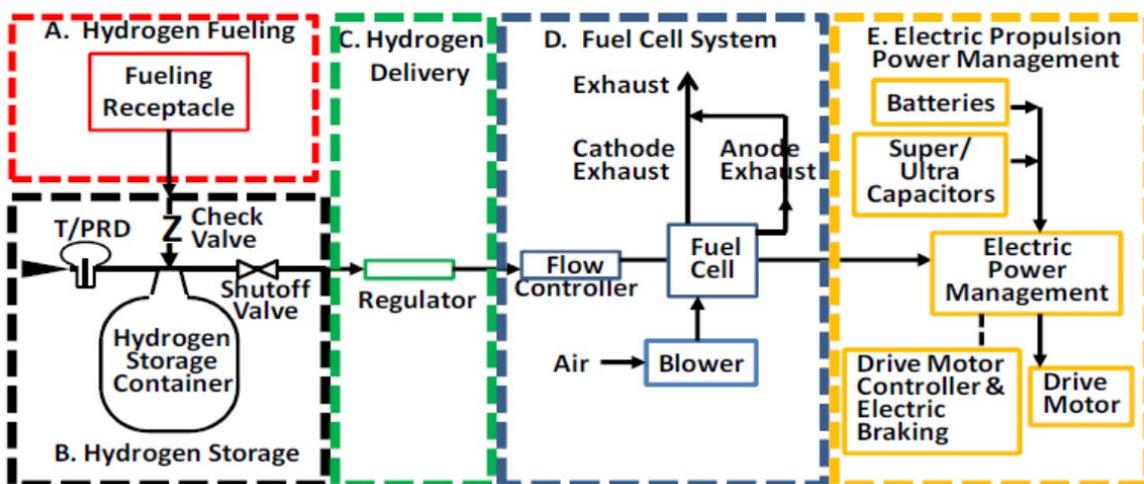


Figura 10. I sistemi caratteristici di un'auto FC [6]. *Check valve*: valvola di non ritorno; *shut-off valve*: valvola di intercettazione/arresto; *flow controller*: controllore del flusso; *blower*: aspiratore; *exhaust*: gas di scarico; *drive motor controller & electric braking*: controller dei i motori di azionamento e frenatura elettrica.

4.2 Auto FC

La Figura 11 illustra un layout tipico dei componenti chiave di una tipica automobile FC [6]. Il recipiente di rifornimento (*fueling receptacle*) è posizionato sul pannello posteriore della vettura come in altri veicoli comuni. Come per i sistemi a benzina, i contenitori 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 dalla compressione adiabatica durante il rifornimento.

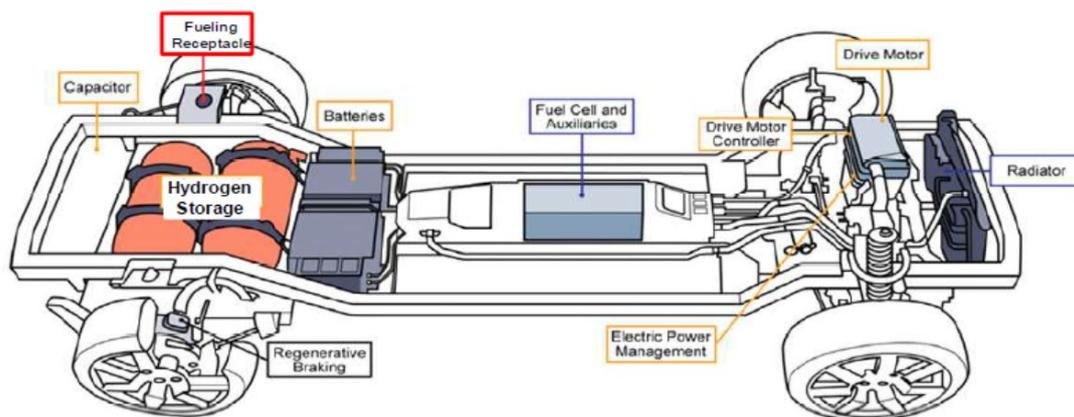


Figura 11. Esempio di auto FC [6]. *Regenerative braking*: freno rigenerativo; *radiator*: radiatore.

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 (CGH₂). Le bombole di gas compresso leggere in peso a 700 bar sono sviluppate 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 12). Ulteriori ricerche sono in corso per ridurre i costi di questi cilindri. Maggiori informazioni relative ai sistemi di stoccaggio dell'idrogeno a bordo saranno disponibili nelle lezioni successive.

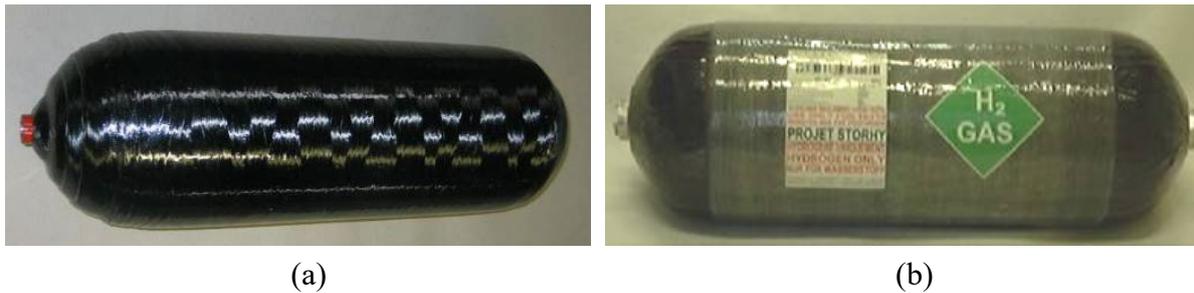


Figura 12. Prototipi di cilindri a 700 bar sviluppati e testati nell'ambito del progetto Europeo STORHY: (a) Tecnologia tipo III, (b) Tecnologia tipo IV.

4.2.2 Sistema di erogazione del carburante idrogeno

Il sistema di erogazione del carburante idrogeno trasferisce il gas dal sistema di stoccaggio al sistema di propulsione alla pressione e alla temperatura adeguate al 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 a causa della 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 (CO₂) o altre emissioni nocive tipiche dei motori a combustione interna alimentati a benzina/diesel. In generale, le pile a combustibile in un veicolo passeggeri generano una tensione di circa 400 V CC. Un convertitore collega anche la cella a combustibile con la batteria ad alta tensione. La temperatura di esercizio dell'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 i motori elettrici che muovono il veicolo, nonché per alimentare il motore della pompa dell'aria e il motore dell'aria condizionata. Molte autovetture 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 FC di tipo Sport Utility Vehicle più grandi possono essere a trazione

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

integrale con motori elettrici sugli assi 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 FC utilizzano diversi tipi di batterie come l'idruro metallico di nichel 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 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 ad alta tensione chiusi e sotto il veicolo. Possono essere facilmente identificati attraverso le distintive coperture protettive arancioni.

4.2.5 Caratteristiche e concetti di sicurezza

Nelle stazioni di rifornimento le vetture FC vengono rifornite attraverso uno speciale ugello sull'erogatore di carburante che si collega con il ricettacolo di rifornimento sull'auto per fornire un "sistema chiuso" di trasferimento di idrogeno all'auto. Il contenitore di rifornimento sull'auto 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 13](#). Il sistema include il contenitore e tutti gli altri componenti che formano il "perimetro 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).

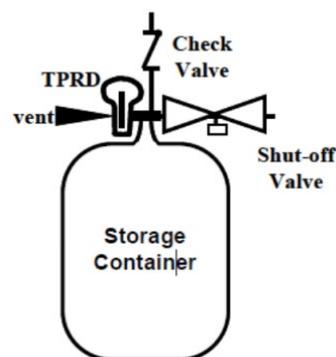


Figura 13. Tipico sistema di stoccaggio dell'idrogeno compresso [6].

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

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

contenitori di stoccaggio dell'idrogeno compresso prima che le alte temperature dell'incendio indeboliscano le pareti dei contenitori 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 contenitori di stoccaggio e i TPRD che sono stati soggetti a un incendio dovrebbero essere rimossi e distrutti. L'idrogeno viene solitamente (ma non sempre) rilasciato all'esterno del veicolo 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 sarà 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 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 FC. Quando viene rilevata una perdita di idrogeno potenzialmente pericolosa, il controller 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 "H₂" situata nel quadro strumenti ed il Driver's Information Center (DIC) mostrerà un messaggio "H₂ Detected" (H₂ rilevato). Se viene rilevato idrogeno a un "Livello di allarme", l'icona "H₂" lampeggerà, verrà emesso un segnale acustico e sul DIC [7] verrà visualizzato il messaggio "H₂ 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. Differenti 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

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

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 relative al 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 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 14. 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

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

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 15 mostra un layout del bus FC "All American" di SunLine [11]. In questo esempio l'idrogeno è immagazzinato come gas compresso (CGH₂). Adams [12] ha svolto una ricerca esaminando la pressione ottimale di stoccaggio a bordo richiesta dagli autobus dotati di serbatoi CGH₂. 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 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 nel vano motore.

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

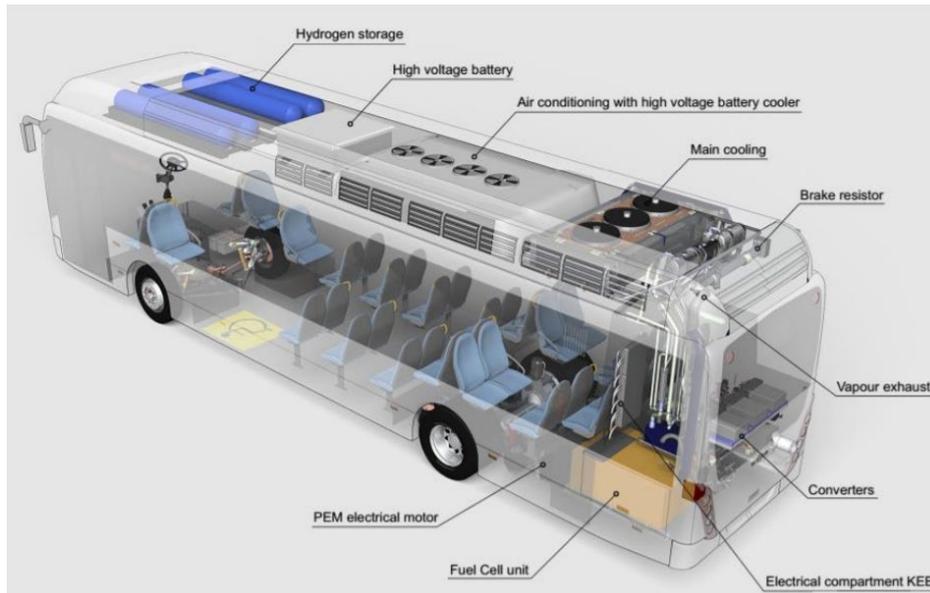


Figura 15. Layout dei componenti principali di un autobus FC [11]. Componenti in senso orario: stoccaggio dell'idrogeno; batteria ad alta tensione; raffreddamento dell'aria condizionata con batteria ad alta tensione; raffreddamento principale; resistore dei freni; vapori esausti; convertitori; compartimento 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 presente 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>).

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 16.



Un carrello elevatore FC



Fuel cell di un carrello elevatore FC

Figura 16. Un carrello elevatore FC e la sua unità FC [1].

I componenti principali di un'unità FC sono illustrati nella Figura 17. 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.

