IL PROGETTO AUTOBUS AD IDROGENO PER IL TRASPORTO PUBBLICO TORINESE: VALUTAZIONE DEL RISCHIO

A. CARPIGNANO, D. GATTO, R. GERBONI, E. PONTE

Dipartimento di Energetica – Politecnico di Torino Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino acarpignano@polito.it

SOMMARIO

Il presente lavoro è stato sviluppato nell'ambito del Progetto autobus ad idrogeno dell'ATI, volto alla realizzazione e messa in funzione del primo autobus alimentato ad idrogeno costruito in Italia per il trasporto pubblico.

Il progetto è realizzato da ATM (Azienda Torinese Mobilità S.p.A), Comune di Torino, Irisbus, Gruppo Sapio, C.V.A. S.p.A. (Compagnia Valdostana delle Acque), Ansaldo, ENEA, con il contributo del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e della Regione Piemonte.

Lo studio qui trattato concerne gli aspetti di sicurezza relativi all'esercizio del bus per il quale si è proceduto alla realizzazione di una analisi di rischio preliminare, con particolare attenzione alla fase di valutazione delle conseguenze in quanto il veicolo si trova ad operare in un contesto, il centro cittadino, caratterizzato da un elevato livello di vulnerabilità.

1. INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni il problema dell'inquinamento atmosferico ha assunto proporzioni preoccupanti, in particolar modo nei centri urbani particolarmente soggetti ad un maggiore traffico veicolare; quest'ultimo è responsabile (in aggiunta all'attività di riscaldamento di locali e all'attività industriale) dell'emissione di grandi quantità di gas, principalmente l'anidride carbonica e gli ossidi di azoto, in grado di incrementare il naturale effetto serra, oltre a creare problemi per la salute degli esseri umani. In questi ultimi anni sono state avanzate proposte e realizzati progetti per la riduzione delle concentrazioni di queste sostanze; l'Ente del trasporto pubblico torinese ATM ha puntato sull'utilizzo di nuove tecnologie veicolistiche in grado di garantire il trasporto pubblico attraverso mezzi che sfruttassero combustibili impattanti in minor misura, quali il gasolio bianco ed il metano.

Come ulteriore sfida all'inquinamento, a Torino è stata lanciata l'idea di sfruttare l'idrogeno come combustibile per la trazione dei bus, esperienza del tutto nuova in Italia, che segue l'esempio proposto da progetti sviluppati in diverse città straniere (Londra, Monaco, Vancouver, ...). Il vantaggio dell'utilizzo dell'idrogeno come carburante risiede nel non presentare impatto atmosferico, in quanto il veicolo emette esclusivamente vapore acqueo.

Il progetto che prevede la realizzazione di un prototipo di autobus a idrogeno e della stazione di rifornimento del mezzo è realizzato dall'ATI (Associazione Temporanea di Imprese), costituita dai seguenti partner di progetto: ATM S.p.A. (Azienda Torinese Mobilità S.p.A), Irisbus Italia S.p.A., Sapio S.r.I., CVA (Compagnia Valdostana delle Acque S.p.A.), Ansaldoricerche S.r.I., ENEA (Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente); partecipano all realizzazione: TUV Bau und Betrieb GmbH, IFC (International Fuel Cells), CRF (Centro Ricerche Fiat); contribuiscono inoltre al progetto anche il Ministero dell'Ambiente, il Ministero dell'Interno, il Ministero della Sanità e il Politecnico di Torino.

L'attività iniziata nel 2000 ha finora portato alla realizzazione di un prototipo di bus, attualmente testato su pista, prossimamente sottoposto ad esercizio di linea (senza passeggeri); l'obiettivo è quello di iniziare la messa in esercizio di piccole flotte sperimentali a partire dal 2005, mentre le tempistiche per una maggiore diffusione di tale tipo di tecnologia dipenderanno dagli esiti della sperimentazione e dalle politiche di prezzo delle celle. Si può ritenere che tale diffusione possa avvenire intorno al 2010 [1].

2. OBIETTIVI

Nell'ambito del progetto sopra descritto, l'attività presentata in questa sede concerne un'analisi di sicurezza preliminare condotta presso il Politecnico di Torino al fine di valutare il rischio connesso ai moduli di alimentazione del carburante e della fuel cell in fase di esercizio del veicolo.

I veicoli ad idrogeno devono possedere caratteristiche tecniche e di sicurezza tali da consentire prestazioni e funzionalità almeno analoghe a quelle di un veicolo convenzionale; è pertanto necessario che presentino tossicità e rischio associati all'utilizzo equivalenti a quelli dei veicoli tradizionali.

