

STAZIONI DI RIFORNIMENTO IDROGENO – TECNOLOGIA E SICUREZZA

Paolo Ceci*, Antonio Fardelli*, Marco Carcassi^, Alessia Marangon^

* CNR - ISTITUTO INQUINAMENTO ATMOSFERICO

* C/O MATT DIREZIONE PER LA SALVAGUARDIA AMBIENTALE

Via Cristoforo Colombo, 44 – 00147 Roma

^ Università degli Studi di Pisa, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione

Via Diotallevi 2, 56126 Pisa (Italia)

Carcassi@ing.unipi.it

SOMMARIO

La prospettiva di impiego in autotrazione di un combustibile pulito ed ampiamente disponibile ha incoraggiato la ricerca scientifica verso lo studio del vettore energetico idrogeno. Tuttavia, una forte spinta al suo impiego sarà possibile solo se saranno realizzate adeguate infrastrutture di rifornimento; infatti, la distribuzione diffusa è il punto chiave per lo sviluppo e la penetrazione dei sistemi a celle di combustibile nel settore mobile. Allo stato attuale nel mondo sono in funzione circa quaranta stazioni di rifornimento di idrogeno e circa altre trenta sono di prossima apertura; anche se la maggior parte degli impianti è stata progettata e costruita con la sola finalità di rifornire piccole flotte di autoveicoli, in un'ottica a più ampio raggio questo potrebbe essere il primo passo nella giusta direzione.

L'obiettivo dell'analisi condotta è quindi l'individuazione della miglior scelta tecnologica che possa essere presa a riferimento per delineare un modello di impianto che possa essere idoneo alle richieste di un mercato più esteso proprio in previsione di una futura commercializzazione.

2. INTRODUZIONE

L'idrogeno possiede diverse caratteristiche che lo rendono molto attraente per l'impiego in autotrazione: può essere convertito in energia per via termica (un motore a combustione interna) oppure per via elettrochimica (celle a combustibile) e quando convertito in presenza di ossigeno, produce acqua e, di per sé, nessuna emissione tossica o nociva. Tuttavia, una forte spinta al suo impiego in autotrazione sarà possibile solo se saranno realizzate adeguate infrastrutture di rifornimento; l'opportunità di una distribuzione diffusa è il punto chiave per lo sviluppo e la penetrazione dei sistemi a celle a combustibile nel settore mobile.

Allo stato attuale nel mondo sono in funzione circa quaranta stazioni di rifornimento di idrogeno e circa altre trenta sono di prossima apertura, intendendo con questo termine che la loro messa in servizio è stata programmata per la fine del 2004. Anche se la maggior parte degli impianti ad oggi esistenti è stata progettata e costruita con la sola finalità di rifornire piccole flotte di autoveicoli, in un'ottica a più ampio raggio questo potrebbe essere il primo passo nella giusta direzione. Infatti, sebbene una commercializzazione delle stazioni di rifornimento di idrogeno appaia ancora lontana, un'attenta disamina degli impianti esistenti permette, già allo stato attuale, di presentare una rassegna delle principali soluzioni tecnologiche disponibili.

Al fine di una corretta installazione di un sistema idrogeno, che possa dare anche efficaci garanzie di sicurezza, occorre affrontare le varie problematiche secondo un approccio integrato che prenda in considerazione tutti i possibili aspetti; in particolare dovrà essere portata a termine un'attenta analisi circa le condizioni generali di ubicazione del sistema/impianto, dovranno essere analizzate tutte le caratteristiche costruttive e l'impiantistica tecnica, dovranno essere predisposti adeguati sistemi di sicurezza e sistemi antincendio ed infine dovranno essere delineate tutte le procedure operative necessarie per garantire sempre un sufficiente grado di sicurezza.

La gestione dell'idrogeno è un problema che fino ad ora è sempre stato affrontato per i grandi impianti centralizzati e per le installazioni fisse di stoccaggio; le problematiche di sicurezza connesse con una stazione di rifornimento sono invece solo in parte riconducibili a questa tipologia di impianti. Le stazioni di fatto sono installazioni che, pur trattando in genere quantità estremamente minori, verranno ad essere ubicate in zone non isolate, comunque in adiacenza a strade e senz'altro in prossimità di centri abitati; inoltre altra caratteristica peculiare è data dalla manipolazione della sostanza che avviene ripetutamente ed in presenza di persone e per tipologie di veicolo diverse. La progettazione, l'installazione e la gestione in sicurezza dell'impianto non potranno pertanto prescindere dalle considerazioni sopra esposte.

3. STAZIONI DI RIFORNIMENTO DI IDROGENO

3.1 Tipologie di impianto

Le stazioni di rifornimento di idrogeno per autotrazione possono essere di varia tipologia; solitamente vengono distinte in funzione della forma fisica della sostanza distribuita (idrogeno compresso e/o liquefatto) e della filosofia di approvvigionamento di combustibile (trasporto dall'esterno/produzione on-site).

In particolare, le tipologie di impianto a cui per convenzione ci si riferisce quando si parla di stazioni di rifornimento di idrogeno compresso e/o liquefatto per autotrazione sono le seguenti:

1. Stazione di rifornimento di idrogeno compresso con produzione on-site (CGH₂)
2. Stazione di rifornimento di idrogeno compresso con idrogeno inviato da un impianto di produzione centralizzato (CGH₂)
3. Stazione di rifornimento di idrogeno liquido fornito dall'esterno (LH₂)
4. Stazione di rifornimento di idrogeno compresso ottenuto mediante vaporizzazione dell'idrogeno liquido stoccato on-site (LCGH₂)

Tali impianti sono sempre costituiti, oltre che dai necessari dispositivi di sicurezza e controllo, dalle seguenti infrastrutture e componenti:

- un sistema di approvvigionamento di idrogeno, che può essere costituito da un'unità di produzione on-site, da una condotta, da dei mezzi di trasporto (carro bombolaio per idrogeno compresso o autocisterna per idrogeno liquido) oppure da pacchi bombole
- un sistema di compressione dell'idrogeno compresso o pompaggio dell'idrogeno liquido
- un sistema di stoccaggio stazionario dell'idrogeno per il travaso al veicolo
- una colonnina di erogazione
- un sistema di inertizzazione

Nelle stazioni di rifornimento di idrogeno compresso con produzione on-site, generalmente l'idrogeno viene prodotto per via elettrolitica oppure per steam reforming di vari idrocarburi; quando non vi è la necessità di avere un'alta capacità produttiva si ricorre all'elettrolisi dal momento che allo stato attuale è la tecnologia più matura per le applicazioni di piccola taglia. La produzione di idrogeno da fonti rinnovabili è invece ancora in fase di sperimentazione, sia per quanto riguarda la loro efficienza, sia per la possibilità di riuscire ad ottenere una sufficiente capacità produttiva; ciò vale in particolare per quelle energie primarie che sono caratterizzate da un'imprescindibile discontinuità come il solare, l'eolico e le maree.

L'installazione di un'unità di produzione di idrogeno on-site è una soluzione impiantistica che garantisce continuità di servizio produttivo ed elimina l'incidenza dei costi di trasporto/distribuzione dell'idrogeno rispetto alla alternativa di fornitura idrogeno da carro bombolaio, unità che però è consigliabile mantenere laddove praticabile, come postazione di back-up (ossia per l'intervento in caso di guasto sulla linea di produzione-compressione). D'altro canto però è anche una soluzione per la quale sono richiesti dei costi di investimento maggiori (dovuti all'unità produttiva) ed allo stato attuale la produzione on-site rimane competitiva solo al di sopra di determinati "volumi" (70 - 100 Nm³/h) e se è garantibile un esercizio minimo continuo. Le capacità produttive tipiche degli impianti attualmente esistenti si attestano sui 30-40 Nm³/h.

La scelta di portare on-site l'idrogeno prodotto in grandi impianti centralizzati, via carro bombolaio, autocisterna oppure condotta, offre alcuni vantaggi sicuramente riscontrabili nella competitività in termini di costi del combustibile (la produzione centralizzata permette di usufruire in maniera significativa delle "economie di scala") e nel risparmio sull'investimento iniziale (viene ovviamente a mancare l'unità di produzione).

