

Progettazione preliminare e analisi dei rischi associati alla diffusione delle tecnologie a celle a combustibile nel settore dei trasporti, finalizzati allo sviluppo di una Hydrogen Valley

F. Ciancetta¹, S. Mari¹, G. D'Ovidio², R. Iovene³, R. Vasile³

¹Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia, Università degli Studi dell'Aquila

² Centro Interdipartimentale Trasporti e Mobilità Sostenibile, Università degli Studi dell'Aquila

³ Inail - Uot di Pescara

Abstract

Il settore dei trasporti rappresenta un terzo di tutto il consumo finale di energia nell'UE ed è responsabile di oltre un quarto delle emissioni totali di gas effetto serra, il che lo rende uno dei principali responsabili del cambiamento climatico. Ridurre gli effetti negativi dei trasporti è un obiettivo strategico dell'UE, che ha messo in atto una serie di azioni per promuovere modalità di trasporto più pulite ed efficienti. Lo sviluppo di soluzioni di trasporto collettivo a zero emissioni implica l'uso di nuovi sistemi di propulsione in grado di utilizzare vettori energetici prodotti da fonti energetiche rinnovabili.

Il lavoro si occupa della progettazione preliminare, dell'analisi delle prestazioni e dell'analisi dei rischi connessi all'utilizzo dell'idrogeno, di un autobus passeggeri ibrido a idrogeno da utilizzare in un'area montuosa per lo sviluppo di una Hydrogen Valley.

In particolare, è stata simulata una configurazione di minibus che effettua un percorso di andata e ritorno in base alle reali condizioni del traffico, sono stati dimensionati i principali componenti del sistema di trazione, sono stati analizzati i rischi legati al sistema di accumulo a bordo del veicolo e le relative misure da adottare al fine del contenimento degli stessi. Lo studio, parte di un progetto più ampio cofinanziato dall'Unione Europea, intende porre le basi per lo sviluppo di una Hydrogen Valley, sito integrato di produzione, stoccaggio e utilizzo dell'idrogeno, per il trasporto pubblico ad idrogeno nell'area montana dell'Altopiano delle Rocche nella regione Abruzzo.

Keywords: Trasporto pubblico, Hydrogen Valley, Fonti rinnovabili

1. Introduzione

Le politiche dell'UE sulla transizione energetica e lo sviluppo sostenibile, volte a mitigare il riscaldamento globale, prevedono una drastica riduzione del 90% delle

emissioni dirette di gas serra (GHG) nel settore dei trasporti entro il 2050, rispetto ai livelli del 1990, come indicato nel Green Deal europeo [1]. Per raggiungere tali obiettivi, è fondamentale limitare l'impatto ambientale per unità di servizio di trasporto soddisfatta, il che può essere ottenuto attraverso il passaggio a modalità di trasporto più sostenibili e l'impiego di soluzioni tecnologiche che aumentino l'efficienza dei veicoli, riducendo le emissioni di GHG per unità di energia [2]. Le tecnologie a celle a combustibile ad idrogeno (HFC) sono state identificate come una soluzione interessante in quanto consentono non solo di ridurre il consumo energetico, ma anche di ridurre l'utilizzo di combustibili fossili a favore di fonti rinnovabili nazionali [3],[4]. Tuttavia, l'adozione diffusa delle tecnologie a celle a combustibile presenta ancora diverse sfide economiche e ambientali. Tra queste vi sono l'assenza di una rete di distribuzione e rifornimento di idrogeno, i costi elevati di acquisto, il livello di maturità tecnologica ancora limitato e l'elevato costo del vettore idrogeno, dovuto alla sua domanda limitata [5]. Questi ostacoli rappresentano dei rischi significativi per la diffusione su larga scala delle tecnologie a celle a combustibile nel settore dei trasporti. Ad esempio, il costo e la complessità dell'installazione di una rete di distribuzione di idrogeno rappresentano una sfida economica significativa. Inoltre, l'alto costo di acquisto dei veicoli a celle a combustibile può limitarne l'adozione da parte degli operatori di trasporto. Il livello di maturità tecnologica delle celle a combustibile e la loro affidabilità operativa potrebbero rappresentare un ulteriore rischio per l'efficienza e la sicurezza dei veicoli. Infine, l'accessibilità a fonti di energia rinnovabile per la produzione di idrogeno può rappresentare una limitazione per la sostenibilità complessiva del sistema. In questo contesto, il presente lavoro si propone di affrontare i rischi associati alla diffusione delle tecnologie a celle a combustibile nel settore dei trasporti, attraverso l'implementazione di un modello di simulazione adeguatamente sviluppato e testato in condizioni di guida reale. Questo permetterà di valutare la fattibilità delle soluzioni tecnologiche proposte, considerando le specifiche condizioni operative e i profili di missione richiesti per i veicoli. L'analisi dei rischi consentirà di identificare le principali criticità e di adottare misure adeguate per mitigare gli effetti negativi potenziali.