L'utilizzo di idrogeno, sostanza incolore, inodore, insapore e atossica, che si trova allo stato gassoso in condizioni di temperatura e pressione atmosferica, comporta una pericolosità superiore all'utilizzo di altri gas poiché tale sostanza presenta un ampio range di infiammabilità ed esplodibilità e brucia nell'aria con una fiamma pressoché invisibile, di colore blu molto chiaro; allo stato gassoso, tuttavia, tende a disperdersi velocemente.

Trattandosi di un progetto che non ha precedenti in Italia e non essendo pertanto disponibili indicazioni normative in materia di circolazione e gestione di veicoli alimentati ad idrogeno, si è proceduto alla realizzazione di un'analisi di rischio di massima al fine di verificare le condizioni di sicurezza del mezzo su strada e valutarne l'accettabilità. Nel contempo, lo studio è stato anche finalizzato ad individuare le principali problematiche connesse all'applicazione di questo tipo di analisi ad un sistema che presentava importanti peculiarità, quali la presenza di un sistema di propulsione ad idrogeno su un mezzo dedicato al trasporto di un elevato numero di passeggeri, circolante in un'area ad elevata vulnerabilità (centro cittadino).

3. DESCRIZIONE DEL SISTEMA

Il bus oggetto dell'analisi, chiamato CityClass-Fuel Cell è azionato da un motore elettrico alimentato dalla cella combustibile e da un sistema di accumulatori. La produzione del combustibile avviene per via elettrolitica dall'acqua, utilizzando l'energia idroelettrica e pertanto l'"emissione zero" è garantita per l'intero ciclo di produzione, sia del veicolo, sia del carburante.

L'alimentazione del carburante avviene a partire da 9 serbatoi cilindrici posti sul tetto del veicolo, in cui è stoccato l'idrogeno ad una pressione di 200 bar; ognuno di essi è corredato di una valvola di blocco alimentazione, una valvola limitatrice di flusso e un fusibile che interviene in caso di incendio esterno consentendo lo sfiato del gas in pressione. Ogni bombola è collegata al collettore principale, che permette:

- il riempimento delle bombole nella fase di carico del carburante: questa avviene tramite condotte flessibili attraverso cui fluisce l'idrogeno dalla stazione di servizio alle bombole; il processo è mantenuto in condizioni di sicurezza da dispositivi di posizionamento, che verificano l'avvenuto aggancio delle manichette al veicolo. Le condotte sono tre: una condotta trasporta l'idrogeno dalla stazione di servizio alle bombole; una seconda condotta permette lo spurgo controllato di vapori di idrogeno presenti nel bus precedentemente al rifornimento; un'ultima condotta alimenta l'azoto necessario al funzionamento delle valvole pneumatiche che lavorano nella fase di carico del carburante.
- l'invio del carburante alla fuel cell: essendo l'idrogeno stoccato ad alta pressione (200 bar), si rende necessario operare una tripla riduzione di pressione attraverso l'utilizzo di valvole riduttrici, per permettere alla cella di ricevere il carburante a valori di pressione molto limitati (la cella funziona ad una pressione di pochi bar).

Il carburante giunge alla fuel cell, corredata di:

- a) un compressore ed un filtro per l'alimentazione dell'aria di processo;
- b) un impianto di ventilazione della cabina della cella;
- c) un sistema di raffreddamento ad acqua della cella, composto da serbatoio di alimentazione e pompa con filtro;
- d) un sistema di scarico del gas associato ad un separatore dell'acqua, allo scopo di separare vapori di idrogeno esausto dalla condensa.

Per monitorare l'attività dell'impianto, sono presenti dei rilevatori nelle seguenti aree del veicolo: area delle valvole e degli accessori sul tetto, area dei dispositivi di rifornimento dell'idrogeno, area di scarico della fuel cell, area in coda al bus.





4. ANALISI DI RISCHIO

L'analisi eseguita si è articolata secondo le seguenti fasi:

- Identificazione dei pericoli: analisi storica; applicazione di FMECA (Failure Mode Effect and Criticality Analysis) e HAZOP (Hazard and Operability Analysis) per l'identificazione dei componenti di maggiore criticità e dei possibili eventi iniziatori di sequenze incidentali;
- Event tree Analysis;
- Analisi delle conseguenze.

4.1 Identificazione dei pericoli

Obiettivo di questa prima fase di analisi è stata l'individuazione delle possibili sorgenti di pericolo presenti nel sistema, e più precisamente degli eventi iniziatori (guasto di componenti, errori umani, deviazioni di parametri di processo, eventi esterni).

I risultati ottenuti dalle metodologie applicate sono di seguito descritti.