D'altro canto però si rende necessaria un'accurata pianificazione della logistica di impianto che tenga in considerazione tutti i seguenti aspetti: (a) la garanzia della continuità del servizio, sostenendo i costi derivanti da un continuo approvvigionamento di idrogeno dall'esterno; (b) la predisposizione delle installazioni fisse di postazione dei carri bombolai (baie) che richiedono spazi di manovra molto ampi ed infine (c) la necessità di prevedere la costruzione di box in calcestruzzo per la localizzazione dei pacchi bombole. Inoltre esistono vincoli legati al Piano Regolatore per l'installazione di postazioni per carri bombolai in siti di nuova concezione da adibire a stazioni di rifornimento di gas naturale per autotrazione (D.M. 24 Maggio 2002 [1]; IGC 15/96 [2]); e lo stesso limite è presupponibile anche per l'idrogeno.

Per quanto riguarda le stazioni di rifornimento di idrogeno liquido si può avere produzione direttamente on-site, mediante liquefazione dell'idrogeno gassoso, oppure fornitura alla stazione tramite autocisterna e stoccaggio in serbatoio criogenico; successivamente l'idrogeno viene prelevato tramite una pompa o

semplicemente per differenza di pressione col serbatoio del veicolo da rifornire. La pompa criogenica può anche essere inserita direttamente nella colonnina di erogazione.

I vantaggi offerti da questa soluzione sono evidenti se si pensa al maggior contenuto energetico per unità di volume che caratterizza l'idrogeno liquido rispetto a quello compresso (8.49 MJ/litro_{LH2} ad 1 bar, contro 2.16 MJ/litro_{CGH2} a 250 bar) e di conseguenza alla maggior autonomia della stazione di rifornimento a parità di volume stoccato. Però, l'idrogeno liquido deve essere mantenuto a temperature estremamente basse, fatto che comporta un notevole dispendio energetico in termini di frigoriferie (circa il 30 % del contenuto energetico dell'idrogeno liquido è speso per la sua liquefazione); inoltre l'impianto deve essere realizzato con materiali opportuni per resistere alla temperatura di - 253 °C (tecnologie criogeniche).

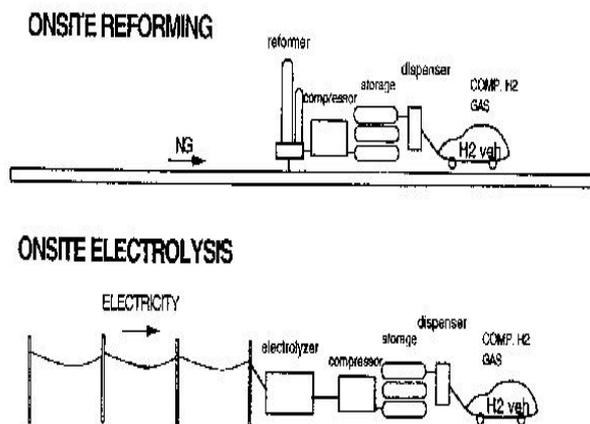


Figura 1. Schemi tipici di stazioni di rifornimento di idrogeno compresso con produzione on-site.

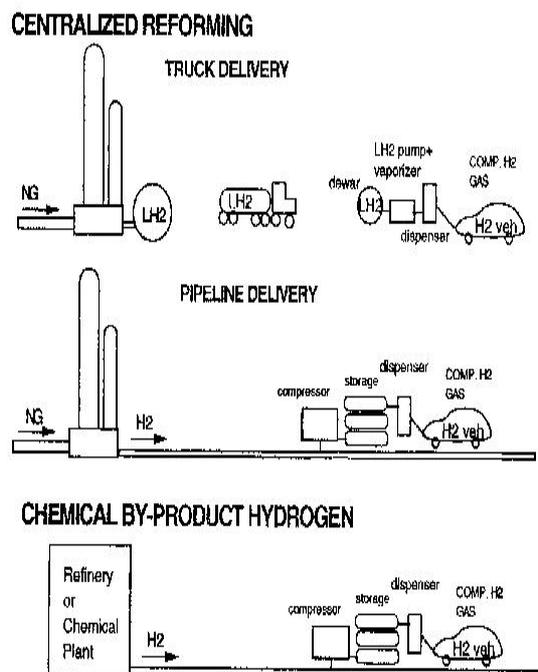


Figura 2. Schemi tipici di stazioni di rifornimento di idrogeno compresso con produzione in impianto centralizzato.

Altra soluzione può essere quella della distribuzione all'utente di idrogeno compresso ottenuto mediante vaporizzazione di idrogeno liquido stoccato on-site; l'idrogeno viene inviato alla stazione di rifornimento in forma liquida, caratterizzata da una maggiore densità energetica per unità di volume e successivamente viene vaporizzato e distribuito in forma compressa. Dal momento che on-site è comunque presente un sistema di stoccaggio di idrogeno liquido, spesso questa soluzione impiantistica prevede anche un'unità di erogazione di idrogeno liquido.

I vantaggi offerti da questa tipologia di stazione di rifornimento sono sicuramente molteplici: in primo luogo la maggior densità energetica che si riesce ad accumulare on-site ricorrendo all'idrogeno liquido e la possibilità di poter comunque effettuare il rifornimento di idrogeno compresso, installando una piccola unità di vaporizzazione (circa il 99 % dei veicoli a celle a combustibile attualmente in sperimentazione nel mondo sono alimentati con questa forma di combustibile). Infine, ma non meno importante, tale soluzione offre la possibilità di sperimentare anche la tecnologia criogenica ed il rifornimento di idrogeno liquido, derivando direttamente una linea dal sistema di stoccaggio on-site. Per contro si hanno tutti gli svantaggi di una stazione di rifornimento di idrogeno liquido, dovuti sostanzialmente all'approvvigionamento di idrogeno dall'esterno, mediante autocisterna, ed alle bassissime temperature in gioco che comportano tecnologie criogeniche e come già osservato un forte dispendio energetico.

È importante osservare che la maggior parte delle stazioni di rifornimento ad oggi esistenti nel mondo sono impianti costruiti nell'ambito di progetti dimostrativi per la sperimentazione di piccole flotte di autoveicoli e di conseguenza, non essendo necessaria una grande capacità produttiva di idrogeno, sono caratterizzati da un'unità elettrolitica on-site, fatto che ha portato ad avere poche stazioni impostate sulla filosofia di approvvigionamento di idrogeno dall'esterno (l'unità carro bombolaio rimane come postazione di back-up in caso di guasti sulla linea di produzione).

Inoltre, sulla base dei dati relativi a questi impianti attualmente in esercizio ed a quelli previsti di prossima apertura, è possibile evidenziare la scelta fatte dai diversi Paesi: in America la quasi totalità delle stazioni di rifornimento sono dotate di un'unità elettrolitica, in Giappone al contrario si sta sperimentando il reforming di diversi idrocarburi (metanolo, gas naturale, GPL, gasolio desolforizzato e nafta), infine in Europa sebbene prevalga la scelta dell'elettrolisi, come in America, esistono anche diversi impianti ove è prevista la sperimentazione del reforming, soprattutto nell'ambito del progetto CUTE (*Clean Urban Transport for Europe*).

Per quanto riguarda le stazioni di rifornimento di idrogeno liquido si osserva invece una netta presa di posizione in questo senso da parte della Germania; ciò è sicuramente dovuto al fatto che vi è stato un maggior interesse verso i veicoli alimentati ad idrogeno liquido ed il ruolo predominante lo ha avuto senza dubbio la BMW con la sperimentazione diffusa dei suoi prototipi dotati di motore a combustione interna.

Le seguenti figure riportano la situazione prevedibile per la fine del 2004, evidenziando rispettivamente la distribuzione delle stazioni di rifornimento di idrogeno in funzione della localizzazione geografica e della tipologia.