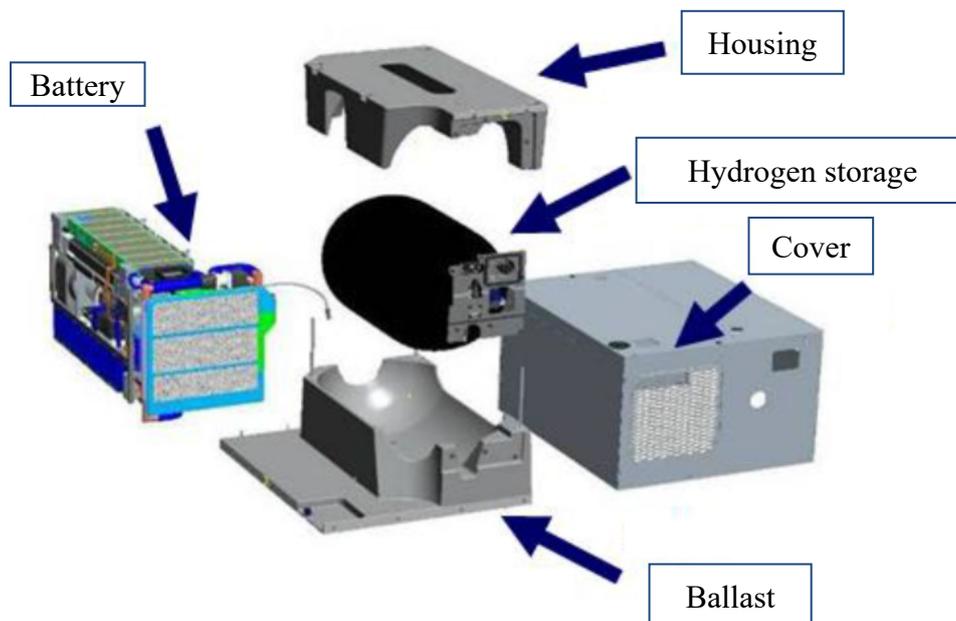


Figura 17. Componenti della Fuel Cell di un carrello elevatore. In ordine orario: batteria; custodia; serbatoio di idrogeno; copertura, ancoramento.

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 (LH₂) 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

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

velivoli alimentati a idrogeno liquido e a celle a combustibile è illustrata nella [Figura 18](#). 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.

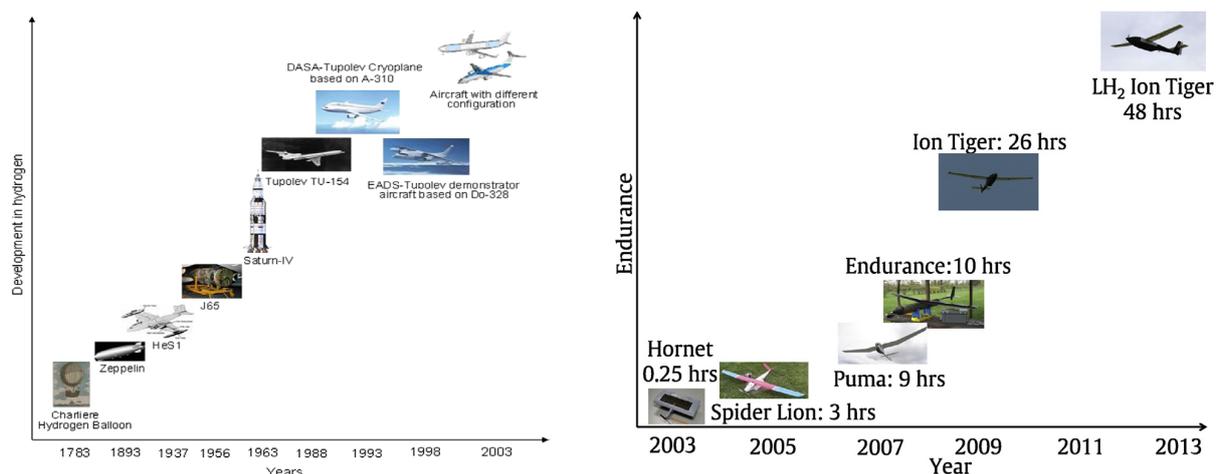


Figura 18. Cronologia storica dello sviluppo di velivoli ad idrogeno (sinistra) e Fuel Cell (destra).

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.

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

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].

4.5.1 L'idrogeno come carburante per la propulsione

L'idrogeno, con tutte le proprietà richieste per il suo utilizzo come combustibile, ha il più alto contenuto energetico per unità di massa di tutti i combustibili conosciuti (2,8 volte superiore rispetto al cherosene) [17, 18]. Questa proprietà è molto importante perché consente un maggiore carico utile [19]. Un altro vantaggio è che l'idrogeno promette una crescita a lungo termine nell'aviazione proteggendo l'ambiente [18].

L'uso dell'idrogeno come carburante per l'aviazione eliminerebbe la maggior parte delle emissioni di gas serra (GHG), comprese tutte le emissioni di carbonio, fuliggine e ossidi di zolfo [20]. I principali sottoprodotti dell'idrogeno in un processo di combustione sono il vapore acqueo e gli ossidi di azoto (NOX) [21]. Tuttavia, le quantità di emissioni di NOX rilasciate dalla combustione dell'idrogeno sono estremamente basse rispetto a quelle rilasciate durante la combustione del cherosene [22]. Inoltre, l'adozione dell'idrogeno come carburante per jet può fornire un livello stabile a lungo termine dei prezzi del carburante e anche migliorare l'affidabilità della fornitura di carburante perché può essere ottenuto da diversi tipi di fonti e questo riduce la dipendenza da combustibili fossili concentrati solo in poche regioni del mondo [23, 24]. Pertanto, l'idrogeno è ritenuto adatto all'industria aeronautica perché è in grado di fornire un approvvigionamento energetico pulito, affidabile e conveniente che ha emissioni inquinanti estremamente basse e quindi ha un basso impatto sull'ambiente [21].

Affinché l'idrogeno sia redditizio per l'industria aeronautica, la sua densità volumetrica o densità di energia per unità di volume deve essere aumentata [25, 26]. In confronto al cherosene, è necessario un volume quattro volte maggiore di LH₂ per fornire la stessa quantità di energia [27]. Tuttavia, nonostante questo inconveniente, è stato riportato che gli aerei alimentati a idrogeno sono più efficienti in termini di peso e comportano costi operativi inferiori rispetto a quelli alimentati a cherosene [27]. In generale, l'utilizzo dell'idrogeno come carburante per l'aviazione richiede la modifica del design sia degli aerei che dei motori. L'LH₂ utilizzato negli aeromobili alimentati a idrogeno deve essere mantenuto a temperature molto basse e per questo può essere stoccato solo in serbatoi altamente isolati e non nelle ali che hanno uno spazio ristretto per ospitare LH₂ e non possono essere adeguatamente isolati. Con gli enormi requisiti di volume dei serbatoi di idrogeno, il design dell'aeromobile deve essere modificato con un volume maggiore e una fusoliera più pesante, che è la posizione migliore per i serbatoi di carburante LH₂. Per i velivoli a corto-medio raggio, i serbatoi di idrogeno

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

potrebbero essere collocati sopra la cabina passeggeri mentre per i velivoli a lungo raggio l'idrogeno è immagazzinato in due grandi serbatoi integrali; uno di questi si trova direttamente dietro l'abitacolo e il secondo è posizionato all'estrema poppa della cabina passeggeri [28]. La configurazione dei serbatoi di idrogeno ha un impatto significativo sull'efficienza energetica degli aerei alimentati a idrogeno [28]. Il design del serbatoio superiore, utilizzato negli aerei a corto e medio raggio, può aumentare il consumo di energia del 6–19% a causa del peso maggiore di questo tipo di serbatoi. D'altra parte, il design integrale, adatto per velivoli a lungo raggio, può aumentare l'efficienza energetica del 12% [28]. Pertanto, si può concludere che il carburante a idrogeno è più adatto per gli aerei a lungo raggio. Poiché la fusoliera degli aerei a idrogeno viene utilizzata per immagazzinare i serbatoi di idrogeno, è necessaria una fusoliera più pesante e più grande per supportare i carichi generati da questi serbatoi. La massa della fusoliera negli aerei a idrogeno è quasi il 6% più grande di un aereo normale [24]. Oltre a modificare il design dell'aeromobile, il motore deve essere cambiato durante la conversione in idrogeno a causa della variazione dei gas di combustione e delle proprietà tra il cherosene e l'idrogeno. I motori più piccoli possono essere utilizzati per il carburante a idrogeno [24]. I cambiamenti nella progettazione degli aeromobili e dei motori quando si utilizza l'idrogeno comportano un aumento dei costi di produzione e manutenzione che potrebbero arrivare fino al 25% [23].

4.5.2 Cella a combustibile ad idrogeno per l'aviazione

Una cella a combustibile a idrogeno è un dispositivo elettrochimico che genera elettricità attraverso una reazione elettrochimica tra idrogeno e ossigeno. Le celle a combustibile sono silenziose, producono poche vibrazioni e non producono emissioni di NO_x, il che le rende molto interessanti per un'ampia gamma di applicazioni. Tra i vari tipi di dispositivi a celle a combustibile, sono state principalmente considerate le celle a combustibile PEM e le celle a combustibile a ossido solido (SOFC) per le applicazioni aeronautiche. Le celle a combustibile a idrogeno potrebbero essere utilizzate a bordo degli aerei per alimentare diversi elementi e sistemi che sono attualmente alimentati da batterie come il sistema delle porte di emergenza, l'illuminazione del percorso di evacuazione sul pavimento, il trasmettitore del localizzatore di emergenza (ELT), il registratore dei dati di volo (FDR) e il registratore della voce della cabina di pilotaggio (CVR).

L'unità di potenza ausiliaria (APU) dell'aeromobile è una piccola turbina a gas che funge da fonte di elettricità e aria compressa per il funzionamento di altri componenti dell'aeromobile, come i motori a reazione e sistemi ambientali, quando i motori principali non sono in funzione. I sistemi a celle a combustibile potrebbero essere utilizzati al posto dell'APU tradizionale o combinati con essi per formare un sistema APU ibrido [29]. Sia le PEMFC che le SOFC possono essere utilizzate per i sistemi APU [30]. Tuttavia, la SOFC è più vantaggiosa per le applicazioni aeronautiche, in particolare per l'alimentazione di APU [29]. La SOFC è più tollerante alle impurità del carburante e può operare utilizzando l'idrogeno generato dal reforming del cherosene [29]. Inoltre, l'elevata temperatura di esercizio del SOFC consente il

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

processo di reforming interno del carburante degli aerei e ne aumenta l'efficienza. Tuttavia, il peso dell'APU alimentata da SOFC è maggiore delle celle a combustibile PEM o delle APU tradizionali perché richiede elementi di bilanciamento dell'impianto (BoP) più grandi come il reformer, compressore, pompe, scambiatori di calore e così via. La cella a combustibile PEM può essere utilizzata per alimentare l'APU solo se la fonte di idrogeno è installata sull'aeromobile.

Con il crescente interesse per il miglioramento della qualità dell'aria intorno agli aeroporti, i dispositivi a celle a combustibile hanno ricevuto una maggiore attenzione grazie al loro potenziale nell'alimentare diverse apparecchiature di supporto a terra (GSE) e altri veicoli a terra che lavorano negli aeroporti, come navette passeggeri e camion di rifornimento, nel prossimo futuro [30]. I dispositivi GSE o di gestione degli aeromobili vengono utilizzati per servire passeggeri, merci, strutture e aeromobili mentre si trovano in aeroporto tra un volo e l'altro. Il GSE contiene diversi sistemi di servizio che hanno requisiti di alimentazione diversi. Oggi, molti dei GSE che lavorano nell'aeroporto sono alimentati da celle a combustibile a idrogeno. Il Dipartimento dell'Energia (DOE) ha annunciato che circa 250 milioni di dollari US saranno utilizzati per distribuire celle a combustibile per i veicoli per bagagli negli aeroporti [31]. I carrelli elevatori a celle a combustibile di medie dimensioni sono già stati testati nei principali aeroporti come Toronto Pearson, Amburgo e Monaco di Baviera [32]. Questi carrelli elevatori possiedono molti vantaggi come la bassa rumorosità, nessuna emissione e minore manutenzione. Hanno quasi le stesse dimensioni di quelli tradizionali alimentati a batteria, ma non richiedono la sostituzione della batteria, il che è molto impegnativo per la maggior parte dei carrelli elevatori convenzionali. Inoltre, il tempo di rifornimento è stato visto come un grande vantaggio per i carrelli elevatori alimentati a celle a combustibile rispetto a quelli a batteria in quanto può essere completato in pochi minuti mentre la ricarica della batteria richiede delle ore [33]. Le celle a combustibile possono essere utilizzate anche per più di otto ore senza richiedere alcun rifornimento. Pertanto, si può concludere che la sostituzione delle batterie tradizionali con le celle a combustibile nei carrelli elevatori è economicamente fattibile rispetto al costo di capitale iniziale nonché ai costi operativi. L'aeroporto danese utilizza attualmente carrelli portabagagli che funzionano a celle a combustibile. Nel 2015, FedEx ha lanciato i primi trainanti cargo GSE alimentati a celle a combustibile in grado di trainare circa 15 t di carico [34]. Oltre alle applicazioni GSE, le celle a combustibile possono essere utilizzate per alimentare i veicoli aeroportuali come gli autobus passeggeri. A Tokyo, alcuni degli autobus che operano sulla rotta tra il centro di Tokyo e l'aeroporto di Tokyo hanno dei sistemi ibridi a celle a combustibile a idrogeno/batteria [35]. L'aeroporto internazionale delle Hawaii ha stabilito un piano per utilizzare un autobus ibrido a celle a combustibile/batteria per trasportare i passeggeri tra i terminal dell'aeroporto e la struttura di noleggio auto [36]. La cella a combustibile è anche considerata una possibile nuova fonte di energia alternativa alle batterie esistenti nei veicoli aerei senza pilota (UAV). Il costo è il fattore più interessante degli UAV a batteria in quanto è quasi la metà del prezzo della cella a combustibile. Tuttavia, l'aumento del peso della batteria necessaria per raggiungere un lungo periodo di volo è stato segnalato come