Analisi storica: essendo la tecnologia applicata ai veicoli ad idrogeno molto recente, non sono presenti nelle banche dati specifiche informazioni relative ad eventi incidentali di veicoli ad idrogeno; l'indagine storica ha pertanto riguardato scenari incidentali che hanno interessato tale sostanza in differenti tipologie di sistema (impianti di processo, stoccaggi, pipework, trasporti stradali e ferroviari, laboratori,...).

Con riferimento alle seguenti fonti: MHIDAS, MARS, CIRC (United States Chemical Safety), LPPI (*Loss Prevention in the Process Industries*, F. P. Lees, 1996, [2]), sono stati analizzati 111 casi di eventi incidentali che hanno coinvolto l'idrogeno, catalogati in funzione della data di accadimento, del luogo fisico in cui si è verificato l'incidente, delle cause (ordinate secondo le seguenti categorie: errore di progettazione, errore umano, perdita o rottura di componenti costruttivi, eventi esterni al luogo ove l'incidente è avvenuto, impatto con corpi estranei, altre cause) e delle conseguenze (flash fire, incendi, BLEVE, rilasci in ambiente esterno, UVCE, VCE, esplosioni non meglio definite, fireball, nessuna conseguenza).

Si evidenziano i seguenti risultati:

- è stato rilevato un solo incidente, su un totale di 111, accaduto nella fase di carico/scarico della sostanza;
- poco più del 10% di casi sul campione totale riguarda il trasporto di recipienti contenenti idrogeno; su 13 casi individuati, 2 riguardano i trasporti su rotaia, mentre 3 casi non hanno comportato conseguenze. Dei rimanenti 8 casi, solo uno legato ad un errore umano ha comportato danni e lesioni (2 morti e 19 feriti);
- il 25 % dei casi totali fa riferimento a incidenti che interessano idrogeno stoccato in bombole o recipienti in pressione. Lo stoccaggio a bordo veicolo a mezzo di bombole è da ritenersi alla luce di questo dato particolarmente delicato, sebbene le quantità di idrogeno in gioco nei casi incidentali analizzati siano solitamente più cospicue;
- le cause più ricorrenti negli eventi incidentali sono il cedimento meccanico e la rottura dei componenti, la perdita e l'errore umano; sommati, questi casi costituiscono la causa di più di due terzi degli incidenti a causa nota. I componenti maggiormente soggetti a cedimento meccanico, rottura e perdita si sono rivelati le valvole e le tubazioni. Tra i casi di errore umano, si riscontrano più frequentemente cause di incidente in fase di manutenzione piuttosto che nella gestione delle macchine e degli stabilimenti

industriali: il grado di addestramento del personale addetto, soprattutto per la manutenzione periodica degli impianti si rivela pertanto fondamentale;

• le esplosioni rappresentano l'evoluzione più probabile di un incidente, ma sono frequenti anche i casi di incendio e di rilascio della sostanza in ambiente.

Sulla base dei dati raccolti, si sono individuati gli elementi più soggetti a incidenti che pregiudicano la sicurezza delle persone nelle bombole, in cui il combustibile è stoccato a bordo veicolo, nelle valvole e tubazioni, sovente soggette a cedimenti meccanici.

I dati estrapolati dall'analisi storica non hanno validità statistica ai fini dell'analisi probabilistica poiché il bus presenta peculiarità proprie non assimilabili in toto a quelle di nessun altro sistema nominato negli abstract delle banche dati esaminate.



Figura 2. Occorrenze delle cause degli incidenti accaduti nei sistemi ad idrogeno.



Figura 3. Occorrenze delle conseguenze degli incidenti accaduti nei sistemi ad idrogeno.

FMECA e HAZOP: Le analisi sono state effettuate suddividendo lo studio del veicolo in sistemi sufficientemente indipendenti ed individuando una o più fasi operative per ogni sistema:

- *circuito di alimentazione della fuel cell a bordo bus:* si è considerata la fase di caricamento carburante dalla stazione di servizio alle bombole e la fase di alimentazione dell'idrogeno dalle bombole alla fuel cell;
- *fuel cell a bordo bus*: si è esaminata la fase di alimentazione del carburante alla fuel cell, comprensiva dei circuiti di raffreddamento e trattamento dei flussi in uscita dalla cella a combustibile.

Dall'applicazione di HAZOP e FMECA, il modo di guasto più critico è risultato la rottura delle tubazioni che trasportano l'idrogeno alla pressione di 200 bar: a causa di eventi esterni (urti, fatica termica o meccanica) eventualmente combinati con fenomeni di corrosione, si verifica la rottura di una delle condotte che collegano la bombola al collettore principale, provocando la fuoriuscita del gas presente nella condotta stessa e in quelle parallele, alimentate dall'idrogeno residuo presente in tutte le bombole; questi ultimi flussi sono limitati in portata da valvole limitatrici di flusso, ma si verificano fino ad esaurimento del combustibile, a causa dell'assenza di sistemi di blocco. Nel caso sia presente una fonte di innesco nelle immediate vicinanze del luogo di rilascio, si può verificare un innesco immediato a cui segue la formazione di un jet-fire, con possibili effetti domino; ad un innesco ritardato può invece far seguito l'esplosione della sostanza.