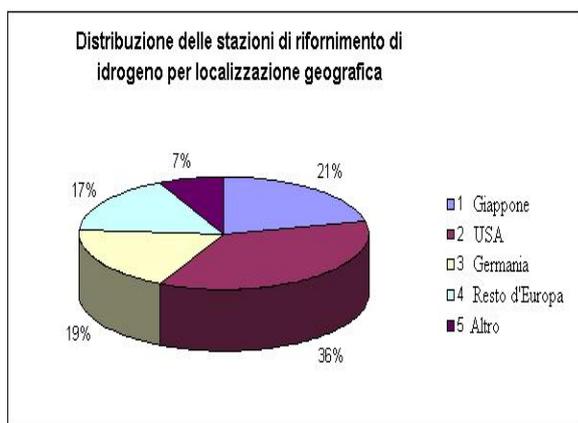


Figura 3. Distribuzione delle stazioni di rifornimento di idrogeno per localizzazione geografica (situazione prevedibile per la fine del 2004)

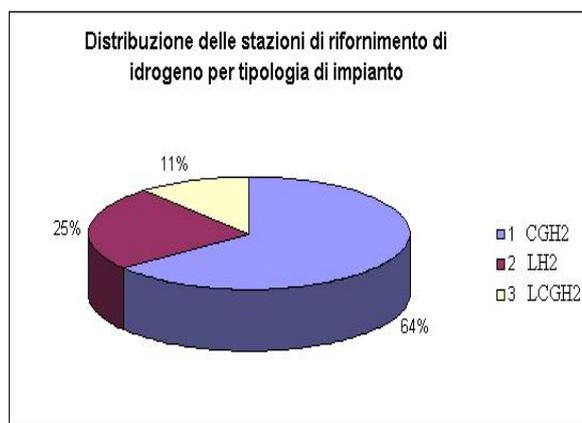


Figura 4. Distribuzione delle stazioni di rifornimento di idrogeno per tipologia di impianto (situazione prevedibile per la fine del 2004)

La netta maggioranza delle stazioni di rifornimento è senza dubbio ad idrogeno compresso e l'incidenza percentuale di questa tipologia di impianto è prevista in aumento per la fine del 2004; ciò è sicuramente dovuto al fatto che sarà più facile introdurre una nuova tecnologia, quale quella dell'idrogeno, sfruttando quello che è già noto per il gas naturale, combustibile caratterizzato da simili proprietà di infiammabilità e quindi da simili requisiti di normativa e di sicurezza.

Però affinché le stazioni di rifornimento di idrogeno possano divenire una tecnologia commerciale e con valore aggiunto in termini di inquinamento ambientale, oltre a dover superare i problemi di costo e di efficienza dei vari componenti, bisogna che l'idrogeno sia prodotto da fonti pulite sin dall'origine oppure che venga abbinato al processo produttivo un'efficiente tecnica di segregazione dell'anidride carbonica.

3.2 Tecnologia

Le tecnologie coinvolte nell'impiego dell'idrogeno in autotrazione devono scontrarsi con i problemi causati dalle proprietà chimico fisiche di questa sostanza; in modo particolare il fatto di dover lavorare a pressioni molto alte con l'idrogeno gassoso al fine di aumentare la densità energetica stoccata, il fatto di dover scegliere accuratamente i materiali e le configurazioni di costruzione dei sistemi dal momento che l'idrogeno può provocare infragilimento e che fuoriesce molto facilmente da ogni tenuta, giunto, ecc. ed anche il problema introdotto dall'impiego dell'idrogeno liquido che comporta la necessità di sviluppare tecnologie criogeniche, con i relativi problemi di isolamento, materiali e dispendi energetici.

Comunque in linea generale, l'aspetto più importante a livello tecnologico (aspetto che si porta dietro anche problemi di sicurezza) è la scelta dei materiali e la corretta progettazione delle tenute con cui si realizzano tali sistemi; infatti il contatto dell'idrogeno con il materiale di contenimento, associato alle diverse condizioni di processo (in modo specifico le condizioni di temperatura e di pressione), può alterare nel tempo le caratteristiche di resistenza e dar luogo a fenomeni fessurativi di vario tipo. Tali fenomeni possono condurre sino al cedimento strutturale che può verificarsi con potenziali effetti catastrofici in relazione alle

varie condizioni di impianto.

Occorre pertanto avere una buona consapevolezza delle peculiari caratteristiche chimico-fisiche dell'idrogeno, soprattutto per ciò che riguarda l'interazione a bassa temperatura; naturalmente i vari materiali da utilizzare dovranno essere selezionati tenendo conto delle specifiche condizioni operative dell'impianto, nonché delle condizioni ambientali in cui saranno inseriti.

In generale devono essere analizzati nel dettaglio tutti i seguenti aspetti:

- resistenza alla corrosione
- infragilimento da idrogeno
- infragilimento da freddo (variazione delle caratteristiche fisico-meccaniche a temperature criogeniche)
- conseguenze associabili a possibili guasti
- tossicità sviluppata in seguito ad eventi incidentali
- effetti da esposizione alle alte temperature dovute ad incendio da idrogeno
- facilità di fabbricazione, assemblaggio ed ispezione

In particolare è importante osservare la diversa interazione che l'idrogeno ha nei confronti dei materiali metallici rispetto a quelli non metallici. L'interazione dell'idrogeno con i materiali non metallici costituisce una problematica che riguarda tutti quei componenti (guarnizioni, sigilli, ecc.) utilizzati nei sistemi impiantistici quali valvole, flange, ecc. I guasti associati a tali componenti possono dar luogo a rilasci di sostanza e conseguente incendio. La problematica connessa con l'interazione dell'idrogeno con i materiali metallici riguarda invece il fenomeno dell'infragilimento che consiste in un deterioramento delle proprietà del metallo a contatto con la sostanza che penetra nel reticolo molecolare e che può generare eventi catastrofici di cedimento strutturale. Il fenomeno, solo per ricordare le variabili più importanti, dipende dalle condizioni di pressione e temperatura, dalla concentrazione e purezza della sostanza, dal tempo di esposizione alla sostanza stessa, dallo stato tensionale cui è sottoposto il materiale, dalla sua microstruttura e dalle sue proprietà fisiche e meccaniche.

Al fine di eliminare o ridurre l'incidenza dei suddetti problemi, l'impianto di rifornimento dovrebbe essere assemblato con componenti costituiti con materiali non combustibili e resistenti all'aggressività dell'idrogeno; in particolare [3]:

- evitare l'impiego di ghisa o comunque di materiali ottenuti per fusione (l'idrogeno è molto permeabile e tali materiali sono molto porosi)
- ove possibile è consigliabile l'impiego di materiali a bassa tensione di snervamento
- se sono presenti saldature è bene che il giunto sia trattato con processi per la distensione delle tensioni
- ove possibile è consigliabile l'eliminazione dei nodi

Comunque qualsiasi sia la tipologia di impianto che si intende realizzare le tecnologie sono disponibili e ben testate per pressioni che mediamente si aggirano sui 350 bar e presentano anche delle buone efficienze di stoccaggio e distribuzione (un po' meno di produzione). In Germania a Dudenhofen è operativa la prima stazione di rifornimento al mondo con tecnologia di stoccaggio a 700 bar.

3.3 Normativa

Le stazioni di rifornimento di idrogeno compresso e/o liquefatto per autotrazione devono essere conformi sia alle normative che regolano la gestione dell'impianto, direttive che nel Nuovo Approccio sono definite con il termine di Direttive Sociali (ex art. 118 del trattato di Roma), sia alle normative che regolano la progettazione e l'installazione dei vari componenti, Direttive di Prodotto (ex art. 110 del trattato di Roma).

Le Direttive di Prodotto sono nate per assicurare il "libero scambio" all'interno della comunità europea di prodotti caratterizzati dal medesimo grado di sicurezza; a tal fine fissano dei "Requisiti Essenziali di Sicurezza" (RES) che devono essere necessariamente garantiti affinché una data apparecchiatura/componente possa essere messa in commercio/esercizio. Le Direttive Sociali sono nate invece per garantire la sicurezza nei luoghi di lavoro e come tali si applicano in ogni attività in cui siano presenti dei lavoratori subordinati; tali normative si basano sulla filosofia della prevenzione e protezione e prevedono sempre un'analisi dei rischi di impianto, cioè un'analisi del ciclo lavorativo finalizzata all'individuazione dei potenziali rischi operativi, alla loro definizione ed infine alla loro misura. Sulla base di questa analisi si devono successivamente pianificare gli interventi di prevenzione, ossia si devono fornire tutte le indicazioni ed i criteri d'intervento per l'eliminazione, o per lo meno la riduzione, dei rischi; gli

interventi di protezione devono privilegiare le misure di prevenzione “collettive” a quelle “individuali”.