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

un fattore limitante degli UAV a batteria [37]. Il principale vantaggio delle celle a combustibile per l'alimentazione degli UAV include la possibilità di estendere il tempo di missione e la distanza grazie alla densità di energia superiore, fornendo un funzionamento silenzioso e affidabile, riducendo la carica della batteria al litio e gli ostacoli di trasporto [38]. Le celle a combustibile PEM sono preferite per le applicazioni degli UAV in quanto possono funzionare a bassa temperatura e ciò significa requisiti di BoP inferiori. Nel 2005, AeroVironment ha sviluppato il primo UAV a celle a combustibile [39]. L'aereo, che ha un'apertura alare di 15 m, è stato alimentato con un sistema di propulsione PEMFC ed è riuscito a completare più di un'ora di volo utilizzando solo idrogeno liquefatto. Successivamente nel 2006, Bradley et al. [40] ha progettato e testato un UAV alimentato a celle a combustibile utilizzando idrogeno compresso. Con un'apertura alare di 6,58 m e una massa totale di 16,4 kg, gli autori hanno dimostrato che l'aereo può essere alimentato utilizzando una cella a combustibile PEM da 500 W. Attualmente, ci sono notevoli sforzi di ricerca in tutto il mondo per progettare, sviluppare e costruire UAV alimentati a celle a combustibile. Questi sforzi hanno portato a un aumento significativo della resistenza che ha superato le 48 ore [41]. La riduzione del peso delle celle a combustibile, il miglioramento della loro affidabilità e durata, l'accelerazione del loro avvio e l'aumento della densità di potenza renderanno la tecnologia delle celle a combustibile più attraente per gli UAV [42].

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 gasdotti.

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 (CGH₂) 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 19). La pressione di stoccaggio varia da 200 a 300 bar e un trailer può trasportare da 2.000 a 6.200 Nm³ di CGH₂ 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

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

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.



Fonte: AirLiquide, 2014.

Figura 19. Due tipologie di trailer CGH₂ operati da AirLiquide in Europa: (a) trailer tubolari, trasporto da 2,000 a 3,000 Nm³ di idrogeno e (b) trailer di cilindri compositi, trasporto di 6,200 Nm³ 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 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 20 mostra l'unità di stoccaggio contenente quattro serbatoi compositi 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 20. Trailer con quattro contenitori compositi sviluppati dalla Lincoln Composites.

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

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 compositi 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,
 - 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 m³/h). In termini di capacità di peso, le autocisterne super-isolate a idrogeno liquido (LH₂) possono trasportare fino a 10 volte più idrogeno rispetto ai rimorchi tubolari utilizzati per il trasporto di CGH₂. Gli automezzi LH₂ operanti a pressione atmosferica hanno capacità volumetriche di circa 50.000 – 60.000 litri e possono trasportare fino a 4.000 kg (Figura 21). Questa è la modalità di distribuzione preferita

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

per quantità medio/grandi di idrogeno su lunghe distanze, il che spiega perché il business dell' LH_2 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 21. Autocisterna su strada usata da Air Liquide per il trasporto di LH_2 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) [58]. I costi dell'elettricità rappresentano il 50-80% dei costi di liquefazione. La distanza è il principale fattore decisivo tra il trasporto di LH_2 e l'idrogeno gassoso CGH_2 . Il numero di automezzi per il trasporto di LH_2 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 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_2 . 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^3). Sono in corso numerosi studi per migliorare le

Lezione 1: Introduzione alla sicurezza dell'idrogeno per i soccorritori 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 22](#)).



Fonte: NPROXX, 2020

Figura 22. Trasporto di idrogeno su ferrovia.

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

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

soluzione realmente sostenibile, soprattutto quando i treni a celle a combustibile continueranno a essere riforniti in futuro.

5.3 Gasdotti

Oggi giorno vengono utilizzati numerosi gasdotti commerciali per distribuire grandi quantità (decine di migliaia di m³/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, Thailandia, 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 23](#) mostra alcune parti della rete mondiale di gasdotti. Ad esempio, il gasdotto lungo 240 km nell'area della Ruhr in Germania ([Figura 23a](#)) 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

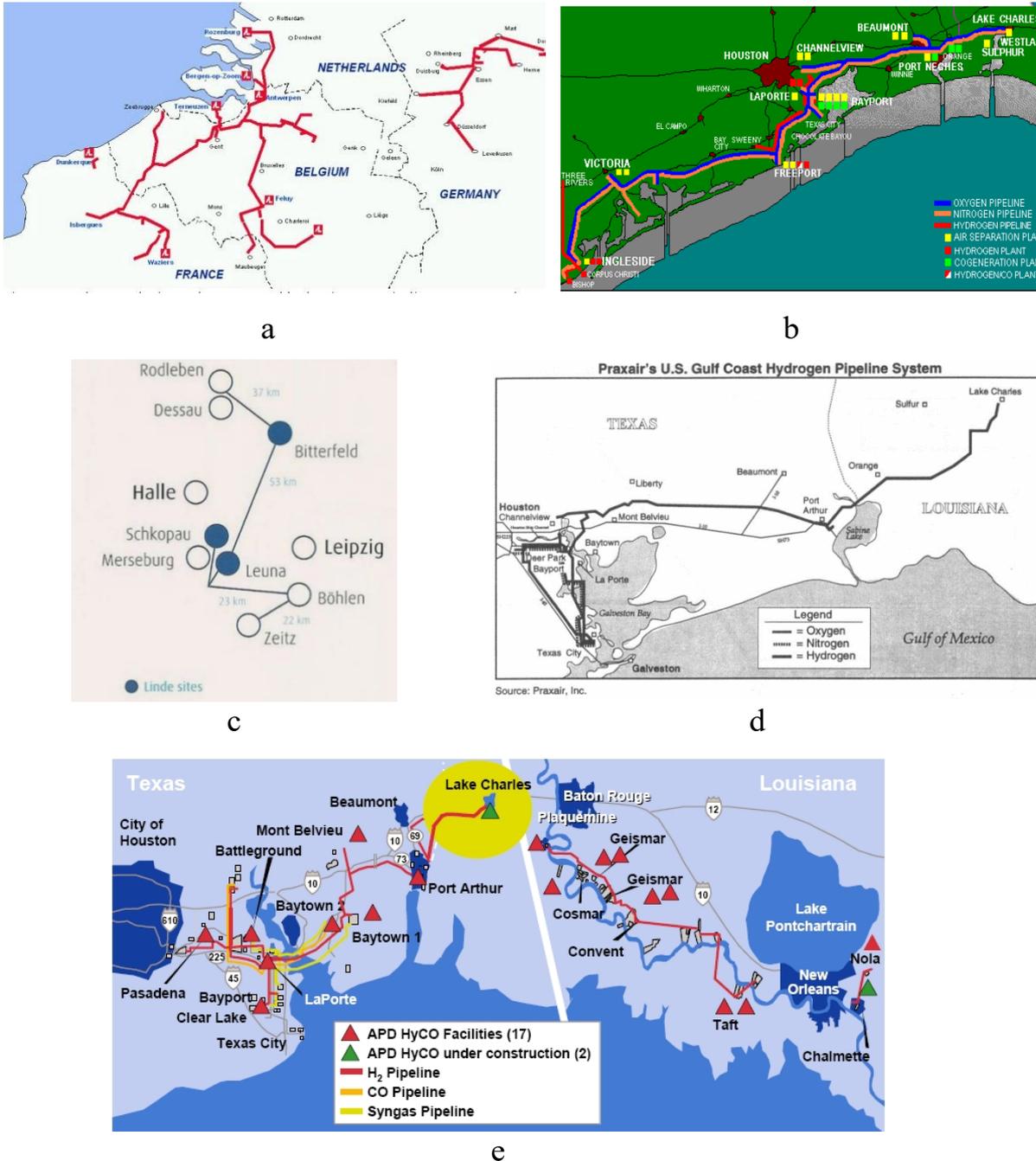


Figura 23. Principali gasdotti di idrogeno nel mondo: (a) Air Liquide - Benelux, Francia e Germany (area di Ruhr); (b) Air Liquide - costa del Golfo (USA); (c) Linde - Germania; (d) Praxair - costa del Golfo (USA); (e) Air Product - costa del Golfo (USA).

I gasdotti/pipelines richiedono adeguate procedure di progettazione, installazione e manutenzione. La pressione di esercizio delle tubazioni dell'idrogeno è generalmente inferiore a 100 bar (più comunemente tra 40 e 70 bar) e il diametro delle tubazioni (D) varia generalmente da 10 a 300 mm. Le attuali condutture sono fatte di acciaio. Un problema tecnico è l'infragilimento da idrogeno delle tubazioni metalliche e delle saldature, caratterizzato da una perdita di duttilità e rottura quando soggette a sollecitazioni. Gli acciai utilizzati per le condutture dell'idrogeno sono acciai a basso tenore di carbonio, basso-legati e a bassa

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

resistenza per ridurre il rischio di infragilimento (es. acciaio API X42 con contenuto di carbonio $C < 0,2 \%$ in peso, contenuto di manganese $Mn < 1,3 \%$ in peso). Questi acciai combinano l'economicità con un'adeguata gamma di proprietà fisiche quali resistenza, tenacità, duttilità e saldabilità. Per motivi di sicurezza, la maggior parte delle tubazioni sono interrate e gli acciai sono protetti con rivestimenti o con una protezione catodica per prevenire la corrosione.

La costruzione della conduttura prevede vaste saldature per le giunzioni, con un minimo numero di ispezioni prima dell'operazione per motivi di sicurezza. L'utilizzo di una rete di gasdotti richiede anche stazioni di compressione poiché l'idrogeno è generalmente disponibile a bassa pressione. I compressori di idrogeno che alimentano il sistema di gasdotti si trovano solitamente nei luoghi in cui viene prodotto l'idrogeno. I compressori sono costosi e richiedono un'elevata manutenzione, quindi non vengono installati se è possibile un'altra alternativa. Ad esempio, quando l'idrogeno viene prodotto utilizzando gas naturale (steam reforming), la materia prima del gas naturale può essere compressa e l'impianto di produzione può operare a una pressione più elevata. Le perdite per attrito nelle condotte con idrogeno sono molto inferiori rispetto a quelle nel gas naturale poiché la viscosità dell'idrogeno è inferiore (la perdita di energia durante il trasporto dell'idrogeno è di circa il 4% del contenuto energetico).

Un gasdotto d'idrogeno trasporta circa il 30% in meno di energia rispetto al gasdotto naturale a causa della minore densità volumetrica dell'idrogeno. La distribuzione di maggiori quantità di energia nelle condotte dell'idrogeno richiede un aumento della pressione di flusso (> 100 bar). Questo aumento della pressione può avere implicazioni per il materiale che potrebbe essere utilizzato nella costruzione della condotta. Inoltre, le condizioni operative di una condotta a idrogeno per applicazioni energetiche sarebbero diverse da quelle di una condotta industriale che oggi opera a pressioni pressoché costanti, senza cicli di pressione significativi. Le condutture di idrogeno dovrebbero sopportare variazioni di pressione. Questo può essere un problema a causa della suscettibilità degli acciai all'infragilimento da idrogeno che influisce sulle loro proprietà meccaniche e diminuisce la loro resistenza alle crepature da fatica. I fenomeni di infragilimento da idrogeno saranno discussi nella lezione "Stoccaggio dell'idrogeno". Vi è un rinnovato interesse per la ricerca per lo sviluppo di nuovi materiali per condotte compatibili con l'idrogeno e la loro idoneità ad operare a pressioni più elevate, e per ridurre i costi di capitale. Vengono esplorati nuovi acciai per sviluppare una migliore comprensione dell'infragilimento da idrogeno e per identificare le composizioni e i processi dell'acciaio adatti alla costruzione di una nuova infrastruttura di gasdotti o al potenziale utilizzo dell'infrastruttura esistente di condotte in acciaio.