4.2 Event tree analysis

Questa tecnica di analisi probabilistica è stata applicata allo scenario appena descritto (identificato di seguito come scenario EIR1), e ad un secondo scenario (identificato come EIR2), derivato dal primo, in cui si è ipotizzata la presenza di sistemi di blocco automatico dei flussi, assenti nel caso precedente; sostituendo le valvole manuali presenti con delle valvole pneumatiche collegate al sensore di idrogeno (QZ2), si è ottenuto lo schema costruttivo riportato in figura, valido per ogni linea che collega la bombola B01al collettore principale (TSE01 è il fusibile posto a protezione della bombola in caso di incendio esterno al sistema).



Figura 4. Schema costruttivo relativo alla prima linea (EIR2).

L'albero degli eventi risultante per EIR1, che rappresenta l'ipotesi iniziale di progetto del bus, non prevede l'intervento di alcun sistema di protezione e mitigazione e pertanto l'evoluzione dell'incidente risulta condizionato unicamente dal tipo di innesco, immediato o ritardato. Il valore di frequenza di rottura della tubazione è stato ottenuto (con riferimento alla banca dati EGIG 1997 [3], rotture del tipo pinehole-crack), considerando la lunghezza complessiva delle nove tubazioni. Le possibili evoluzioni dell'incidente sono state individuate in: jet fire (frequenza di accadimento: 1.26 10⁻⁶ eventi/anno), UVCE (freq: 3.00 10⁻⁶ eventi/anno), dispersione dell'idrogeno in atmosfera (freq: 3.00 10⁻⁶ eventi/anno).



Figura 5. Albero degli eventi- scenario EIR1.

Per quel che riguarda lo scenario EIR2, individuato alla luce dei risultati delle analisi FMECA e HAZOP, si è supposto conservativamente che la rottura della tubazione si verifichi nel tratto compreso tra la bombola e la valvola pneumatica, rendendo inutilizzabile la valvola stessa e con conseguente fuoriuscita di tutto il contenuto della bombola. Nell'albero degli eventi è necessario valutare se a seguito della rottura della tubazione si abbia o meno l'intervento del sensore QZ2 e delle valvole pneumatiche, entrambi condizionati alla presenza di alimentazione dell'energia elettrica da parte della batteria. I valori di disponibilità dell'alimentazione di energia elettrica, del sensore idrogeno e di una singola valvola pneumatica sono stati

tratti dalla banca dati affidabilistica OREDA 92 [4]; la disponibilità della parte meccanica delle valvole pneumantiche riportata nell'albero degli eventi è stata determinata con la stesura dell'albero dei guasti relativo al sistema costituito dalle valvole stesse.



Figura 6. Albero degli eventi-EIR2.

I fenomeni che possono derivare dal rilascio di idrogeno sono risultati: jet fire, UVCE e dispersione in atmosfera della sostanza; per ciascuno di essi la frequenza di accadimento è dell'ordine di 10⁻⁷ eventi/anno in caso di mancata alimentazione dell'energia elettrica e con riferimento alla medesima banca dati.



Figura 7. Albero dei guasti relativo alla disponibilità del sistema di valvole pneumatiche.

4.3 Analisi delle conseguenze

Come già sopra sottolineato, lo studio relativo alla modellizzazione dei fenomeni fisici derivanti da eventi incidentali assume grande importanza in questa analisi poiché l'attività del bus interessa un centro cittadino, area ad elevata vulnerabilità.

La simulazione di tali fenomeni, finalizzata alla valutazione quantitativa dei parametri di irraggiamento e sovrapressione prodotti, è stata condotta facendo ricorso a modelli fisico-matematici di tipo semplificato, descritti nel Libro Giallo del TNO [5] e implementati nel software Effect 4.0 del TNO.

Una volta valutata la portata di rilascio, sono state esaminate le conseguenze della formazione di un jetfire e di un UVCE nei due casi di fuoriuscita del contenuto di tutte le bombole (con riferimento allo scenario EIR1) e di fuoriuscita dell'idrogeno presente in due bombole (con riferimento allo scenario EIR2, ipotizzando la presenza dell'alimentazione elettrica, la disponibilità dei sensori ad idrogeno e l'indisponibilità delle valvole pneumatiche).