In questa ottica, nella seguente tabella sono riportate tutte le principali normative applicabili nel caso di una stazione di rifornimento di idrogeno compresso e/o liquefatto, sia per quanto riguarda la gestione dell’impianto e del personale, sia per quanto riguarda la progettazione, costruzione ed installazione dei sistemi/componenti.

Tabella 1. Elenco delle principali normative applicabili nel caso di stazioni di rifornimento di idrogeno compresso e/o liquefatto per autotrazione.

	Produzione	Compressore	Stoccaggio recipienti mobili	Stoccaggio recipienti fissi	Dispenser	Impianto
D.P.R. 547/55, “Norme per la prevenzione degli infortuni sul lavoro” [4]						X
D.P.R. 303/56, “Norme generali per l’igiene del lavoro” [5]						X
D.Lgs 475/92, “Attuazione della direttiva 89/686/CEE del Consiglio del 21 dicembre 1989, in materia di ravvicinamento delle legislazioni degli Stati membri relative ai dispositivi di protezione individuale” [6]						X
D.Lgs 626/94, “Attuazione delle direttive 89/391/CEE, 89/654/CEE, 89/655/CEE, 89/656/CEE, 90/269/CEE, 90/270/CEE, 90/394/CEE e 90/679/CEE riguardanti il miglioramento della sicurezza e della salute dei lavoratori sul luogo di lavoro” [7]						X
D.Lgs 242/96, “Modifiche ed integrazioni al decreto legislativo 19 settembre 1994, n. 626, recante attuazione di direttive comunitarie riguardanti il miglioramento della sicurezza e della salute dei lavoratori sul luogo di lavoro” [8]						X
D.Lgs 493/96, “Attuazione della direttiva 92/58/CEE concernente le prescrizioni minime per la segnaletica di sicurezza e/o di salute sul luogo di lavoro” [9]						X
D.Lgs 10/97, “Attuazione delle direttive 93/68/CEE, 93/195/CEE e 96/58/CE relative ai dispositivi di protezione individuale” [10]						X
D.M. 10 Marzo 1998, “Criteri generali di sicurezza antincendio e per la gestione dell’emergenza nei luoghi di lavoro” [11]						X
D.Lgs 233/2003, (Direttiva ATEX II), “Attuazione della direttiva 1999/92/CE relativa alle prescrizioni minime per il miglioramento della tutela della sicurezza e della salute dei lavoratori esposti al rischio di atmosfere esplosive” [12]						X
Norma CEI EN 60079-10 (CEI 31-30), “Electrical apparatus for explosive gas atmospheres - Part 10: Classification of hazardous areas” [13]						X
Legge 18 Ottobre 1977, n. 791 (Direttiva Bassa Tensione), “Attuazione della direttiva del consiglio delle comunità europee (n. 73/23/CEE) relativa alle garanzie di sicurezza che devono possedere il materiale elettrico destinato ad essere utilizzato entro alcuni limiti di tensione” [14]	X	X			X	
D.P.R. 459/96 (Direttiva Macchine), “Regolamento per l’attuazione delle direttive 89/392/CEE, 91/368CEE, 93/44CEE e 93/68CEE concernenti il ravvicinamento delle legislazioni degli Stati membri relative alle macchine” [15]	X	X				
D.Lgs 615/96 (Direttiva EMC), “Attuazione della direttiva 89/336/CEE del Consiglio del 3 maggio 1989, in materia di ravvicinamento delle legislazioni degli Stati membri relative alla compatibilità elettromagnetica, modificata ed integrata dalla direttiva 92/31/CEE del Consiglio del	X	X			X	

28 aprile 1992, dalla direttiva 93/68/CEE del Consiglio del 22 luglio 1993 e dalla direttiva 93/97/CEE del Consiglio del 29 ottobre 1993" [16]						
D.Lgs 626/96, "Attuazione della direttiva 93/68/CEE in materia di marcatura CE del materiale elettrico destinato ad essere utilizzato entro taluni limiti di tensione" [17]	X	X			X	
D.P.R. 126/98 (Direttiva ATEX), "Regolamento recante norme per l'attuazione della direttiva 94/9/CE in materia di apparecchi e sistemi di protezione destinati ad essere utilizzati in atmosfera potenzialmente esplosiva" [18]	X	X			X	X
D.Lgs 93/2000 (Direttiva PED), "Attuazione della direttiva 97/23/CE (PED) in materia di attrezzature a pressione" [19]		X		X	X	X
D.M 07 Gennaio 1999, "Codificazione del colore per l'identificazione delle bombole per gas trasportabili" [20]			X			
Decreto 15 Marzo 2001, "Riconoscimento di un codice tecnico per la progettazione, costruzione e verifica delle bombole in materiale composito interamente avvolte per il trasporto di gas compressi, liquefatti e disciolti" [21]			X			
D.Lgs 23/2002 (Direttiva TPED), "Attuazione della direttiva 1999/36/CE, 2001/2/CE e della decisione 2001/107/CE in materia di attrezzature a pressione trasportabili" [22]			X			
D.M. 20 Giugno 2003 (ADR 2003), "Recepimento della direttiva 2003/28/CE della Commissione del 7 aprile 2003, che adatta per la quarta volta al progresso tecnico la direttiva 94/55/CE del Consiglio concernente il ravvicinamento delle legislazioni degli Stati membri relative al trasporto di merci pericolose su strada" [23]			X			
D.M. 2 Settembre 2003 (ADR 2003), "Traduzione in lingua italiana del testo consolidato della versione 2003 delle disposizioni degli allegati A e B dell'Accordo europeo sul trasporto internazionale di merci pericolose su strada (ADR) di cui al decreto del Ministro delle infrastrutture e dei trasporti 20 giugno 2003" [24]			X			

3.4 Sicurezza

Al fine di garantire un idoneo grado di sicurezza per gli impianti di rifornimento di idrogeno per autotrazione si rende sicuramente necessaria un'attenta valutazione dei rischi che tale tecnologia comporta per tutte le diverse tipologie di esposizione (persone e/o stesso impianto); tale azione si esplicita mediante un'analisi quantitativa di rischio, una volta che sono stati stabiliti i vari criteri di accettabilità.

L'EIHP, *European Integrated Hydrogen Project*, ha pubblicato nel Febbraio del 2003 un documento guida, *Risk acceptance criteria for Hydrogen Refuelling Stations* [25], nel quale tali criteri di accettabilità sono esplicitati e presentati al fine di costituire un valido strumento cui riferirsi dopo aver condotto una valutazione di rischio specifica, che è invece peculiare di ogni tipologia e lay-out di impianto.

I criteri di accettazione del rischio sono stati valutati in base a obiettivi di sicurezza opportunamente quantificati; i risultati che si ottengono mediante analisi quantitativa di rischio di un'installazione, di una procedura operativa, ecc. devono quindi essere confrontati con i suddetti criteri per la decisione di "accettabilità" o meno del livello di rischio individuato. Se il livello di rischio risulta troppo alto, sicuramente dovranno essere intraprese delle misure di riduzione dello stesso oppure di mitigazione delle conseguenze; questo mette da subito in evidenza come i criteri di accettazione del rischio possano essere utilmente impiegati anche per l'individuazione delle adeguate distanze di sicurezza, sia interne che esterne all'impianto.

È importante notare anche come i criteri di accettazione del rischio tengano in considerazione tutti i gruppi di persone che sono potenzialmente esposti in caso di eventi incidentali derivanti dall'esercizio di una

stazione di rifornimento (“terze parti”, “seconde parti”, “prime parti”). Per la valutazione del rischio cui sono soggette le “terze parti”, ossia persone esterne all’impianto, si deve valutare come gli eventi che hanno origine internamente alla stazione possano interessare le aree esterne, includendo le persone che vivono e che lavorano nelle vicinanze o che transitano per le principali arterie di traffico; a tal fine dovrebbero essere considerate sia le misure di rischio sociale che le misure di rischio specifico (o geografico), per esempio le curve FN (frequenze di accadimento in funzione del numero di eventi mortali) ed i profili di rischio.