La ricerca attuale si concentra anche sull'alternativa ai gasdotti metallici per raggiungere obiettivi di costi e prestazioni per la trasmissione e la distribuzione dell'idrogeno. Vengono studiate tubazioni polimeriche e polimeriche rinforzate con fibre, che presentano i vantaggi di essere più leggere, più facili da maneggiare, unire e saldare, insensibili alla corrosione, non sensibili all'infragilimento da idrogeno a differenza degli acciai. I tubi polimerici attualmente utilizzati nella rete di distribuzione del gas naturale sono realizzati in polietilene e hanno una

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

pressione nominale limitata a 10 bar. Polimeri come la poliammide destano il maggiore interesse in quanto la permeabilità dell'idrogeno è notevolmente ridotta e le sue proprietà termomeccaniche consentono alle tubazioni di sostenere una pressione di esercizio di 20 bar e una temperatura di esercizio di 80°C.

Pertanto, i tubi polimerici possono essere una valida alternativa all'acciaio grazie al risparmio sui costi di installazione e manutenzione. Tuttavia, i costi di questi nuovi materiali polimerici possono essere molto elevati. I tubi realizzati in materiali compositi polimero/plastica (FRP) rinforzati con fibre sono composti da un rivestimento termoplastico (principalmente polietilene) avvolto con fibre ad alta resistenza (tipicamente fibre aramidiche) rivestite con uno strato termoplastico. Quest'ultimo strato protegge dagli attacchi ambientali e aiuta a trattenere l'involucro responsabile delle proprietà meccaniche. Rispetto ai semplici tubi in plastica, l'avvolgimento con fibre aramidiche consente di ottenere pressioni fino a 100 bar. Questi tubi in plastica rinforzata sono già utilizzati per la distribuzione di gas naturale o petrolio greggio nel Medio Oriente e il loro sviluppo per la fornitura di idrogeno è attualmente parte del programma US DOE Hydrogen (Figura 24). I tubi in FRP potrebbero essere sostituiti economici dei tubi metallici quando vengono installate estese lunghezze (da 200 a 300 metri). Tuttavia, il processo di fabbricazione non può produrre tubi in plastica con diametri tanto larghi quanto i tubi in acciaio (100 e 150 mm). Sono ancora necessari ulteriori sviluppi per valutare la fattibilità di operazioni di produzione su larga scala, valutare la tecnologia di giunzione e sviluppare codici e standard per i gasdotti FRP per servizi a idrogeno.



Figura 24. Tubazione in FRP composito.

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 Cell (SOFC) e PEM FC. Il gas naturale viene convertito per produrre idrogeno e una miscela

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

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 il monossido di carbonio e i 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 25 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 25. 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 sfiato. Dopo lo sfiato, 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 rateo 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 [59].
- 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 marittime:

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



Figura 26. Modulo Fuel Cell Ballard 100 kW per applicazioni marittime.

Le celle a combustibile Ballard PEM (membrana a scambio protonico) sono modulari (Figura 26), 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, posti 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 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. 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 27). Il progetto alimenterà una barca da rimorchio su uno dei fiumi più impegnativi del mondo, il Rodano.



Figura 27. 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 inasprando 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 sull'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 28](#). 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].

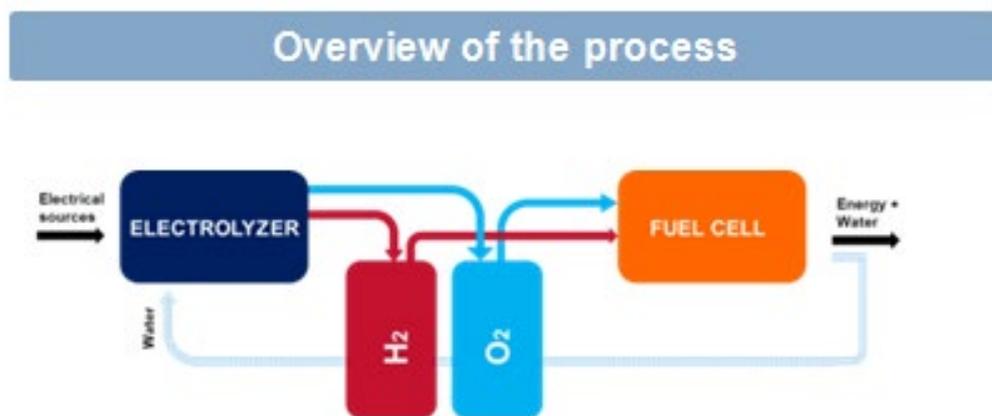


Figura 28. Panoramica della linea di processo del Greenenergy Box.

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 28](#)). 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 29.

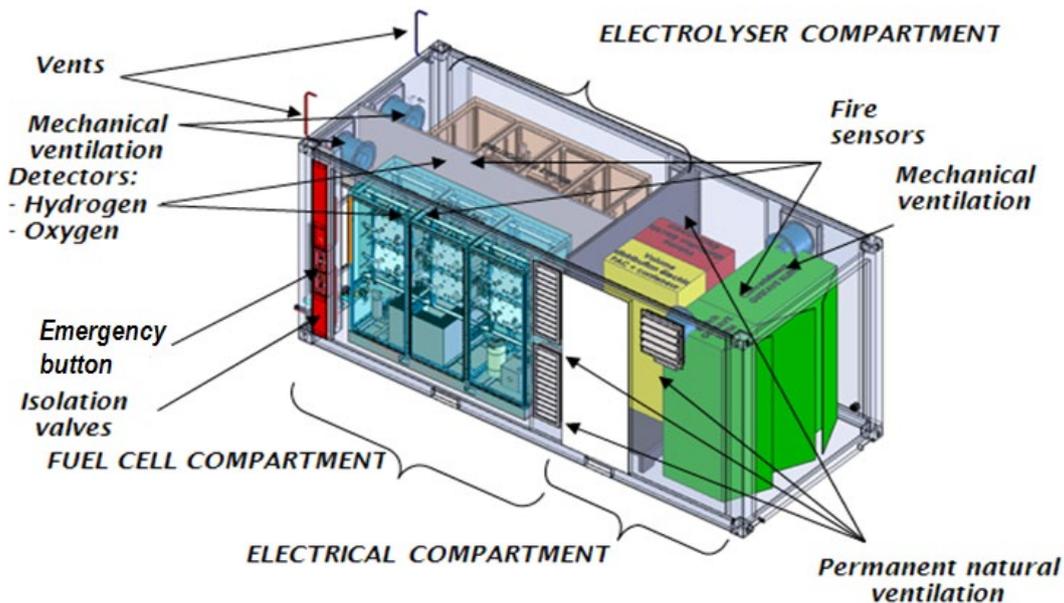


Figura 29. Schema del Greenenergy Box™ [1]. Componenti in senso orario - *fire sensors*: sensori antincendio; *mechanical ventilation*: ventilazione meccanica; *permanent natural ventilation*: ventilazione naturale permanente; *isolation valves*: valvole di intercettazione; *emergency button*: pulsante 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. % H₂ nell'aria) e un arresto di emergenza avviene al 25% dell'LFL (1 vol. % H₂ 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.
 - I tre scomparti del Greenenergy Box™ sono ventilati naturalmente grazie a prese d'aria laterali poste su entrambi i lati del contenitore (Figura 28).
 - 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 m³/h per la cella FC e 2.700 m³/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. È stato osservato che la nube d'aria-idrogeno viene completamente diluita in meno di 2 s.
- Soppressione/Riduzione delle sorgenti di innesco.
- L'interno del Greenenergy BoxTM 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 BoxTM 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 BoxTM 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 BoxTM 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-pessurizzazione.
- 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 30. 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) [44]. 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 del compartimento 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 [44]. Uno studio franco-russo [45] 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 30](#).

9.3 Incidente in una stazione di rifornimento

Un rilascio di idrogeno si è verificato presso la stazione di rifornimento di Emeryville [60]. 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 al quadro e agli standards dell'ingegneria della sicurezza dell'idrogeno

L'ingegneria della sicurezza dell'idrogeno (HSE) è definita come un'applicazione di principi scientifici e ingegneristici per la protezione della vita, della proprietà e dell'ambiente dagli effetti negativi di incidenti che coinvolgono l'idrogeno [46]. Nonostante i progressi nella scienza e nell'ingegneria della sicurezza dell'idrogeno durante l'ultimo decennio, in particolare attraverso la partnership HySafe [47], una metodologia globale basata sulle prestazioni per svolgere HSE è ancora formalmente assente. L'HSE comprende un quadro di progettazione e sottosistemi tecnici. Un framework di progettazione per HSE, sviluppato presso l'Università dell'Ulster, è simile allo standard britannico BS7974 per l'applicazione dell'ingegneria della sicurezza antincendio alla progettazione di edifici [48] ed è ampliato per comprendere i fenomeni specifici correlati alla sicurezza dell'idrogeno, inclusi ma non limitati a perdite sotto-espansione ad alta pressione e dispersione, accensione spontanea di improvvisi rilasci di idrogeno nell'aria, jet fires ad alta quantità di moto, deflagrazioni e detonazioni, tecniche di mitigazione, ad es. sfogo della deflagrazione e ventilazione naturale/forzata, ecc. Il processo HSE comprende tre fasi principali come indicato in [Figura 31](#).

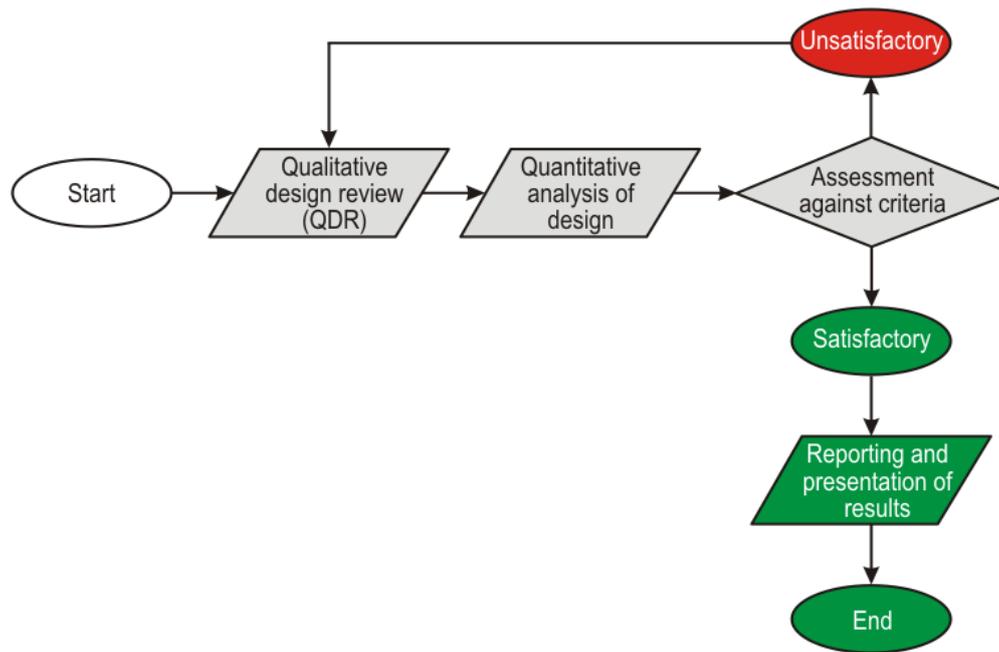


Figura 31. Fasi del processo di ingegneria della sicurezza dell'idrogeno [44].