Rilascio: Il valore di efflusso critico è stato ottenuto dall'applicazione del modello TNO di rilascio di gas da vessel attraverso un foro nella condotta connessa al serbatoio stesso. La simulazione è stata realizzata sulla base di ipotesi estremamente conservative: si è considerata la tubazione, del diametro di mezzo pollice, che lavora alla pressione maggiore, pari a 200 bar, e il coinvolgimento del massimo volume di sostanza possibile (contenuto delle nove bombole per lo scenario EIR1 e contenuto di due bombole per lo scenario EIR2, a seguito del rifornimento del bus). E' stato inoltre valutato il variare della portata di rilascio al variare del cammino medio percorso da tutti i flussi in arrivo dalle bombole alla fessura (2 e 5m) per due ipotesi di fessurazione: 50% del diametro e 100% del diametro (rottura a ghigliottina).

Jet-fire: Si è analizzato lo scenario incidentale relativo ad un jet-fire dovuto all'innesco immediato dell'idrogeno fuoriuscito. In questo caso la simulazione è stata condotta facendo ricorso al Chamberlain Model descritto nel Libro Giallo del TNO; sono stati inizialmente impostati i valori di input riportati nella seguente tabella.

Inclinazione del getto	90°
Temperatura ambiente	18° C
Umidità relativa	70%
Velocità del vento	2 m/s

Tabella 1. Chamberlain Model - Dati di input.

In caso di rottura della tubazione e rilascio senza intervento di alcun sistema di protezione (scenario EIR1) si sono ottenuti i risultati riportati in Tabella 2 (per ampiezza si intende l'estensione del getto perpendicolarmente alla lunghezza).

Diametro fessura [mm]	Lunghezza jet-fire [m]	Ampiezza max jet-fire	Distanza con flusso termico di 12,5	Distanza con flusso termico di 5 kW/m ²
		[m]	$kW/m^2 [m]$	[m]
6,35 (50 % D)	7	2	6	9
13,7 (100 % D)	11	4	13	15

Tabella 2. Chamberlain Model – Risultati (EIR1)

Le conseguenze relative alla formazione di jet fire interesserebbero pertanto unicamente le vicinanze del mezzo.

Si è quindi proceduto ad un'analisi di sensitività su alcuni dei parametri di input, variando come di seguito indicato i valori utilizzati:

- Inclinazione del getto: 45°;
- Temperatura ambiente: 5°C , 30°C;
- Umidità relativa : 50%, 90%;
- Velocità del vento: 1 m/s, 3 m/s e 5 m/s.

La temperatura ambiente e l'umidità relativa si sono dimostrati parametri poco influenti sugli output che non hanno quindi subito significative variazioni.

Un'inclinazione del getto pari a 45° ha fornito, invece, un incremento dei valori di lunghezza e ampiezza del jet-fire e contemporaneamente un minore irraggiamento dei bersagli posti al suolo. Il caso di una tale

inclinazione ha presentato un suo interesse consentendo di verificare il coinvolgimento delle facciate degli edifici ad un eventuale evento incidentale.

La velocità del vento ha rappresentato il dato di input di maggiore influenza sugli output del modello, determinando al crescere di tale valore un incremento del flusso termico in arrivo al bersaglio. Ciò ha implicato l'introduzione di notevoli incertezze nei risultati della simulazione poiché il valore da attribuire a tale parametro risulta influenzato dalla velocità tenuta dal veicolo.

Dall'analisi di sensitività si è verificato che i parametri scelti all'inizio della simulazione sono quelli che forniscono i risultati maggiormente conservativi nei casi in cui il bersaglio non si trovi nelle immediate vicinanze del bus; diversamente, le condizioni più sfavorevoli si riconducono alla seguente combinazione di parametri:

Inclinazione del getto	90°
Temperatura ambiente	5° C
Umidità relativa	70 %
Velocità del vento	5 m/s

Tabella 3. Chamberlain Model – Dati di input maggiormente cautelativi per bersaglio posto nei pressi del bus.

I risultati sono riassunti in un diagramma di andamento del flusso termico in funzione della distanza del bersaglio; si ipotizza l'avvenimento della rottura a ghigliottina, in quanto più impattante per il bersaglio in termini di flusso termico assorbito.



Figura 8. Flusso assorbito in funzione della distanza del bersaglio dall'origine del getto: in grigio chiaro, caso conservativo per un bersaglio posto presso il veicolo; in grigio scuro, caso conservativo per un bersaglio posto a maggiore distanza dal veicolo.

Nel caso di intervento di sistemi di protezione, quali i sensori ad idrogeno, e contemporaneamente di indisponibilità delle valvole pneumatiche, si è considerato il rilascio dell'idrogeno contenuto in due sole bombole (scenario EIR2).