La valutazione del rischio cui sono soggette le “seconde parti”, ossia le persone che si trovano all’interno dell’impianto per effettuare il rifornimento del proprio veicolo (clienti), deve necessariamente tenere in considerazione il limitato periodo di tempo durante il quale tali soggetti diventano possibili bersagli; di conseguenza il contributo di rischio per ciascun specifico individuo diverrà in realtà molto basso. Tuttavia, sarebbe irragionevole usare questa constatazione come scusa per non effettuare una valutazione di questa tipologia di rischio. Infine, occorre valutare il rischio per le “prime parti”, ossia gli operatori di impianto; generalmente per questo gruppo di individui si ritiene accettabile un più alto livello di rischio basato sui criteri di rischio individuale, e non più collettivo, stimato in funzione dell’azione specifica che ogni soggetto compie all’interno della stazione.

Nello specifico il rischio accettabile per una stazione di rifornimento di idrogeno può sicuramente essere collegato agli attuali livelli di rischio esistenti per le infrastrutture convenzionali di distribuzione di carburante. In particolare si può fare riferimento al livello medio di rischio stimato sulla base delle informazioni statistiche disponibili in letteratura, proprie di questa tecnologia oppure di attività simili, raccolte per area geografica o per fornitori (per esempio BP, Norsk Hydro, Shell, Esso, ecc.); oppure si può fare riferimento al rischio medio stimato per un tipico impianto di distribuzione di gas naturale per autotrazione considerando lo spettro di rischi che tale tipologia di impianto presenta (il gas naturale è il combustibile per autotrazione più simile all’idrogeno). Se però, come spesso accade, le statistiche e le analisi di rischio inerenti queste specifiche attività sono carenti in letteratura, il rischio accettabile può comunque essere valutato sulla base del rischio sociale generale: l’introduzione di una stazione di rifornimento di idrogeno non deve comportare un aumento del livello di rischio sociale.

Sulla base delle considerazioni sopra esposte, l’EIHP ha ritenuto il confronto con il rischio sociale la strategia più valida per la definizione dei livelli di rischio accettabili per le stazioni di rifornimento di idrogeno. Quando si confronta un dato rischio con quello sociale, ossia esistente nella vita di tutti i giorni, è normale fare riferimento al rischio naturale di fatalità più basso, cioè quello tipico di un gruppo di individui di età compresa tra i 5 ed i 15 anni; sulla base di questi dati il tasso base di mortalità preso a riferimento è risultato pari a $10^{-4}/\text{yr}$. L’installazione di ulteriori impianti non deve condurre ad un aumento maggiore dell’1 % per il tasso di mortalità naturale, cioè non deve introdurre un livello di rischio maggiore di $10^{-6}/\text{yr}$.

Naturalmente questi livelli di accettabilità sono connessi solamente ai rischi di processo e non ad altre tipologie di rischio, quali gli scontri fisici di autoveicoli sull’impianto oppure i rischi specifici professionali; inoltre sono validi solamente per la valutazione del rischio cui sono soggette le “terze parti” precedentemente definite, ossia le persone esterne all’impianto (pubblico).

Una volta stabilito quanto sopra esposto, ossia il limite massimo accettabile di $10^{-6}/\text{yr}$ per l’incremento di rischio sociale, per la decisione di accettabilità o meno del rischio introdotto dall’esercizio di una stazione di rifornimento di idrogeno, l’EIHP suggerisce l’adozione dei criteri sviluppati dall’autorità olandese VROM, che si basano sulla curva FN (frequenza di N o più eventi mortali in funzione di N) riportata nella seguente figura.

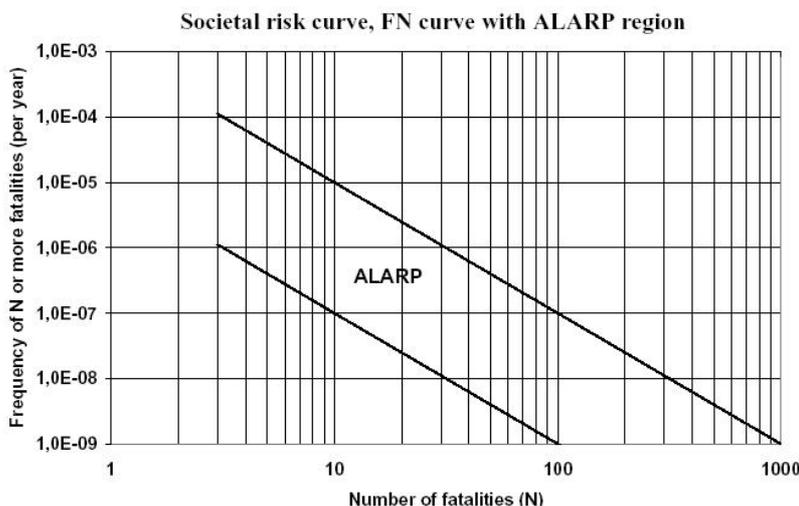


Figura 5. Curva FN per l'accettabilità del rischio [25]

Nella curva FN sono chiaramente individuabili tre distinte zone: la linea superiore è la curva limite di accettazione di rischio e l'area al di sopra di essa rappresenta un livello di rischio ritenuto non accettabile; la regione fra questa linea e la linea più bassa denota la zona di valutazione del rischio, detta zona ALARP (*As Low As Reasonable Practical*): per gli scenari che presentano un livello di rischio che cade in quest'area dovrebbe essere condotto un accurato studio di fattibilità, per la riduzione del rischio, sviluppato sulla base di un'analisi costi-benefici. Infine l'area sotto la linea inferiore è la zona in cui il rischio è ritenuto accettabile. La pendenza della curva FN è stata valutata in modo da riflettere pienamente l'avversione della società verso i singoli incidenti, anche se caratterizzati da una bassa frequenza di accadimento, che causano numerosi eventi mortali, rispetto agli incidenti a più alta frequenza di accadimento, ma con un numero minore di eventi mortali.

Per la riduzione dei livelli di rischio di cui sopra, in base all'esperienza acquisita con l'esercizio delle prime stazioni di rifornimento di idrogeno, è possibile procedere all'individuazione di tutti quei criteri di buona progettazione e localizzazione che devono necessariamente caratterizzare tali impianti.

In primo luogo le stazioni di rifornimento di idrogeno compresso e/o liquefatto devono essere localizzate in aree aperte, prive di impedimenti aerei, quali i ponti per il camminamento pedonale, ad eccezione delle strutture protettive dei vari componenti che però devono sempre essere dotate di adeguata ventilazione. L'impianto non deve essere ubicato neppure in prossimità di centri urbani densamente abitati, di linee ferroviarie o di strade ad alto traffico. Inoltre, la stazione deve essere completamente recintata con rete metallica su cordolo di calcestruzzo di altezza minima pari ad 1.8 m, secondo le disposizioni del D.M. 24 Maggio 2002 [1], ad esclusione dell'unità di rifornimento in quanto elemento accessibile al pubblico. Tutto ciò deve essere realizzato garantendo sempre la massima accessibilità ai mezzi ed alle squadre di soccorso per favorirne l'operatività e quindi una maggiore efficacia nell'eventuale intervento di soccorso urgente.

Un altro problema che si pone nell'organizzazione del lay-out di impianto risiede nella necessità di isolamento e separazione reciproca dei componenti pericolosi, cioè che presentano un rischio di incendio e/o esplosione; occorrerà prevedere una zona di rispetto finalizzata a limitare la probabilità di innesco in prossimità di centri di pericolo e/o di elementi pericolosi e dovrà essere garantito un idoneo grado di separazione del sistema da altri locali, edifici ed impianti. La separazione ha lo scopo di evitare la propagazione dell'incendio alle opere vicine, di evitare che il sistema sia interessato dall'incendio di opere vicine ed infine di limitare gli effetti di eventuali fenomeni esplosivi. La separazione può essere ottenuta mediante la programmazione delle attività in edifici ad uso esclusivo, mediante la predisposizione di strutture di separazione dotate di idonea resistenza al fuoco e comunque sempre mediante la predisposizione di adeguate distanze di sicurezza.