Inizialmente, una revisione qualitativa del progetto (*Qualitative design review* in Figura 31 - QDR) è intrapresa da un team che può includere il proprietario, l'ingegnere per la sicurezza dell'idrogeno, l'architetto, il rappresentante delle autorità competenti, ad es. servizi di emergenza e altre parti interessate. Il team definisce gli scenari di incidenti, suggerisce progetti di sicurezza di prova e formula i criteri di accettazione. In secondo luogo, un'analisi quantitativa della sicurezza di scenari e progetti di prova selezionati (*quantitative analysis of design* in Figura 31) viene eseguita da ingegneri qualificati per la sicurezza dell'idrogeno utilizzando le conoscenze all'avanguardia nella scienza e nell'ingegneria della sicurezza dell'idrogeno e modelli e strumenti convalidati. In terzo luogo, le prestazioni di un sistema a idrogeno e/o celle a combustibile nell'ambito dei progetti di sicurezza di prova vengono valutate in base a criteri di accettazione predefiniti (*Assessment against criteria* in Figura 31). Il QDR è un processo qualitativo basato sull'esperienza e sulle conoscenze del team. Consente ai suoi membri di stabilire una serie di strategie di sicurezza. Idealmente, il QDR deve essere eseguito all'inizio del processo di progettazione e in modo sistematico, in modo che tutti i risultati sostanziali e gli elementi pertinenti possano essere incorporati nella progettazione dell'applicazione o dell'infrastruttura HFC prima che i disegni esecutivi vengano sviluppati. In pratica, tuttavia, è probabile che il processo QDR implichi alcune iterazioni poiché il processo di progettazione passa da un concetto ampio a un maggiore dettaglio. Gli obiettivi di sicurezza dovrebbero essere definiti durante il QDR. Questi dovrebbero essere adeguati agli aspetti particolari della progettazione del sistema, poiché l'HSE può essere utilizzato per sviluppare una strategia di sicurezza completa dell'idrogeno o per considerare solo un aspetto della progettazione. I principali obiettivi di sicurezza dell'idrogeno sono la sicurezza della vita, il controllo delle perdite e la protezione dell'ambiente. Il team QDR dovrebbe stabilire uno o più progetti di

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

sicurezza di prova tenendo in considerazione gli scenari di incidenti selezionati. Le diverse progettazioni potrebbero soddisfare gli stessi obiettivi di sicurezza e dovrebbero essere confrontate tra loro in termini di rapporto costo-efficacia e praticabilità. A prima vista, è essenziale che i progetti di prova limitino i rischi implementando misure di prevenzione e garantendo la riduzione della gravità e della frequenza delle conseguenze. Sebbene l'HSE offra un certo grado di libertà, è obbligatorio rispettare pienamente le normative pertinenti quando si definiscono i progetti di prova. Il team QDR deve stabilire i criteri di accettazione in base ai quali può essere giudicata la performance di un progetto. È possibile utilizzare tre metodi principali: deterministico, comparativo e probabilistico. Il team QDR può, a seconda dei progetti di prova, definire i criteri di accettazione seguendo tutti e tre i metodi. Il team QDR dovrebbe fornire una serie di output qualitativi da utilizzare nell'analisi quantitativa: risultati della revisione architettonica; obiettivi di sicurezza dell'idrogeno; pericoli significativi e fenomeni associati; specificazioni degli scenari di analisi; uno o più modelli di prova; criteri di accettazione e metodi di analisi suggeriti. Dopo il QDR, il team dovrebbe decidere quale/i progetto/i di prova sarà probabilmente ottimale. Il team dovrebbe quindi decidere se è necessaria un'analisi quantitativa per dimostrare che il progetto soddisfa gli obiettivi di sicurezza dell'idrogeno. A seguito del QDR può essere effettuata un'analisi quantitativa utilizzando i Sottosistemi Tecnici (TSS) dove vari aspetti dell'analisi possono essere quantificati mediante uno studio deterministico o uno studio probabilistico.

Il processo di quantificazione è preceduto dalla procedura QDR per due ragioni principali: garantire che il problema sia pienamente compreso e che l'analisi affronti gli aspetti rilevanti del sistema di sicurezza dell'idrogeno; e per semplificare il problema e ridurre al minimo lo sforzo di calcolo richiesto. Inoltre, il team QDR dovrebbe identificare metodi di analisi appropriati tra: semplici calcoli ingegneristici; simulazioni CFD; semplice studio probabilistico; studio probabilistico completo, ecc. Uno studio deterministico che utilizza criteri comparativi richiede generalmente meno dati e risorse rispetto a un approccio probabilistico ed è probabile che sia il metodo più semplice per ottenere un progetto accettabile. È probabile che uno studio probabilistico completo sia giustificato solo quando viene adottato un approccio sostanzialmente nuovo alla progettazione del sistema a idrogeno o alla pratica di sicurezza dell'idrogeno. L'analisi può essere una combinazione di alcuni elementi deterministici e alcuni probabilistici. A seguito dell'analisi quantitativa, i risultati dovrebbero essere confrontati con i criteri di accettazione individuati durante l'esercizio QDR. Si possono considerare tre tipi fondamentali di approccio per valutare le prestazioni del sistema di sicurezza in base ai criteri:

- L'approccio deterministico mostra che sulla base delle ipotesi iniziali non si verificherà un insieme definito di condizioni;
- L'approccio comparativo mostra che il progetto fornisce un livello di sicurezza equivalente a quello di sistemi simili e/o è conforme a codici prescrittivi (in alternativa all'HSE basato sulle prestazioni);

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

- L'approccio probabilistico mostra che il rischio che un determinato evento si verifichi è accettabilmente basso, ad es. pari o inferiore al rischio stabilito per sistemi esistenti simili.

Se nessuno dei progetti di prova sviluppati dal team QDR soddisfa i criteri di accettazione specificati, il QDR e il processo di quantificazione devono essere ripetuti fino a quando una strategia di sicurezza dell'idrogeno soddisfa i criteri di accettazione e altri requisiti di progettazione. Diverse opzioni possono essere prese in considerazione durante la riconduzione del QDR seguendo le raccomandazioni [48]: sviluppo di ulteriori disegni di prova; adozione di un approccio progettuale più discriminante, ad es. utilizzando tecniche deterministiche invece di uno studio comparativo; rivalutazione degli obiettivi di progettazione, ad es. se il costo delle misure di sicurezza dell'idrogeno per la prevenzione della perdita del patrimonio supera i potenziali benefici. Quando è stata identificata una soluzione soddisfacente (*satisfactory* in Figura 31), la strategia HSE risultante dovrebbe essere completamente documentata. A seconda delle particolarità e dell'ambito dello studio HSE, la comunicazione dei risultati (*reporting and presentation of results* in Figura 31) potrebbe contenere le seguenti informazioni simili ai requisiti [48]:

- Obiettivi dello studio;
- Descrizione completa del sistema/infrastruttura HFC;
- Risultati del QDR;
- Analisi quantitativa (ipotesi; giudizi ingegneristici; procedure di calcolo; validazione di metodologie; analisi di sensitività);
- Valutazione dei risultati dell'analisi rispetto ai criteri;
- Conclusioni (strategia di sicurezza dell'idrogeno; requisiti di gestione; eventuali limitazioni d'uso);
- Riferimenti (es. disegni, documentazione progettuale, letteratura tecnica, ecc.). Per semplificare la valutazione di un progetto HSE, il processo di quantificazione è suddiviso in diversi sottosistemi tecnici (TSS).

I seguenti requisiti dovrebbero essere presi in considerazione per lo sviluppo di singoli TSS:

- I TSS dovrebbero coprire insieme, nel modo più ragionevole possibile, tutti i possibili aspetti dell'ingegneria della sicurezza dell'idrogeno;
- I TSS dovrebbero essere bilanciati tra la loro unicità o capacità di essere utilizzati individualmente e le loro complementarità e sinergie con altri TSS;
- I TSS dovrebbero essere una selezione dello stato dell'arte nel campo particolare della sicurezza dell'idrogeno, strumenti ingegneristici convalidati, comprese correlazioni empiriche e semi-empiriche e strumenti contemporanei come modelli e codici CFD;

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

- Il TSS dovrebbe essere flessibile per consentire l'aggiornamento di metodi esistenti o l'uso di nuovi metodi appropriati e convalidati, riflettendo i recenti progressi nella scienza e nell'ingegneria della sicurezza dell'idrogeno.

I seguenti TSS sono attualmente suggeriti e in fase di sviluppo per [46]:

- TSS1: Inizio del rilascio e della dispersione;
- TSS2: Accensioni;
- TSS3: Deflagrazioni e detonazioni;
- TSS4: Incendi;
- TSS5: Impatto su persone, strutture e ambiente;
- TSS6: Tecniche di mitigazione;
- TSS7: Intervento dei servizi di emergenza.

L'ingegneria della sicurezza dell'idrogeno è la chiave per il successo dell'economia dell'idrogeno. È il potente strumento per le disposizioni inerenti alla sicurezza dell'idrogeno da parte di specialisti qualificati nel mercato in crescita dei sistemi e delle infrastrutture HFC. Infine, ma non meno importante, l'HSE può garantire un elevato livello di competitività per i prodotti a idrogeno e celle a combustibile

11. 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"), 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. le 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

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

dell'arte degli strumenti per le analisi di sicurezza dell'e-Laboratory of Hydrogen Safety è un'analogia europea ampliata e ad accesso libero dello strumento HyRAM (Hydrogen Risk Assessment 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.

11.1 Principi scientifici

Questa sezione descrive i principi scientifici alla base degli strumenti ingegneristici dell'e-Laboratory of Hydrogen Safety. Gli strumenti sono raccolti in gruppi in base alle similarità nelle applicazioni.

11.1.1 Rilasci senza ignizione

La teoria del getto sotto-espanso (*under-expanded jet theory*) [44, 49] è alla base dello strumento “Jet parameters” (parametri del getto) e altri strumenti relativi ai getti sotto-espansi. Consente il calcolo dei parametri del flusso di idrogeno in ugelli reali e fittizi. La densità nell'ugello reale è necessaria per l'uso nella legge di similarità per il decadimento della concentrazione nel getto di idrogeno [54, 50] e per il calcolo dei parametri all'ugello fittizio, che sono ampiamente utilizzati come condizioni al contorno per le simulazioni di fluidodinamica computazionale (CFD). Lo strumento consente di calcolare la portata massica del rilascio di idrogeno ad alta pressione sia attraverso un foro in un recipiente di stoccaggio che attraverso un canale stretto con perdite. Lo strumento per il calcolo del decadimento della concentrazione sull'asse di un getto di idrogeno subsonico, alla velocità del suono o supersonico utilizza la legge di similarità (*similarity law*), che è convalidata per un'ampia gamma di condizioni, da getti espansi a getti altamente sotto-espansi [44]. Questo strumento calcola l'*hazard distance*, ovvero la lunghezza della nube infiammabile, per i getti dominati dalla quantità di moto, che rappresentano praticamente tutti i rilasci realistici da apparecchiature e stoccaggio di idrogeno ad alta pressione.

La teoria del getto sotto-espanso viene utilizzata per costruire e convalidare la *similarity law*, descritta nella sezione successiva, che è valida sia per i getti espansi che per quelli sotto-espansi nel regime controllato dalla quantità di moto. La teoria viene applicata per derivare: la correlazione universale per la lunghezza della fiamma dei jet fires di idrogeno, lo strumento per il calcolo del tempo di blowdown del rilascio di idrogeno dal serbatoio di stoccaggio, ecc. La teoria è essenziale per svolgere calcoli di ingegneria della sicurezza dell'idrogeno per diverse applicazioni.

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

11.1.2 Similarity law (legge di similarità)

Va notato che gli effetti termici dei jet fires, gli effetti di sovrappressione della deflagrazione o della detonazione e gli effetti di sovrappressione e termici provocati dalla rottura di un serbatoio ad alta pressione in un incendio (onda d'urto e *fireball*) potrebbero superare la distanza di sicurezza determinata dalle dimensioni della nube infiammabile o da un jet fire. Pertanto, la conoscenza delle leggi che descrivono la dispersione dell'idrogeno e la formazione di nubi infiammabili, incluso il decadimento della concentrazione assiale per getti arbitrari, è essenziale per l'ingegneria della sicurezza dell'idrogeno.

La **Figura 32** mostra la legge di similarità (*similarity law*) per la stima del decadimento della concentrazione assiale di un rilascio di gas per getti subsonici, sonici e supersonici, derivata e presentata in [44, 50]. Questa è valida in un'ampia gamma di condizioni, da getti espansi a getti altamente sotto-espansi. Può essere applicata per il calcolo delle distanze di sicurezza in base alle dimensioni della nube infiammabile. Il comportamento non ideale dell'idrogeno ad alte pressioni e la sotto-espansione del flusso all'uscita di un ugello sono considerati utilizzando l'equazione di stato di Abel-Noble (EoS) per il gas reale.