Si è verificato che i valori ottenuti sono identici al caso di efflusso da nove bombole, in quanto l'input del modello sfrutta come variabile di output del modello di rilascio la sola portata di inizio efflusso: questo valore si mantiene inalterato al variare della massa rilasciata, che a sua volta dipende solo dalle condizioni di pressione all'interno e all'esterno del vessel, e non dalla quantità stoccata.

Dispersione: La simulazione è stata eseguita utilizzando un modello gaussiano di dispersione in atmosfera di gas neutro (Libro Giallo TNO): poiché l'idrogeno è un gas molto più leggero dell'aria, in grado di disperdersi rapidamente, anche in questo caso i risultati ottenuti sono da ritenersi ampiamente conservativi. La dispersione viene definita semi-continua, in quanto la massa esplodibile di idrogeno fuoriesce dalla rottura con un valore di portata che varia continuamente nel tempo.

Il modello di dispersione introduce grandi incertezze nei risultati prodotti in quanto i modelli semplificati utilizzati non consentono di descrivere in modo accurato la geometria del sistema, in particolare del tipo di confinamento a cui è sottoposta la nube, fondamentale invece nei casi, come quello studiato, in cui il contesto dell'evento incidentale presenta geometrie particolarmente complesse.

UVCE : Mentre il jet-fire produce effetti localizzati nelle vicinanze del bus, gli effetti di dispersione sulla nube possono creare pericolo anche a distanze notevoli dalla sorgente di rilascio: questo porta ad affermare che una perdita di carburante in una zona sgombra da palazzi (quindi con un grado di confinamento molto basso) non esclude che possa verificarsi un'esplosione anche in zone densamente popolate nei pressi del veicolo in avaria.

Il modello utilizzato per la simulazione di un'esplosione non confinata della nube di idrogeno è il Multienergia del TNO. Trattandosi di un'analisi di massima, si è simulata un UVCE, sebbene i quantitativi di idrogeno in gioco siano di scarsa entità; la simulazione di turbolent free jet avrebbe infatti potuto portare ad una sottostima dei danni.

Attraverso un'analisi di sensitività, si è ottenuto che lo studio più conservativo sul fenomeno dell'UVCE è rappresentato dall'impostazione dei seguenti parametri:

Velocità del vento	1 m/s
Classe di stabilità dell'atmosfera	F (molto stabile)
Temperatura ambiente	30° C
Frazione di nube infiammabile confinata	50 %

Tabella 4. UVCE – Dati di input.

Seguono i risultati ottenuti per i due differenti scenari incidentali analizzati, EIR1 e EIR2 riferiti all'istante di tempo in cui si verificano le conseguenze più gravose.

Scenario	EIR1 100 % D	EIR2 100 % D
Quantità entro i limiti di esplodibilità [kg]	7,5	2,5
Distanza massima LEL [m]	91,8	60,3
Distanza massima UEL [m]	18,2	0
Altezza massima LEL [m]	3,4	3,4
Altezza massima UEL [m]	0,8	0
Distanza a cui si ha una Δp di 0,3 bar [m]	26,1	17
Distanza a cui si ha una Δp di 0,07 bar [m]	73,9	48,2

Tabella 5. Risultati della simulazione di UVCE per gli scenari EIR1e EIR2 in ipotesi di rottura a ghigliottina.

4.4 Vulnerabilità del contesto urbano e stima del rischio

L'analisi di vulnerabilità è stata eseguita con particolare attenzione al percorso che l'autobus seguirà sul territorio urbano di Torino, percorso caratterizzato da un'alta densità di popolazione (per la presenza di palazzi a più piani, scuole pubbliche o attività commerciali), da vie strette, dalla presenza di distributori di carburante o generiche installazioni industriali, dalla vicinanza di possibili sorgenti di innesco (come, ad esempio, le linee elettrificate del tram).

La stima del rischio connesso all'esercizio del mezzo è stata definita in tre particolari contesti: veicolo in marcia (caso A), veicolo in sosta alla fermata (caso B), veicolo in transito in zona di mercato rionale (caso

C). Le aree di danno create dai fenomeni di jet fire e UVCE sono quindi applicate a zone caratterizzate da differenti gradi di vulnerabilità.

Prima di procedere alla determinazione del danno associato ai tre casi indicati, sono state fatte alcune ipotesi di carattere più generale: in caso di esplosione, si è ipotizzato che deceda il 5% delle persone coinvolte da un'onda di pressione superiore a 0.3 bar (questa stima è di carattere conservativo in quanto Lees suggerisce una probabilità di morte inferiore all'1% per sovrapressioni inferiori a 1-2 bar, [2]); in caso di jet fire, si è considerata una vulnerabilità del 100% per individui investiti direttamente dalla fiamma e una vulnerabilità del 5% per le persone raggiunte da un irraggiamento pari a 12.5 kW/m² (ipotesi nuovamente conservativa in quanto Lees suggerisce un valore di letalità pari all'1% per un irraggiamento di 10.2 kW/m² della durata di almeno 45.2 secondi, [2]).