Stabilito il *lay-out* di impianto, occorre inoltre redarre sempre un piano di emergenza che contenga tutte le procedure da attuare per recuperare l'evento incidentale, se questo è fattibile, oppure per mettere il più possibile in sicurezza la stazione; il piano di emergenza deve chiaramente individuare tutte le possibili vie di fuga per gli operatori realizzate attraverso percorsi localizzati in aree caratterizzate dal minor rischio e dal minor tempo per l'evacuazione; tutto questo garantendo sempre e comunque l'accesso sul sito alle squadre di soccorso e di emergenza esterne.

Le misure di protezione di cui sopra inerenti sostanzialmente la localizzazione, il *lay-out* di impianto ed il piano di emergenza, si collocano nella filosofia di "mitigazione delle conseguenze". Sicuramente a monte, durante la progettazione e l'installazione dei componenti, deve essere condotta anche un'accurata analisi incentrata sulla riduzione della frequenza di accadimento degli eventi incidentali, ossia deve essere adottata la filosofia della "prevenzione degli incidenti". Questa filosofia si realizza mediante uno studio dettagliato dei sistemi, al fine di dotarli di opportuni dispositivi di protezione e/o sicurezza, e certamente mediante adeguata formazione/informazione del personale addetto. In questa ottica si procede alla presentazione delle norme di buona tecnica che generalmente caratterizzano le stazioni di rifornimento di idrogeno compresso e/o liquefatto per autotrazione, cercando di dividere gli interventi mirati al miglioramento della sicurezza in funzione della tipologia di rischio.

In primo luogo tutti i sistemi di controllo, regolazione e sicurezza devono essere del tipo *fail-safe* ed in ogni momento il sistema di sicurezza deve avere la priorità sul sistema di controllo di processo [18].

L'intero impianto di rifornimento di idrogeno deve essere dotato di sistema di arresto di emergenza attivabile sia automaticamente che manualmente (sistema ridondante ai fini della sicurezza); tale sistema deve essere comandato dai dispositivi di controllo dello stato di funzionamento di ogni componente ed in caso di rilevamento/segnalazione di anomalie deve provvedere all'isolamento del componente specifico, all'intercettazione di ogni alimentazione elettrica ed anche dell'intero impianto gas della stazione, oltre che all'emissione di appositi segnali di allarme, acustici e visivi, di avvertimento per gli operatori. Tutti i pulsanti manuali di attivazione del sistema di arresto di emergenza devono essere localizzati in punti facilmente

accessibili da parte del personale, sicuramente uno su ogni area di accesso alla stazione, uno su ogni zona di ingresso ai vari componenti e se è presente una control room uno all'entrata ed uno subito al suo interno. I sistemi di arresto di emergenza dei componenti e dei dispositivi di sicurezza devono, per quanto possibile, essere muniti di un sistema di blocco che impedisca la ripresa non intenzionale del funzionamento; un nuovo ordine di avvio deve poter agire sul funzionamento normale soltanto dopo che sia stato deliberatamente reinserito il sistema di blocco [18].

Per gli impianti dotati di *control room*, sia che sia un'unica stanza e quindi assoggettata ad ogni componente della stazione, sia che ve ne siano diverse e separate per la gestione singola delle varie unità, tutti i cavi di connessione e le penetrazioni tra di essa ed i vari componenti devono essere a tenuta e per motivi di sicurezza l'atmosfera interna deve essere tenuta in leggera sovrappressione mediante adeguata ventilazione al fine di evitare l'infiltrazione di sostanza infiammabile al suo interno e quindi la generazione di atmosfera potenzialmente esplosiva. Inoltre l'accesso a quest'area deve essere posto al di fuori di qualsiasi zona classificata (zona con pericolo di esplosione [13, 27]) dell'impianto.

Ogni componente deve essere mantenuto secondo le prescrizioni dettate dal fabbricante al fine di ridurre sia l'incidenza di guasto che un'utilizzazione scorretta; a questo scopo le attuali normative di prodotto (Direttiva Macchine, PED, ATEX, ecc.) obbligano il fabbricante a fornire ogni macchina insieme al suo libretto d'uso e manutenzione all'interno del quale sono previste tutte le modalità di funzionamento permesse e gli intervalli temporali da rispettare per le ispezioni di verifica e/o manutenzione. Di ogni operazione eseguita deve essere tenuta sul sito adeguata registrazione riportante la data della verifica/riparazione e quella della successiva ispezione prevista.

Per la riduzione del rischio derivante da sovrappressioni e/o sovratemperature l'intero impianto di rifornimento di idrogeno deve essere dotato di idonei sistemi automatici ed anche di pulsanti manuali (sistema ridondante ai fini della sicurezza) assoggettati ad ogni componente, che in caso di anomalie riscontrate per i parametri di temperatura e/o pressione provvedano all'isolamento del componente, all'emissione di appositi segnali di allarme, acustici e visivi, ed in taluni casi anche all'arresto automatico dell'intero impianto. Tutti i pulsanti manuali di intercettazione dei vari componenti e di spegnimento di emergenza dell'impianto devono essere localizzati in punti facilmente accessibili da parte degli operatori.

Ogni sistema di contenimento idrogeno deve essere provvisto di valvole di rilascio della sovrappressione (*pressure relief devices*) che intervengano nel caso questa aumenti, per es. quando i sistemi sono esposti a fiamma; tali valvole devono scaricare l'idrogeno in luogo sicuro. Nel caso di sistemi contenenti idrogeno liquido tali dispositivi di sicurezza devono essere collocati nella parte più alta, dal momento che l'idrogeno compresso derivante dal *boil-off* tende ad accumularsi proprio in quella zona.

I sistemi di vent devono essere progettati in modo da resistere a tutte le condizioni climatiche avverse e devono anche essere in grado di sostenere il carico termico che potrebbe aversi se l'idrogeno uscendo prendesse fuoco. Le leghe di rame e gli acciai inossidabili sono i materiali consigliati per queste linee di scarico di idrogeno in atmosfera in quanto meno soggetti ai fenomeni di corrosione atmosferica e quindi alla generazione di particelle che potrebbero provocare l'ignizione del gas [26]. Nel caso specifico dell'idrogeno liquido tali dispositivi devono essere progettati e localizzati in modo da evitare che le basse temperature in gioco provochino la condensazione dell'aria e la formazione di ghiaccio con conseguente rischio di ostruzione, e quindi impedimento, per il loro corretto funzionamento.

Per l'eliminazione del rischio incendio e/o esplosione, o almeno la riduzione della probabilità di accadimento, all'interno degli impianti e degli ambienti in cui si tratta o si stocca idrogeno non devono essere presenti sorgenti di innesco quali fiamme libere, scintille derivanti da circuiti elettrici e da scariche di tipo elettrostatico, corpi caldi o incandescenti e qualunque sorgente di energia di qualsiasi tipo. Inoltre tutte le apparecchiature ed i sistemi elettrici devono essere certificati ad uso idrogeno (per questo si fa riferimento al D.P.R. 126/98 [18] ed adeguati per l'impiego nelle varie Zone, determinate mediante classificazione delle aree eseguita in accordo alla Norma CEI EN 60079-10 [13] ed alla relativa guida di applicazione [27].

Quindi, in linea di principio, tutte le potenziali sorgenti di innesco devono essere eliminate, ovvero isolate, e tutte le operazioni devono essere condotte come se potesse sempre verificarsi un'imprevista accensione del gas infiammabile. Si devono installare idonei sistemi di protezione da scariche atmosferiche e da scariche elettrostatiche; queste ultime possono essere eliminate mediante la messa a terra di tutta la componentistica: la colonnina di rifornimento, il compressore e/o la pompa, i sistemi di stoccaggio e tutti gli altri componenti dell'impianto contenenti idrogeno devono essere messi a terra tutti insieme attraverso opportuni collegamenti equipotenziali. In particolare durante il rifornimento deve essere messo a terra anche il veicolo, insieme a tutte le apparecchiature che sono operative.

Oltre a quanto appena esposto circa l'eliminazione di ogni possibile sorgente di ignizione, la riduzione del rischio incendio e/o esplosione si deve attuare anche mediante la predisposizione di adeguata ventilazione in tutti gli ambienti in cui si tratta o si stocca idrogeno; in tali ambienti è consigliabile anche l'installazione di sistemi di rilevazione di idrogeno al fine di procedere, in caso di rilascio in atmosfera,

all'intercettazione del flusso ed all'isolamento di tutti i sistemi contenenti idrogeno.