Per getti di idrogeno in aria stagnante e per una concentrazione fissa espressa in percentuale della massa C_{ax} , il rapporto tra una distanza, x , e il diametro dell'ugello è una costante, cioè $x/D = \text{cost}$. Ciò significa che la distanza al limite inferiore di infiammabilità è direttamente proporzionale al diametro della perdita. Pertanto, la progettazione di sistemi a idrogeno e celle a combustibile deve essere eseguita tenendo presente l'esigenza di ridurre al minimo il diametro interno delle tubazioni, ovvero la dimensione della perdita per uno scenario di rottura conservativo totale, pur mantenendo i requisiti tecnologici della portata in massa.

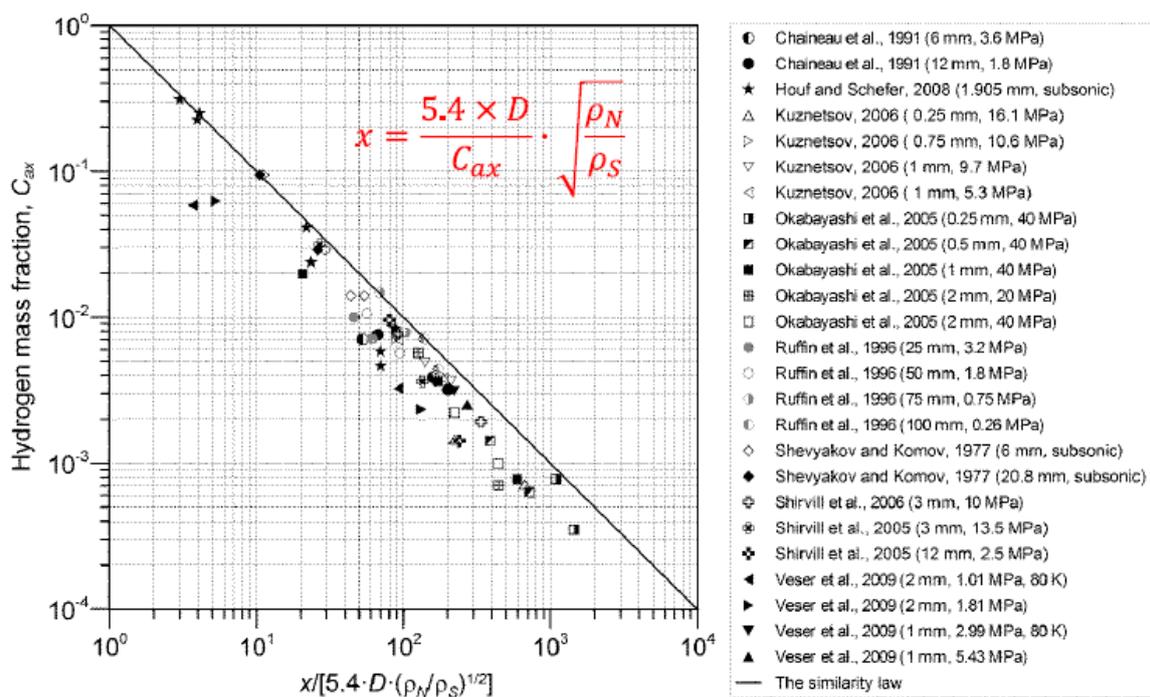


Figura 32. Legge di similarità (*similarity law*) [44].

11.1.3 Effetto del galleggiamento

Lo strumento “*Effect of buoyancy*” (cioè effetto del galleggiamento) consente di calcolare la diminuzione della distanza di sicurezza per i getti di idrogeno inizialmente dominati dalla quantità di moto quando si trasformano in getti controllati dal galleggiamento. Si basa sulla la teoria di Shevyakov, convalidata da esperimenti, che può essere trovata altrove [44]. La tecnica ingegneristica [44] qualifica quale parte del getto di idrogeno (sia espanso che sotto-espanso) è controllata dalla quantità di moto mentre il resto del getto a valle è controllato dal galleggiamento.

Esistono tre tipi di getti a seconda del ruolo della galleggiabilità [Figura 33](#) (a sinistra): i getti completamente controllati dalla quantità di moto non sono influenzati dalla galleggiabilità; i getti completamente controllati dalla galleggiabilità vengono deviati rapidamente dalla direzione del flusso orizzontale a quella verticale; il terzo tipo di getti è di transizione con la parte dominata dalla quantità di moto più vicina all'ugello e il flusso controllato dalla galleggiabilità più a valle, quando la velocità del getto diminuisce e il diametro aumenta. Per l'ingegneria della sicurezza dell'idrogeno è importante sapere quando avviene questa transizione. Ciò ha un'implicazione diretta sulle distanze di sicurezza e quindi sul costo dell'infrastruttura.

Cinque curve teoriche (linee continue) e dati sperimentali per getti espansi e dati di altri ricercatori per getti sotto-espansi sono mostrati nella [Figura 33](#) (a destra). Praticamente tutti i getti sotto-espansi in incidenti che coinvolgono l'idrogeno saranno nel regime dominato dalla quantità di moto come segue dai test disponibili usati per convalidare la correlazione. Quattro delle cinque curve teoriche nel grafico sono correlate a concentrazioni di idrogeno rispettivamente del 4%, 17%, 30% e 60% in volume. Ognuna di queste quattro curve ha una parte ascendente galleggiante e una parte di "plateau" dominata dalla quantità di moto. Di particolare interesse è la quinta curva “*Downward jets*”, cioè jet verso il basso. Fornisce la distanza adimensionale dall'ugello al punto in cui un getto diretto verticalmente verso il basso cambia direzione del flusso verso l'alto. La quinta curva interseca ciascuna delle altre quattro curve nel grafico nella regione di transizione dal flusso dominato dalla quantità di moto al flusso controllato dalla galleggiabilità come previsto.

La tecnica di facile applicazione [Figura 33](#) (a destra) può essere molto utile per sviluppare soluzioni ingegneristiche convenienti per la sicurezza dell'idrogeno. Ad esempio, la distanza di sicurezza per un rilascio a getto orizzontale può essere sostanzialmente ridotta poiché solo la lunghezza della parte del getto dominata dalla quantità di moto può essere considerata un'indicazione della separazione piuttosto che la distanza integrale, cioè le parti del getto controllate sia dalla quantità di moto che dalla galleggiabilità fino al limite inferiore di infiammabilità (LFL) del 4% in volume di idrogeno.

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

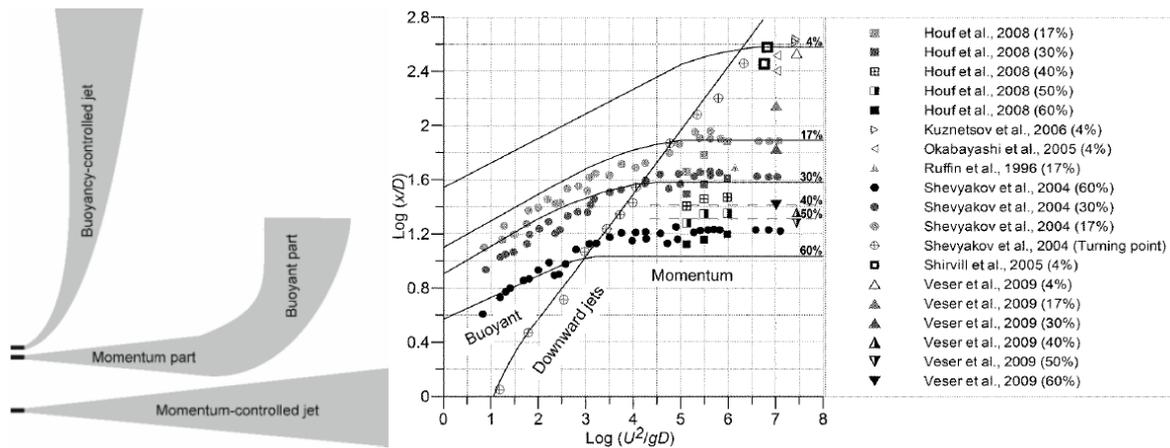


Figura 33. Tipi di getti in funzione del ruolo della galleggiabilità (a sinistra), rapporto tra la distanza ed il diametro dell'ugello x/D , per una particolare concentrazione di idrogeno nell'aria, in funzione del numero di Froude (a destra).

11.1.4 Blowdown

Lo strumento “*Blowdown of storage tank*” (cioè svuotamento del serbatoio) calcola la dinamica della pressione all'interno del serbatoio durante il rilascio in condizioni adiabatiche e isotermeche, che possono essere combinate per riprodurre una dinamica più vicina alla realtà. Entrambi i modelli forniscono una simile dinamica della pressione ma una diversa dinamica della temperatura dell'idrogeno rilasciato.

Il modello di blowdown adiabatico si basa sull'ipotesi di un rilascio rapido da un serbatoio ad alta pressione e di un effetto trascurabile del trasferimento del calore sulla temperatura dell'idrogeno rilasciato. Il modello adiabatico fornisce una temperatura più bassa dell'idrogeno rilasciato alla fine del processo. Invece, il blowdown isotermico di un serbatoio di stoccaggio presuppone un rilascio relativamente lungo da un serbatoio ad alta pressione, cosicché il trasferimento di calore cambi significativamente la temperatura dell'idrogeno in uscita. La combinazione del modello adiabatico all'inizio del rilascio e poi del modello isotermico fornisce una buona approssimazione della dinamica della temperatura dell'idrogeno rilasciato osservata negli esperimenti.

Entrambi i modelli sono costruiti sulla teoria di calcolo dei parametri del getto espanso e sotto-espanso attraverso le fasi caratteristiche del suo sviluppo: nel serbatoio di stoccaggio, nell'orifizio reale e nell'ugello fittizio (*notional* o *effective nozzle*) e utilizza l'Abel-Noble EoS e le equazioni di conservazione per massa ed energia.

Lo strumento può essere utilizzato per formulare misure di mitigazione e strategie di sicurezza basate sulla classificazione di resistenza al fuoco del serbatoio di stoccaggio dell'idrogeno a bordo di veicoli. Il grado di resistenza al fuoco dovrebbe essere maggiore della somma del tempo di avvio di un dispositivo di sfogo della pressione attivato termicamente (TPRD) e del tempo di blowdown del serbatoio di stoccaggio per escluderne la rottura catastrofica in caso di incendio. Ovviamente, l'uso di un TPRD con un diametro maggiore creerebbe una nube

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

inflammabile più grande o un jet fire. Genererebbe una maggiore sovrappressione durante l'"accensione ritardata" o la deflagrazione di nubi turbolente infiammabili. Per questo motivo il diametro del TPRD dovrebbe essere ridotto il più possibile a condizione che il grado di resistenza al fuoco venga aumentato di conseguenza.

11.1.5 Ventilazione passiva

Lo strumento "*Passive ventilation*" (cioè ventilazione passiva) consente di calcolare la concentrazione di idrogeno in un ambiente chiuso con dimensioni dello sfiato, cioè l'apertura per la ventilazione, note per una data portata di rilascio, oppure risolvere il problema inverso (calcolare la dimensione dell'apertura di sfiato per mantenere la concentrazione al di sotto del livello desiderabile data una determinata portata di rilascio di idrogeno).

Il modello è sviluppato nell'ipotesi di una perfetta miscelazione e sono state confrontate le equazioni per la ventilazione passiva (rilascio di gas infiammabili o tossici) e naturale (problemi di qualità dell'aria) [51] per mostrare la differenza essenziale tra i due approcci. Le equazioni della ventilazione naturale sono solitamente derivate partendo dal presupposto che il piano neutro si trovi a metà dell'altezza dell'apertura di sfiato, tuttavia per la ventilazione passiva di un rilascio accidentale in un ambiente confinato il piano neutro può essere posizionato ovunque al di sotto della metà dell'altezza dell'apertura di sfiato. Lo sviluppo del modello di ventilazione passiva ha dimostrato che la soluzione analitica accurata per la ventilazione passiva differisce dalla soluzione approssimativa per la ventilazione naturale di oltre 2 volte per miscele povere e ricche, come mostrato nella [Figura 34](#), dove X è la frazione molare di idrogeno.