Nel caso di veicolo in marcia (caso A), si è utilizzato un valore di densità media di popolazione pari alla densità abitativa dell'area metropolitana di Torino. Si è inoltre modificata la frequenza di accadimento dell'evento incidentale calcolata con l'albero degli eventi precedentemente riportato in funzione:

- del tempo in cui il veicolo è realmente in movimento e non sosta alle fermate, ottenuto dal profilo di missione del bus;
- delle ore di servizio giornaliere (tempo di sosta in deposito pari a 10.5 ore giornaliere).

Nel caso di veicolo in sosta alla fermata (caso B), si è considerato un valore di presenze pari a 30 persone; si è così ottenuta una densità pari a 0.4 ab/m². Il valore di frequenza di accadimento utilizzato in questo caso è stato calcolato come prodotto della frequenza risultata dall'event tree analysis, e:

- della probabilità di accadimento dell'evento incidentale in fase di sosta del veicolo ad una fermata;
- della probabilità che il veicolo sia in esercizio al momento dell'incidente;
- della probabilità di sviluppo della fiamma in direzione della fermata.

Si è infine studiato il caso di rilascio di idrogeno in prossimità di un'area adibita a mercato rionale posta lungo il percorso seguito dal veicolo. Si considera una presenza di 700 persone tra venditori e clienti nei giorni festivi, di massima affluenza, su un'area di circa 2400 m². La frequenza di accadimento è valutata considerando i risultati dell'event analysis e:

- la probabilità di presenza del bus nei pressi del piazzale: non essendo presenti fermate del bus su tutta la lunghezza del piazzale, si è fatto riferimento a condizioni di traffico intenso e ai tempi di attesa al vicino semaforo;
- la probabilità che il veicolo sia in esercizio al momento dell'incidente;
- la probabilità di sviluppo della fiamma in direzione dell'area di mercato.

Dal prodotto delle frequenze (ottenute con gli alberi degli eventi) e dei danni (ricavati con l'analisi delle conseguenze appena condotta) si ottiene una stima dei rischi; di seguito si allega la tabella riassuntiva dei valori per i casi studiati.

EIR	EVENTO	Rischio [morti/anno]		
		CASO A	CASO B	CASO C
EIR1 rott. 50 %	jet-fire	3,8 E-8	2,07 E-6	9,8 E-8
	UVCE	6,0 E-8	1,26 E-6	3,45 E-7
EIR1 rott. 100 %	jet-fire	1,4 E-7	3,0 E-6	2,88 E-7
	UVCE	1,8 E-7	1,3 E-6	9,02 E-7
EIR2 rott. 50 % mancata	jet-fire	3,0 E-9	1,95 E-7	9,52 E-9
alimentazione energia	UVCE	2,0 E-9	5,94 E-8	1,62 E-8
EIR2 rott. 100 % mancata	jet-fire	1,3 E-8	2,78 E-7	2,72 E-8
alimentazione energia	UVCE	8,0 E-9	6,05 E-8	4,2 E-8
EIR2 rott. 50 % indisponibilità	jet-fire	9,0 E-11	1,28 E-8	6,27 E-10
sensore di idrogeno QZ2	UVCE	1,85 E-10	3,9 E-9	1,06 E-9
EIR2 rott. 100 % indisponibilità	jet-fire	8,7 E-10	1,23 E-8	1,78 E-9
sensore di idrogeno QZ2	UVCE	5,54 E-10	4,0 E-9	2,77 E-9
EIR2 rott. 50 % indisponibilità	jet-fire	5,76 E-13	3,1 E-11	1,52 E-12
valvole pneumatiche	UVCE	4,48 E-13	9,5 E-12	2,86 E-12
EIR2 rott. 100 % indisponibilità valvole pneumatiche	jet-fire	2,11 E-12	4,47 E-11	4,32 E-12
	UVCE	1,57 E-12	9,8 E-12	8,23 E-12

Tabella 6. Valori di rischio collettivo.

I valori di rischio ottenuti sono riferiti indiscriminatamente all'intera collettività, cioè alla popolazione della città di Torino; a questo *rischio collettivo* è corretto accostare il *rischio individuale* a cui è soggetto ogni abitante della città, ricavato dal precedente dividendo il dato ottenuto per il numero di persone che effettivamente possono essere interessate dal fenomeno nel momento in cui si verifica. Si ottengono così valori di tre o quattro ordini di grandezza inferiori rispetto ai rispettivi rischi collettivi.

Confrontando i valori numerici di rischio individuale e collettivo ricavati con opportuni valori di soglia, si è potuto procedere alla valutazione dei valori di rischio calcolati. Nel caso più sfavorevole, si sono ottenuti i risultati della seguente tabella.