Il calcolo, o la verifica, della ventilazione di un'area si effettua in base alle disposizioni riportate nella Norma CEI EN 60079-10 [13]; secondo tale norma una ventilazione adeguata è quella che oltre ad essere continua è sufficiente a garantire, in caso di rilascio di idrogeno in atmosfera, il mantenimento di una concentrazione idrogeno - aria al di sotto del campo di infiammabilità. Se la ventilazione risulta adeguata, l'area non è classificata come pericolosa dal punto di vista del rischio incendio e/o esplosione e di conseguenza al suo interno possono essere impiegate apparecchiature elettriche convenzionali; altrimenti l'area viene classificata (Zona 0, 1 oppure 2) e tutti i componenti elettrici presenti devono essere certificati. In una stazione di rifornimento non si deve mai avere in nessun luogo un'area classificata come Zona 0 e possibilmente si deve cercare di arrivare, intervenendo sulla ventilazione, ad una classificazione delle aree che veda la sola presenza delle Zone 2 [27].

Comunque in ogni ambiente chiuso, o parzialmente chiuso, devono essere posti dei sensori di rilevazione di concentrazione di idrogeno in aria, tarati per poter intervenire mediante sistemi di allarme acustici e visivi e contemporanea attivazione del sistema di spegnimento di emergenza dell'impianto, in caso di segnalazione di atmosfera potenzialmente esplosiva (meglio tarare i rilevatori ad una certa percentuale del limite inferiore di infiammabilità, generalmente 25 % LEL). Inoltre sempre in questi ambienti ed anche in prossimità della colonnina di erogazione idrogeno ai veicoli devono essere posti dei segnali di allarme incendio; gli allarmi devono essere attivati automaticamente, in maniera indipendente uno dall'altro, ed una volta attivi devono andare ad interrompere l'alimentazione di ogni sistema, ancora una volta mediante l'attivazione del sistema di spegnimento di emergenza della stazione di rifornimento. Tali allarmi devono poter essere attivati anche manualmente tramite dei pulsanti posti in zone facilmente raggiungibili da parte degli operatori (sicuramente uno per ogni punto di accesso alla stazione).

L'estinzione di un incendio che coinvolge l'idrogeno non risulta talvolta conveniente se non si è in grado di intercettare il rilascio di gas o di liquido; ciò a causa del pericolo di reignizione e di esplosione. Spesso i fenomeni di riaccensione si sviluppano a causa di metalli caldi che sono stati a contatto con la fiamma e che non sono stati sufficientemente raffreddati nelle operazioni di estinzione; ovviamente ciò dipende dalle condizioni generali e di contorno in cui l'incendio si sviluppa. È molto importante predisporre dei sistemi di raffreddamento a protezione di opere e di impianti ubicati nelle vicinanze dei sistemi di contenimento idrogeno allo scopo quindi di evitare la propagazione delle fiamme; incendi di piccole dimensioni possono essere estinti con buona efficacia mediante polveri chimiche, azoto ed anidride carbonica.

In una stazione di rifornimento di idrogeno deve sempre essere disponibile anche una linea di inertizzazione per tutti i sistemi/circuiti idrogeno; l'operazione di inertizzazione deve essere prevista nelle procedure operative per essere eseguita prima dell'avvio ad impianto nuovo ed anche prima e dopo ogni operazione di manutenzione eseguita su ogni componente/sistema. Per inertizzare i sistemi contenenti idrogeno gassoso si fa impiego di azoto; invece per i sistemi contenenti idrogeno liquido si deve ricorrere all'elio dal momento che tutti gli altri gas condensano o congelano alle sue temperature caratteristiche [3].

Un'altra componente di rischio sicuramente non trascurabile è quella associata all'errore umano; tale fattore è certamente di difficile valutazione, ma può essere almeno in parte ridotto mediante la formazione ed informazione del personale e mediante l'affissione di idonea cartellonistica riportante le procedure da mettere in atto, i segnali di divieto, i segnali di pericolo, ecc.

La cartellonistica, che deve sempre essere ben visibile in ogni area di accesso alla stazione di rifornimento di idrogeno compresso e/o liquefatto, deve almeno riportare (1) il divieto di fumare e/o di impiego di fiamme libere; (2) la posizione dei sistemi di gestione degli incendi ed in generale delle emergenze (estintori, idranti, ecc.) con le relative procedure operative; (3) la posizione dei pulsanti di manuali di arresto di emergenza dell'impianto; (4) la posizione delle valvole manuali di intercettazione del flusso di idrogeno ai vari componenti; (5) l'indicazione delle vie di fuga; (6) l'indicazione in prossimità della colonnina di rifornimento dell'obbligo di spegnimento e messa a terra del veicolo, nonché l'affissione della dettagliata procedura di rifornimento.

Anche la conservazione di tutta la documentazione è un aspetto che a volte è strettamente legato all'esercizio in sicurezza dell'impianto; deve infatti essere tenuta adeguata registrazione di tutte le ispezioni periodiche sullo stato dell'impianto e di tutte le operazioni di manutenzione. Devono inoltre essere conservate sul sito tutte le certificazioni e le autorizzazioni per l'esercizio della stazione.

4. CONCLUSIONI

Senza dubbio il rifornimento è una tecnologia che deve essere necessariamente sviluppata per la penetrazione dell'idrogeno e delle celle a combustibile nel campo della mobilità.

L'impiego di idrogeno compresso sembra la strada maggiormente percorribile per uno scenario a breve

termine, ma nella costruzione degli scenari più plausibili alcuni dubbi certamente rimangono su quale sia la migliore tecnologia di produzione dell'idrogeno stesso; la maggior parte degli studi condotti sono concordi nell'affermare che a breve termine la produzione di idrogeno risulta più economica se si ricorre ad unità di steam reforming, basti pensare che il trasporto in sito di combustibili convenzionali viene fatto con le attuali infrastrutture esistenti sul territorio. Tuttavia i problemi rimangono sullo sviluppo di metodi che migliorino le efficienze di separazione e segregazione dell'anidride carbonica che si sviluppa ogni volta che si fa ricorso a tecnologie di "combustione" di idrocarburi.

Uno scenario promettente, nell'ottica di un "mondo ad idrogeno" sviluppabile in un futuro leggermente più remoto, sembra essere quello della produzione distribuita mediante elettrolisi combinata con metodi puliti di produzione di elettricità: le fonti rinnovabili oppure il nucleare. Gli impianti elettrolitici infatti non producono emissioni nocive per l'ambiente e sono molto più flessibili nei confronti delle economie di scala rispetto agli steam reformers.

Comunque, qualsiasi sia la filosofia che verrà seguita per la promozione della penetrazione dell'idrogeno nel mercato della mobilità, le stazioni di rifornimento di idrogeno compresso e/o liquefatto per autotrazione possono essere già realizzate con lo stato attuale di sviluppo tecnologico ed anche con buone efficienze di stoccaggio e distribuzione (un po' meno di produzione). Quello che è importante osservare è che poi in pratica esistono solamente le normative nazionali ed internazionali di riferimento per la progettazione, costruzione e verifica dei sistemi e componenti; manca invece un piano regolatore più generale che costituisca una linea guida per la gestione del *lay-out* di impianto in termini di distanze di sicurezza, caratteristiche dei fabbricati per la localizzazione dei sistemi, ecc. In conclusione manca una normativa antincendio per le stazioni di rifornimento di idrogeno compresso e/o liquefatto per autotrazione, normativa che almeno per l'idrogeno in fase compressa potrebbe essere derivata sulla base di quella attualmente vigente per il gas naturale, ossia il Decreto Ministeriale 24 Maggio 2002, *Norme di prevenzione incendi per la progettazione, costruzione ed esercizio degli impianti di distribuzione stradale di gas per autotrazione* [1].