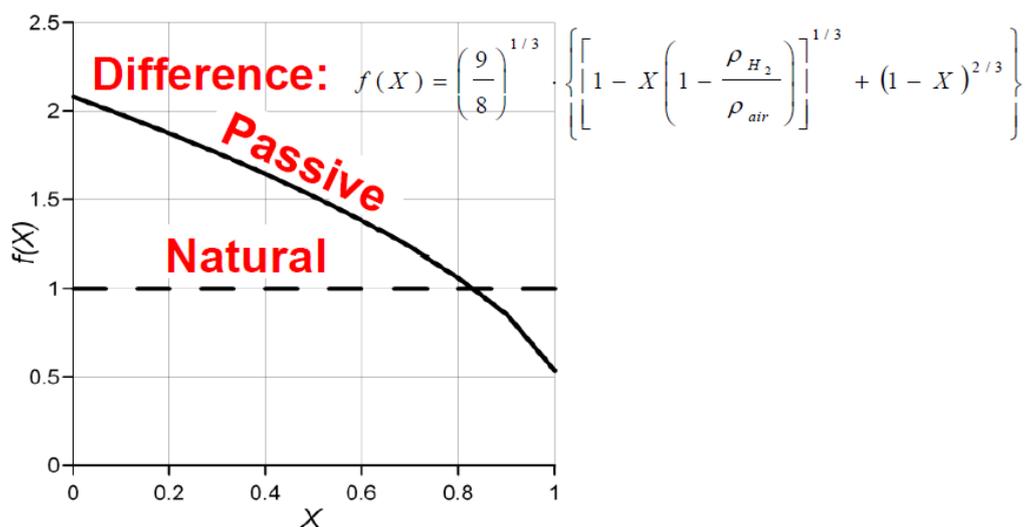


Figura 34. Differenza tra la ventilazione passiva e naturale.

Ciò potrebbe avere serie implicazioni per la sicurezza e dovrebbe essere affrontato con attenzione durante lo svolgimento di stime di ingegneria di sicurezza che coinvolgono rilasci di idrogeno. La teoria della ventilazione passiva afferma che l'apertura di sfiato verticale è più

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

efficiente rispetto allo sfiato orizzontale dalla stessa area, e questo dovrebbe essere preso in considerazione durante la progettazione dei sistemi di ventilazione passiva.

11.1.6 Ventilazione forzata

Lo strumento “*Forced ventilation*” (cioè ventilazione forzata) calcola i parametri del sistema di ventilazione meccanica per mantenere la concentrazione di idrogeno al di sotto del livello richiesto. I parametri includono la portata volumetrica d'aria necessaria affinché data una portata in massa di idrogeno la sua concentrazione sia inferiore al limite specificato nell'ipotesi di una perfetta miscelazione. Il modello si basa sui principi della ventilazione passiva e sul calcolo della portata di ventilazione necessaria a fornire la concentrazione di idrogeno in un ambiente al di sotto del livello richiesto. L'applicazione della ventilazione forzata in studi numerici ha confermato i calcoli del modello analitico e ha dimostrato una diminuzione della concentrazione di gas al livello richiesto. Ciò conferma che la metodologia proposta può essere applicata per calcolare il rateo di ventilazione per i sistemi di celle a combustibile e idrogeno e può essere utilizzata come strumento per l'ingegneria della sicurezza dell'idrogeno.

11.1.7 Pressure peaking phenomenon

Il *Pressure Peaking Phenomenon* (PPP), ossia fenomeno di picco di pressione, rivelato nel 2010 all'Ulster University [52], è un'altra particolarità dell'“*e-Laboratory of Hydrogen Safety*” non disponibile in altri simili software di valutazione dei rischi. Il modello consente il calcolo della dinamica della pressione in un ambiente chiuso come un garage in caso di rilascio di idrogeno. Sono disponibili sia le opzioni di rilascio per portata di idrogeno in massa costante che in *blowdown*, ossia durante la depressurizzazione del serbatoio. Lo strumento è applicabile sia per i rilasci reattivi (fiamma da TPRD) che non reattivi (guasto del TPRD).

Il *pressure peaking phenomenon* è caratteristico solo per i gas più leggeri dell'aria quando vengono rilasciati in uno spazio chiuso con aperture di sfiato con area limitata. Il PPP è più pronunciato per il rilascio reattivo (con ignizione) rispetto al rilascio senza ignizione dalla stessa fonte [53], vedere la [Figura 35](#). Lo standard ISO richiede che il PPP sia preso in considerazione quando si esegue l'ingegneria della sicurezza dell'idrogeno per l'uso di sistemi a idrogeno e celle a combustibile in ambienti interni.

La prevenzione e l'attenuazione del PPP possono essere ottenute solo attraverso la diminuzione della portata in massa attraverso la TPRD, ovvero il diametro dell'ugello. Questo a sua volta richiederà un grado di resistenza al fuoco più elevato dei serbatoi di stoccaggio di bordo.

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

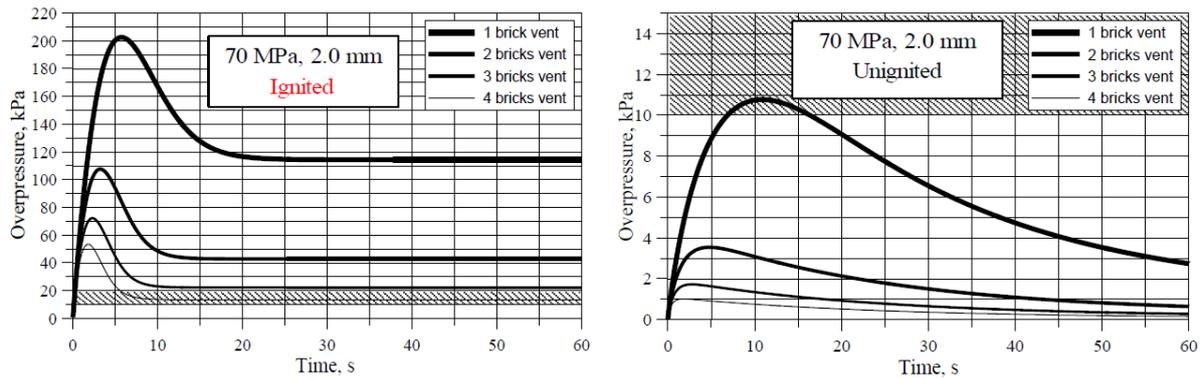


Figura 35. Dinamica di sovrappressione per un rilascio d'idrogeno in un garage: diametro TPRD 2 mm e pressione di stoccaggio 70 MPa (portata di rilascio 107 g/s) con ignizione (a sinistra) e senza ignizione (a destra) [53].

11.1.8 Distanze di sicurezza per un jet fire

Lo strumento “*Jet fire*” utilizza la correlazione adimensionale della lunghezza della fiamma dell'idrogeno [50] per calcolare le distanze relative a tre livelli di pericolo, ovvero la distanza “nessun danno” a $T=70\text{ °C}$, che è 3,5 volte la lunghezza della fiamma; “limite del dolore” (115 °C , 5 min), che è 3 volte la lunghezza della fiamma; e “limite di fatalità” (309 °C , 20 s), che è 2 volte la lunghezza della fiamma. La correlazione universale della lunghezza della fiamma include fiamme laminari e turbolente, fiamme controllate dalla galleggiabilità e dalla quantità di moto, fiamme da rilasci di gas espansi (subsonici e sonici) e sotto-espansi (sonici e supersonici), coprendo così l'intero spettro dei rilasci d'idrogeno [50]. I risultati teorici e sperimentali indicano che la lunghezza della fiamma è una funzione non solo del numero di Froude (Fr) ma anche del numero di Reynolds (Re) e del numero di Mach (M), e in questa correlazione vengono presi tutti in considerazione. Uno dei suoi vantaggi è l'assenza di parametri all'uscita dell'ugello fittizio, che sono derivati nell'ipotesi di flusso sonoro all'ugello fittizio con un campo di validità limitato. I parametri necessari per stimare la lunghezza della fiamma sono quelli solo all'uscita reale dell'ugello: diametro, densità dell'idrogeno e velocità del flusso, velocità del suono alla pressione e temperatura all'uscita reale dell'ugello. La correlazione adimensionale per la lunghezza della fiamma del getto di idrogeno in aria ferma è $L_F/D - (\rho_N/\rho_S)(U_N/C_N)^3$ e viene mostrata nella Figura 36. Qui L_F è la lunghezza della fiamma, D è il diametro dell'ugello, ρ_N e ρ_S sono rispettivamente le densità dell'idrogeno all'ugello e dell'aria circostante, mentre U_N e C_N sono la velocità all'ugello e la velocità del suono nel gas rilasciato nell'ugello.

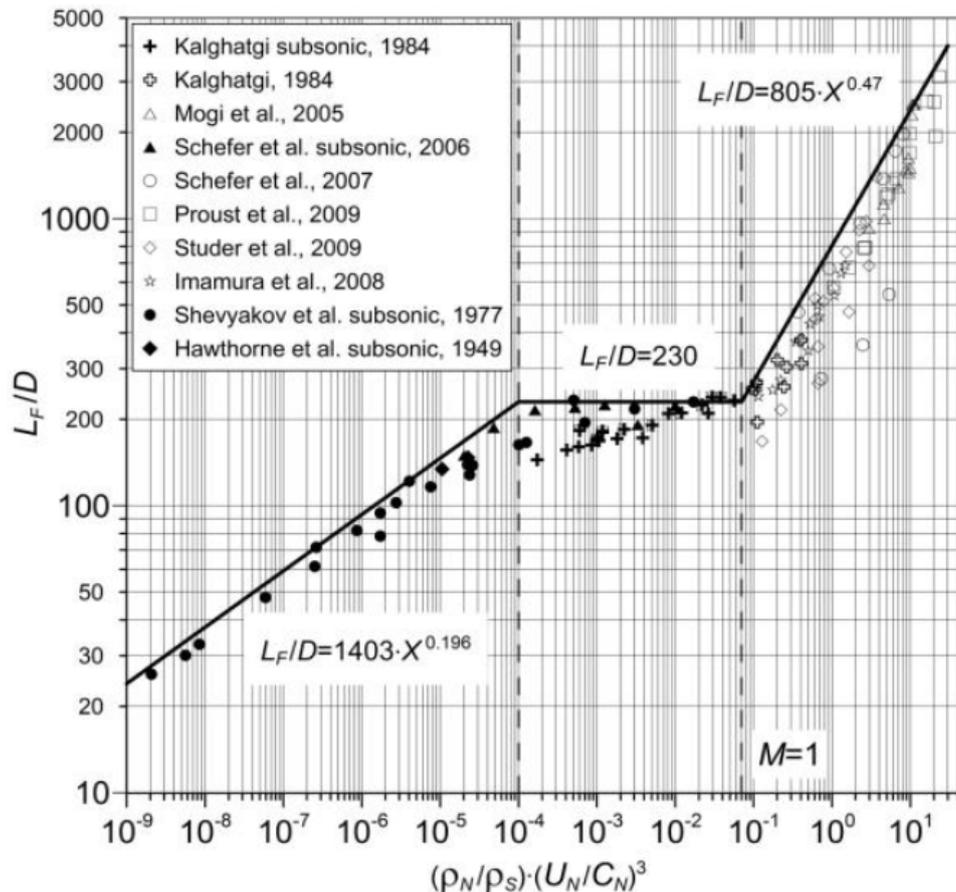


Figura 36. Correlazione adimensionale della lunghezza di fiamma [50].

L'uso della correlazione richiede l'applicazione di una teoria del getto sotto-espanso per calcolare questi parametri. Vi è una minore incertezza nel calcolo dei parametri di flusso nell'uscita effettiva dell'ugello rispetto alle incertezze sull'ugello fittizio. In effetti, esiste una forte non uniformità di velocità a valle del disco di Mach che devia dall'ipotesi comune a tutte le teorie del getto sotto-espanso di una velocità uniforme all'uscita dell'ugello nozionale.

11.1.9 Mitigazione delle deflagrazioni

Esistono tre strumenti di mitigazione della deflagrazione nell'*e-Laboratory of Hydrogen Safety*: dimensionamento dello sfiato dell'ambiente chiuso con miscela idrogeno-aria uniforme [54], dimensionamento dello sfiato dell'ambiente chiuso con miscela non uniforme localizzata [55], calcolo del limite superiore dell'inventario d'idrogeno che può essere consentito in uno spazio chiuso come ad esempio un magazzino [55].