2. Approccio metodologico

L'approccio metodologico comprende i seguenti passaggi: i) costruzione del modello del veicolo; ii) identificazione del percorso e della tipologia dell'autobus di trasporto pubblico; iii) acquisizione delle caratteristiche topografiche del percorso e del profilo cinematico in condizioni di traffico reale; iv) simulazione dell'operazione dell'autobus sul percorso scelto; v) definizione delle caratteristiche del gruppo motopropulsore e vi) analisi del consumo.

2.1 Architettura del veicolo

L'architettura del veicolo è stata sviluppata con l'obiettivo di progettare un gruppo motopropulsore in grado di operare in un ambiente montano caratterizzato da pendenze ripide e lunga autonomia giornaliera. Per queste ragioni è stato preso in considerazione un veicolo ibrido a celle a combustibile a idrogeno - batteria. Gli obiettivi principali mirano a: i) aumentare l'efficienza del veicolo mediante un nuovo sistema di propulsione ibrido; ii) evitare la dissipazione di energia; iii) limitare l'installazione di batterie chimiche per la trazione; iv) utilizzare un carburante verde che può essere generato da energie rinnovabili. Uno schema dell'architettura del veicolo è mostrato nella Figura 1. L'impianto motore proposto utilizza un motore di trazione elettrico (EM) alimentato da un gruppo motore ibrido composto da una pila a combustibile a idrogeno (FC) e un sistema di batterie. Il motore di trazione, la pila a combustibile e il sistema di batterie sono collegati al bus di alimentazione CC (linea rossa continua) mediante convertitori: Convertitore del sistema di trasmissione elettrica (CED) e Sistema di gestione della batteria (BMS). Per gestire i flussi di potenza richiesti, un sistema di controllo principale (CS) comunica con il sistema di controllo della pila a combustibile (CFC) e il controllo di guida (DC) tramite un bus di comunicazione (linea verde).



Figura 1. Schema del bus a zero emissioni

2.2 Modello dinamico del veicolo

Il modello dinamico dell'autobus a celle a combustibile è stato sviluppato per valutare le prestazioni del veicolo e dei suoi componenti durante il movimento sul percorso esaminato. Di seguito, il modello matematico è descritto solo brevemente e ulteriori dettagli possono essere reperiti nei documenti [7] e [8] citati in bibliografia. Sulla base del profilo cinematico della missione e dei parametri del veicolo, è stato calcolato il requisito di potenza di trazione a partire dall'equazione differenziale del moto, suddividendo le forze esterne in trazione, $T(v(t))$, e somma delle resistenze al movimento del veicolo, $\Sigma R(v(t))$. Quest'ultima può essere espressa come somma delle resistenze al rotolamento, R_w , della pendenza, R_s , e dell'aria, R_A . Da cui la trazione è:

$$T(v(t)) = m\alpha \frac{dv}{dt} - [R_w(v(t)) + R_s(\beta) + R_A(v(t))] \quad (1)$$

dove m è la massa lorda del veicolo, α è il coefficiente di massa inerziale rotazionale, v è la velocità del veicolo e β è l'angolo della pendenza della strada.

La potenza di trazione elettrica, P_{el} , è stata calcolata considerando anche il recupero di energia in frenata elettrica, come segue:

$$P_{el} = T(v(t))v(t)/(\eta_t \eta_D) \text{ for } T(v(t))v(t) > 0 \quad (2)$$

$$P_{el} = T(v(t))v(t)(\eta_t \eta_D) \text{ for } T(v(t))v(t) < 0 \quad (3)$$

con η_t e η_D l'efficienza della trasmissione e del sistema di trazione elettrica (convertitore più motore elettrico). Per simulare correttamente la fase di frenata è stata assunta una distribuzione del peso sugli assi del veicolo. Infine, il modello considera che non viene recuperata energia se lo stato di carica (SOC) della batteria è pieno.

Lo schema dell'implementazione del modello nel software di simulazione mostrato nella Figura 2 (a) è stato realizzato con MATLAB. Il modello calcola i flussi di potenza e il consumo di energia (sistemi di trazione e ausiliari) a partire dalla definizione degli input relativi ai seguenti tre blocchi:

- "Vehicle features" che riguarda le caratteristiche del veicolo;
- "Road characteristics" che riguarda la topografia del percorso e le caratteristiche della superficie stradale;
- "Drive cycle" che descrive il profilo di guida specificando la velocità in funzione del tempo.