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] D.M. 24 Maggio 2002, *Norme di prevenzione incendi per la progettazione, costruzione ed esercizio degli impianti di distribuzione stradale di gas per autotrazione*, Gazzetta Ufficiale Italiana n. 131 del 6 Giugno 2002.
- [2] IGC 15/96/E, *Gaseous Hydrogen Stations*, Industrial Gases Council, Bruxelles, 1997.
- [3] College of the Desert, *Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies, Module 10 - Maintenance and Fueling Facility Guidelines*, Rev 0, December 2001, College of the Desert, Palm Desert, CA, USA.
- [4] D.P.R. 27 Aprile 1955, n. 547, *Norme per la prevenzione degli infortuni sul lavoro*, Gazzetta Ufficiale n. 158 del 12 Luglio 1955.
- [5] D.P.R. 19 Marzo 1956, n. 303, *Norme generali per l'igiene del lavoro*, Gazzetta Ufficiale n. 155 del 30 Aprile 1956.
- [6] D.Lgs 4 Dicembre 1992, n. 475, *Attuazione della direttiva 89/686/CEE del Consiglio del 21 dicembre 1989, in materia di ravvicinamento delle legislazioni degli Stati membri relative ai dispositivi di protezione individuale*, Gazzetta Ufficiale n. 289 del 9 Dicembre 1992.
- [7] D.Lgs 19 Settembre 1994, n. 626, *Attuazione delle direttive 89/391/CEE, 89/654/CEE, 89/655/CEE, 89/656/CEE, 90/269/CEE, 90/270/CEE, 90/394/CEE e 90/679/CEE riguardanti il miglioramento della sicurezza e della salute dei lavoratori sul luogo di lavoro*, Gazzetta Ufficiale n. 265 del 12 Novembre 1994.
- [8] D.Lgs 19 Marzo 1996, n. 242, *Modifiche ed integrazioni al decreto legislativo 19 settembre 1994, n. 626, recante attuazione di direttive comunitarie riguardanti il miglioramento della sicurezza e della salute dei lavoratori sul luogo di lavoro*, Gazzetta Ufficiale n. 104 del 06 Maggio 1996.
- [9] D.Lgs 14 Agosto 1996, n. 493, *Attuazione della direttiva 92/58/CEE concernente le prescrizioni minime per la segnaletica di sicurezza e/o di salute sul luogo di lavoro*, Gazzetta Ufficiale n. 223 del 23 Settembre 1996.
- [10] D.Lgs 2 Gennaio 1997, n. 10, *Attuazione delle direttive 93/68/CEE, 93/195/CEE e 96/58/CE relative ai dispositivi di protezione individuale*, Gazzetta Ufficiale n. 24 del 30 Gennaio 1997.
- [11] D.M. 10 Marzo 1998, *Criteri generali di sicurezza antincendio e per la gestione dell'emergenza nei luoghi di lavoro*, Gazzetta Ufficiale n. 81 del 07 Aprile 1998.
- [12] D.Lgs 12 Giugno 2003, n. 233 (Direttiva ATEX II), *Attuazione della direttiva 1999/92/CE relativa alle prescrizioni minime per il miglioramento della tutela della sicurezza e della salute dei lavoratori esposti al rischio di atmosfere esplosive*, Gazzetta Ufficiale n. 197 del 26 Agosto 2003.

-
- [13] Norma CEI EN 60079-10 (CEI 31-30), *Electrical apparatus for explosive gas atmospheres - Part 10: Classification of hazardous areas*, Comitato Elettrotecnico Italiano, classificazione 31-30, fascicolo 2895, 1996.
- [14] Legge 18 Ottobre 1977, n. 791 (Direttiva Bassa Tensione), *Attuazione della direttiva del consiglio delle comunità europee (n. 73/23/CEE) relativa alle garanzie di sicurezza che devono possedere il materiale elettrico destinato ad essere utilizzato entro alcuni limiti di tensione*, Gazzetta Ufficiale n. 298 del 02 Novembre 1977.
- [15] D.P.R. 24 Luglio 1996, n. 459 (Direttiva Macchine), *Regolamento per l'attuazione delle direttive 89/392/CEE, 91/368CEE, 93/44CEE e 93/68CEE concernenti il riavvicinamento delle legislazioni degli Stati membri relative alle macchine*, Gazzetta Ufficiale n. 209 del 06 Settembre 1996.
- [16] D.Lgs 12 Novembre 1996, n. 615 (Direttiva EMC), *Attuazione della direttiva 89/336/CEE del Consiglio del 3 maggio 1989, in materia di ravvicinamento delle legislazioni degli Stati membri relative alla compatibilità elettromagnetica, modificata ed integrata dalla direttiva 92/31/CEE del Consiglio del 28 aprile 1992, dalla direttiva 93/68/CEE del Consiglio del 22 luglio 1993 e dalla direttiva 93/97/CEE del Consiglio del 29 ottobre 1993*, Gazzetta Ufficiale n. 286 del 06 Dicembre 1996, Supplemento Ordinario n. 214.
- [17] D.Lgs 25 Novembre 1996, n. 626, *Attuazione della direttiva 93/68/CEE in materia di marcatura CE del materiale elettrico destinato ad essere utilizzato entro taluni limiti di tensione*, Gazzetta Ufficiale n. 293 del 14 Dicembre 1996, Supplemento Ordinario n. 219.
- [18] D.P.R. 23 marzo 1998, n. 126 (Direttiva ATEX), *Regolamento recante norme per l'attuazione della direttiva 94/9/CE in materia di apparecchi e sistemi di protezione destinati ad essere utilizzati in atmosfera potenzialmente esplosiva*, Gazzetta Ufficiale n. 101 del 04 Maggio 1998.
- [19] D.Lgs 25 Febbraio 2000, n. 93 (Direttiva PED), *Attuazione della direttiva 97/23/CE (PED) in materia di attrezzature a pressione*, Gazzetta Ufficiale n. 91 del 18 Aprile 2000.
- [20] D.M 07 Gennaio 1999, *Codificazione del colore per l'identificazione delle bombole per gas trasportabili*, Gazzetta Ufficiale n. 20 del 26 Gennaio 1999.
- [21] Decreto 15 Marzo 2001, *Riconoscimento di un codice tecnico per la progettazione, costruzione e verifica delle bombole in materiale composito interamente avvolte per il trasporto di gas compressi, liquefatti e disciolti*, Gazzetta Ufficiale n. 140 del 19 Giugno 2001, Supplemento Ordinario n. 153.
- [22] D.Lgs 2 Febbraio 2002, n. 23 (Direttiva TPED), *Attuazione della direttiva 1999/36/CE, 2001/2/CE e della decisione 2001/107/CE in materia di attrezzature a pressione trasportabili*, Gazzetta Ufficiale n. 57 del 08 Marzo 2002, Supplemento Ordinario n. 40.
- [23] D.M. 20 Giugno 2003 (ADR 2003), *Recepimento della direttiva 2003/28/CE della Commissione del 7 aprile 2003, che adatta per la quarta volta al progresso tecnico la direttiva 94/55/CE del Consiglio concernente il ravvicinamento delle legislazioni degli Stati membri relative al trasporto di merci pericolose su strada*, Gazzetta Ufficiale n. 156 del 08 Luglio 2003.
- [24] D.M. 2 Settembre 2003 (ADR 2003), *Traduzione in lingua italiana del testo consolidato della versione 2003 delle disposizioni degli allegati A e B dell'Accordo europeo sul trasporto internazionale di merci pericolose su strada (ADR) di cui al decreto del Ministro delle infrastrutture e dei trasporti 20 giugno 2003*, Gazzetta Ufficiale n. 236 del 10 Ottobre 2003.
- [25] European Integrated Hydrogen Project [EIHP2], *Risk acceptance criteria for Hydrogen Refuelling Stations*, Norsk Hydro ASA and DNV, For WP 5.2, Contract: ENK6-CT2000-00442, February 2003, Rev 0.
- [26] European Integrated Hydrogen Project [EIHP2], *Gaseous Hydrogen Vehicle Refuelling Stations*, WP 2, Working Draft, Contract: ENK6-CT2000-00442, 22 January 2004, Rev 3.
- [27] Norma CEI 31-35, *Guida all'applicazione della Norma CEI EN 60079-10 (CEI 31-30), classificazione dei luoghi pericolosi*, Comitato Elettrotecnico Italiano, classificazione 31-35, fascicolo 5925, 2001.