	Valore ottenuto	Valore accettabile
Rischio individuale [morti/anno·persona]	$1,35 \cdot 10^{-9}$	$8,8 \cdot 10^{-5}$
Rischio collettivo [morti/anno]	$2,26 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$

Tabella 7. Acc	ettabilità d	lel rischio.
----------------	--------------	--------------

5. CONCLUSIONI

Alla luce dei risultati ottenuti, si può concludere che il veicolo sarà messo su strada in condizioni di sicurezza; infatti anche nei casi studiati più sfavorevoli, si è dimostrato che il valore di rischio collettivo è sempre inferiore al valore di rischio accettabile. E' stato possibile verificare che il mezzo viaggerà in condizioni sicure anche in zone del tracciato più critiche a causa di una maggiore presenza di persone, quali l'area del mercato.

L'aggravio di rischio nei momenti di sosta del mezzo alle fermate è trascurabile rispetto alle condizioni di sicurezza verificate per il caso di veicolo in marcia.

L'analisi di rischio condotta sul mezzo permette di proporre suggerimenti per diminuire il già basso valore di rischio riscontrato: si propone l'introduzione di un sistema di valvole pneumatiche posizionate su ogni linea che collega la bombola al collettore principale, valvole collegate al sensore di idrogeno ubicato nella zona del tetto; in questo modo il sensore può avere un ruolo attivo nella sicurezza del mezzo e delle persone, invece di essere un semplice indicatore di cattivo funzionamento del sistema. Analizzando i risultati ottenuti si è osservato come il rischio decresca, in misura tanto maggiore quanto più affidabile è il sensore stesso e quanto più disponibile è la fornitura di energia elettrica da parte della batteria. Altre migliorie tecniche possono essere proposte in base ai risultati dell'analisi effettuata:

- l'accumulo di gas in corrispondenza delle linee ad alta pressione presenti nell'area del tetto può provocare una sovrapressione indesiderata; si suggerisce l'adozione di una valvola di sicurezza nell'area considerata, che possa permettere lo sfogo di questa pressione in eccesso prevenendo le perdite di idrogeno;
- nel sistema che veicola l'idrogeno verso la fuel cell si potrebbe procedere alla sostituzione dei due componenti passivi di riduzione della pressione con un'unica valvola, in modo tale da ridurre la possibilità che questa operazione non avvenga correttamente a causa di malfunzionamenti.

L'analisi eseguita ha soddisfatto l'esigenza di definire una stima di massima del rischio e verificarne l'accettabilità; rappresentando tuttavia unicamente uno studio preliminare, è possibile individuare alcune carenze dell'analisi, che possono indirizzare lavori futuri:

- si è considerata unicamente la fase di esercizio del veicolo, tralasciando quindi le problematiche di sicurezza relative alla gestione e manutenzione del mezzo in deposito;
- non essendo reperibili informazioni dettagliate sulla fuel cell, questa è stata considerata in tutta l'analisi
 come una "scatola nera" e non è stato possibile pertanto approfondire eventuali malfunzionamenti ad
 essa connessi. Si può tuttavia ritenere che gli eventi incidentali più gravosi relativi al bus interessino il
 sistema di alimentazione della cella, che lavora con idrogeno a pressioni elevate, piuttosto che la cella
 stessa, dove l'idrogeno presenta una pressione di pochi bar;
- le simulazioni dei fenomeni incidentali sono state realizzate facendo ricorso a modelli semplificati: in considerazione della complessità del contesto in cui si trova ad operare il mezzo sarebbe auspicabile l'utilizzo di modelli più accurati, quali modelli CFD e 3D;
- non è stata approfondita la possibilità di effetti domino che potrebbero verificarsi ad esempio a seguito del coinvolgimento negli eventi incidentali esaminati di uno dei distributori di benzina presenti nei pressi del percorso seguito dal bus; l'eventualità che si verifichi un tale coinvolgimento tuttavia può essere considerata piuttosto remota.

BIBLIOGRAFIA

- [1] D. Gatto, Uso dell'idrogeno come propellente di un autobus urbano: valutazione del rischio, Tesi di Laurea, Politecnico di Torino (2002)
- F. P. Lees, *Loss Prevention in the Process Industries*, Butterworths, Londra (1983) [2]

- 3rd EGIG-Report 1970-1997, *Gas Pipeline incidents*, Doc. number: EGIG98.R.0120 (1998) OREDA Participants, Offshore Reliability Data Handbook, Veritec, Hovik (Norvegia) (1992) TNO, Methods for the calculation of physical effects (Libro Giallo TNO), Voorburg (Olanda) [3] [4] [5] (1998)