La correlazione del dimensionamento dello sfiato per la miscela uniforme idrogeno-aria in un ambiente ventilato [54] si basa sui recenti progressi nella comprensione e nella modellazione dei fenomeni di combustione relativi alle deflagrazioni ventilate idrogeno-aria e su test unici su larga scala effettuati da diversi gruppi di ricerca. I fenomeni di combustione spiegati dalla correlazione includono: la turbolenza generata dal fronte di fiamma stesso; il meccanismo "leading point" derivante dalla diffusione preferenziale dell'idrogeno nell'aria; la crescita

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

dell'area frattale della superficie turbolenta della fiamma; la turbolenza iniziale nella miscela infiammabile; così come gli effetti delle proporzioni dell'involucro / ambiente confinato e la presenza di ostacoli. Lo strumento consente di calcolare l'area di sfiato per ridurre la pressione di deflagrazione al limite desiderato e stimare la sovrappressione all'interno dell'ambiente ventilato per lo sfiato di una determinata dimensione.

Il modello per miscele localizzate non uniformi [55] descrive le deflagrazioni di miscele idrogeno-aria e definisce i requisiti di sicurezza per le deflagrazioni ventilate di miscele localizzate in un ambiente chiuso. Esempi di miscele localizzate includono “sacche” di gas all'interno di un ambiente chiuso, nonché distribuzioni di gas stratificate che sono particolarmente rilevanti per i rilasci di idrogeno. Il modello consente di stimare la sovrappressione massima all'interno dell'ambiente ventilato e di calcolare la dimensione dello sfiato per non superare il limite di sicurezza richiesto.

È stato sviluppato un modello termodinamico per prevedere la massa massima di idrogeno che può essere rilasciata in un ambiente di volume particolare senza causare sovrappressione distruttiva di deflagrazione [55] e realizzato come strumento in e-Laboratory. Il modello presume che l'ambiente ventilato sia parzialmente riempito con aria e miscela idrogeno-aria. Se questa miscela idrogeno-aria viene bruciata in un ambiente sigillato, è possibile trovare la soluzione modello per la pressione assoluta risultante. Lo strumento consente di calcolare la massa dell'inventario per la data sovrappressione e il volume dell'ambiente per la sovrappressione e la massa dell'inventario specificate.

11.1.10 Onda d'urto e fireball dopo la rottura di un serbatoio in un incendio

Lo strumento di decadimento della sovrappressione “*Blast wave*” è disponibile per gli scenari di serbatoi di stoccaggio autonomi e installati su veicolo. Il modello sviluppato tiene conto degli effetti reali del gas e della combustione del gas infiammabile rilasciato nell'aria (energia chimica) come contributo alla forza dell'onda d'urto [56]. L'energia chimica della combustione viene aggiunta dinamicamente all'energia meccanica ed è contabilizzata nella distanza adimensionale in scala di energia. Il modello può essere applicato come strumento di ingegneria della sicurezza per le tipiche applicazioni di stoccaggio dell'idrogeno, inclusi i serbatoi di stoccaggio a bordo dei veicoli e i serbatoi di stoccaggio autonomi in una stazione di rifornimento. Il modello permette di calcolare le distanze definite dai parametri di un'onda d'urto generata dalla rottura di un serbatoio di stoccaggio del gas ad alta pressione in un incendio.

Lo strumento per il calcolo del diametro della “*fireball*” dopo la rottura del serbatoio dell'idrogeno in un incendio si basa sull'ipotesi di una combustione completa dell'idrogeno rilasciato nell'aria [56, 57]. Si basa su una quantità limitata di dati sperimentali e richiede quindi un'ulteriore convalida.

11.2 Sommario di e-Laboratory

Sono stati esaminati i principi scientifici alla base degli strumenti ingegneristici dell'*e-Laboratory of Hydrogen Safety* disponibile su <https://hyresponder.eu/e-platform/>. Gli strumenti ingegneristici sviluppati vengono implementati per il libero accesso delle parti interessate. I modelli implementati negli strumenti online si basano su pubblicazioni in riviste scientifiche e sono convalidati da dati sperimentali.

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.

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

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
18. Koroneos, C. J., & Moussiopoulos, N. (2002). Cryoplane –hydrogen vs. kerosene as aircraft fuel. *Proceedings of the Geophysical Society XXVII General Assembly, Nice, France*, p. 21-26.
19. Contreras, A., Yiğit,., Özay, K., & Veziroğlu, T. N. (1997). Hydrogen as aviation fuel: a comparison with hydrocarbon fuels. *International Journal of Hydrogen Energy*, 22: 1053-1060
20. Lee DS, Pitari G, Grewe V, Gierens K, Penner JE, Petzold A, Prather MJ, Schumann U, Bais A, Bernsten T, Iachetti D, Lim LL, Sausen R. Transport impacts on atmosphere and climate: aviation. *Atmos Environ* 2010;44(37):4678–734
21. Contreras A, Yiğit S, Özay K, Veziroğlu TN. Hydrogen as aviation fuel: a comparison with hydrocarbon fuels. *Int J Hydrog Energy* 1997;22(10–11):1053–60.
22. Khandelwal B, Karakurt A, Sekaran PR, Sethi V, Singh R. Hydrogen powered aircraft: the future of air transport. *Prog Aerosp Sci* 2013;60:45–59.
23. Verstraete D. Long range transport aircraft using hydrogen fuel. *Int J Hydrog Energy* 2013;38(34):14824–31.
24. Verstraete D. The potential of liquid hydrogen for long range aircraft propulsion; 2009
25. Sharpe JE, Bimbo N, Ting VP, Rechain B, Joubert E, Mays TJ. Modelling the potential of adsorbed hydrogen for use in aviation. *Microporous Mesoporous Mater* 2015;209:135–40
26. Nojoumi H, Dincer I, Naterer GF. Greenhouse gas emissions assessment of hydrogen and kerosene-fueled aircraft propulsion. *Int J Hydrog Energy* 2009;34(3):1363–9
27. Cecere D, Giacomazzi E, Ingenito A. A review on hydrogen industrial aerospace applications. *Int J Hydrog Energy* 2014;39(20):10731–47
28. Verstraete D. On the energy efficiency of hydrogen-fuelled transport aircraft. *Int J Hydrog Energy* 2015;40(23):7388–94.

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

29. Fernandes MD, de ST, Andrade P, Bistrizki VN, Fonseca RM, Zacarias LG, Gonçalves HNC, de Castro AF, Domingues RZ, Matencio T. SOFC-APU systems for aircraft: a review. *Int J Hydrog Energy* 2018;43(33):16311–33
30. S Eelman, de Poza, Krieg T. Fuel cell APU'S in commercial aircraft – an assessment of SOFC and PEMFC concepts. In: *Proceedings of 24th international congress of aeronautical sciences*; 2004.
31. Staffell I, Scamman D, Velazquez Abad A, Balcombe P, Dodds PE, Ekins P, Shah N, Ward KR. The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system. *Energy Environ Sci* 2019.
32. DOE funds to deploy fuel cells for baggage vehicles at airports. *Fuel Cells Bull.* vol, no. 5; 2012. p. 3–4.
33. McConnell VP. Fuel cells in forklifts extend commercial reach. *Fuel Cells Bull* 2010;2010(9):12–9. 33. 44. Fuel cell forklift from German partnership. *Fuel Cells Bull.* vol, no. 12; 2003. p. 9.
34. Plug Power, FedEx project rolls out fuel cell airport tractors. *Fuel Cells Bull.* vol, no. 5; 2015. p. 2–3.
35. Toyota, Hino deliver fuel cell bus for Haneda airport route in Tokyo. *Fuel Cells Bull.*, vol, no. 1; 2011, p. 3.
36. US Hybrid, BYD to develop fuel cell bus for Honolulu Airport. *Fuel Cells Bull.* vol, no. 6; 2018. p. 2.
37. Belmonte N, Staulo S, Fiorot S, Luetto C, Rizzi P, Baricco M. Fuel cell powered octocopter for inspection of mobile cranes: design, cost analysis and environmental impacts. *Appl Energy* 2018;215:556–65.
38. Fuel cell and hybrid power systems offer compelling value for UAVs whose missions demand greater runtime than batteries can support. [Online]. Available: <http://www.ballard.com/markets/uav>. [Accessed 20. Oct 2018].
39. AeroVironment flies world's first hydrogen powered plane. *Fuel Cells Bull.* vol, no. 9; 2005. p. 2–3.
40. Bradley TH, Moffitt BA, Mavris DN, Parekh DE. Development and experimental characterization of a fuel cell powered aircraft. *J Power Sources* 2007;171(2):793–801.
41. Gong A, Verstraete D. Fuel cell propulsion in small fixed-wing unmanned aerial vehicles: current status and research needs. *Int J Hydrog Energy* 2017;42(33):21311–33.
42. Kim T, Kwon S. Design and development of a fuel cell-powered small unmanned aircraft. *Int J Hydrog Energy* 2012;37(1):615–22

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

43. 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].
44. Molkov, V (2012). Fundamentals of hydrogen safety engineering, Part I and Part II. Available from: www.bookboon.com, free download e-book.
45. CEP, Clean Energy Partnership, 2014. Available from: <http://www.cleanenergypartnership.de/tech/site.php?l=en> [accessed on 01.05.14].
46. Saffers, J-B and Molkov, V (2014). Hydrogen safety engineering framework and elementary design safety tools. International Journal of Hydrogen Energy, 39 (11). pp. 6268-6285.
47. BRHS, Biennial Report on Hydrogen Safety (2009). The European network of excellence “Safety of hydrogen as an energy carrier” (NoE HySafe). Available from: www.hysafe.org [accessed on 06.11.20].
48. BSI (2001) British standard BS7974:2001 “Application of fire safety engineering to the design of buildings - Code of Practice”. Published Document PD 7974–0:2002 (2002) Application of fire safety engineering principles to the design of buildings – Part 0: Guide to design framework and fire safety engineering procedures, British Standard Institution.
49. V. Molkov and M. Bragin, High-Pressure Hydrogen Leak Through a Narrow Channel, Nonequilibrium Phenomena: Plasma, Combustion, Atmosphere, (2009), 332–338.
50. V. Molkov and J.-B. Saffers, Hydrogen Jet Flames, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 38, no. 19, (2013) 8141–8158.
51. V. Molkov, V. Shentsov, and J. Quintiere, Passive Ventilation of a Sustained Gaseous Release in an Enclosure With One Vent, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 39, no. 15, (2014) 8158–8168.
52. S. Brennan and V. Molkov, Safety Assessment of Unignited Hydrogen Discharge From Onboard Storage in Garages With Low Levels of Natural Ventilation, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 38, (2013) 8159–8166.
53. D. Makarov, V. Shentsov, M. Kuznetsov, and V. Molkov, Pressure Peaking Phenomenon: Model Validation Against Unignited Release and Jet Fire Experiments, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 43, no. 19, (2018) 9454–9469.
54. V. Molkov and M. Bragin, Hydrogen–Air Deflagrations: Vent Sizing Correlation For Low-Strength Equipment and Buildings, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 40, no. 2, (2015) 1256–1266.
55. D. Makarov, P. Hooker, M. Kuznetsov, and V. Molkov, Deflagrations of Localised Homogeneous and Inhomogeneous Hydrogen-Air Mixtures in Enclosures, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 43, (2018) 9848–9869.
56. V. Molkov and S. Kashkarov, Blast Wave From a High-Pressure Gas Tank Rupture in a Fire: Stand-Alone and Under-Vehicle Hydrogen Tanks, International Journal of Hydrogen Energy, vol. 40, no. 36, (2015) 12581–12603.

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

57. M. Dadashzadeh, S. Kashkarov, D. Makarov, and V. Molkov, "Socio-Economic Analysis and Quantitative Risk Assessment Methodology for Safety Design of Onboard Storage Systems, in International Conference on Hydrogen Safety, Hamburg, Germany, (2017) vol. 184.
58. Barthelemy H, Weber M, Barbier F. Hydrogen storage: recent improvements and industrial perspectives. Int J Hydrogen Energy (2017) 42:7254-7262.
59. 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]
60. Harris, AP, Marchi CWS. (2012). Investigation of the hydrogen release incident at the AC transit Emeryville facility (Revised). Sandia report. SAND2012-8642.