Il blocco "Traction power" calcola la potenza meccanica necessaria per percorrere il percorso di input con il veicolo selezionato al profilo di velocità specificato.

Il blocco "Electric Drivetrain" calcola la potenza elettrica necessaria per la trazione, tenendo conto delle perdite energetiche del cambio, del motore elettrico e del convertitore di potenza. Il calcolo delle perdite di trasmissione è basato su tabelle di ricerca validate mediante dati sperimentali e letteratura. Il modello consente di calcolare l'energia totale richiesta e il consumo di idrogeno nel percorso dato con il ciclo di guida previsto.

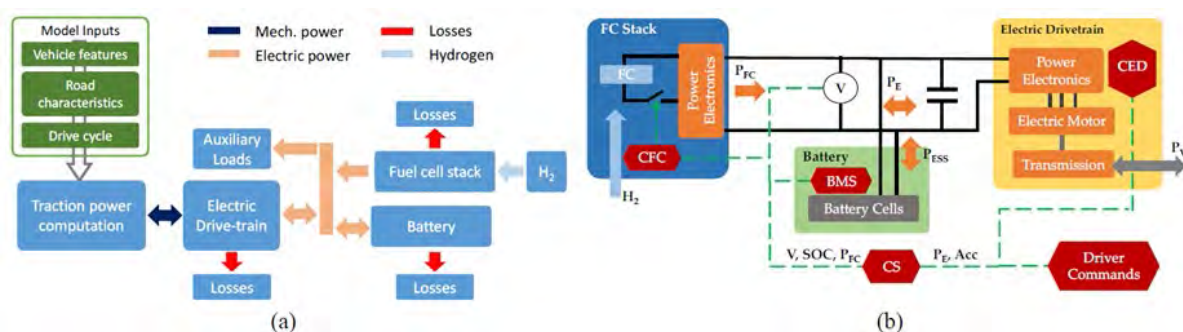


Figura 2. (a) Schema del simulatore del veicolo (a sinistra); (b) schema a blocchi del sistema di alimentazione elettrica (a destra)

2.3 Sistema di alimentazione elettrica e strategia di controllo

Il diagramma a blocchi del sistema di alimentazione elettrica previsto è mostrato nella Figura 2 (b), dove sono dettagliate le linee di alimentazione e di controllo. Si basa su uno stack di celle a combustibile controllato dal suo controller (CFC) e dotato di un convertitore DC/DC per garantire il corretto trasferimento di energia dalla pila

a combustibile al bus DC. Il sistema di accumulo di energia (ESS), configurato come una batteria al litio-ion, è direttamente collegato al bus DC e gestito dal sistema di gestione della batteria (BMS). Il motore elettrico di trazione, la trasmissione a singola marcia del veicolo e l'elettronica di potenza correlata sono indicati come sistema di trasmissione elettrica e sono gestiti dal controller del sistema di trasmissione elettrica (CED). Il sistema di trasmissione elettrica è direttamente collegato al bus DC tramite un condensatore di massa. In termini di potenza, la configurazione proposta richiede che la batteria sia dimensionata per fornire la potenza di picco del sistema di trasmissione elettrica, mentre la pila a combustibile è concepita come un estensore di autonomia e viene gestita per lavorare a un livello di potenza fisso in cui si raggiunge l'efficienza massima. A tal fine, il BMS monitora la tensione del bus DC e scambia il suo livello con gli altri controller tramite il bus di comunicazione insieme allo stato di carica della batteria (State of Charge - SOC). Quando il SOC scende al di sotto di una soglia adeguata, il sistema di controllo principale (CS) richiede che la pila a combustibile venga attivata e inietti potenza nel bus DC per evitare che la batteria si scarichi completamente. A seconda della pendenza della strada e della dinamica del veicolo, l'energia fornita dalla pila a combustibile viene utilizzata direttamente dal sistema di trasmissione elettrica o per ricaricare la batteria.

3. Caso studio

Come caso studio è stata selezionata un'area italiana di elevato valore ambientale situata nel Parco Nazionale d'Abruzzo, Lazio e Molise. Durante l'analisi dei rischi, è fondamentale identificare e mitigare le potenziali problematiche legate alla progettazione e all'utilizzo di un veicolo ibrido a zero emissioni in quest'area.

3.1 Descrizione del veicolo

Il veicolo ibrido a zero emissioni selezionato per il caso di studio è differenziato da una massa aumentata di circa 1000 kg rispetto a un equivalente veicolo diesel. Le caratteristiche del veicolo sono riportate in Tabella 1.

<i>Parametri</i>	<i>Simboli</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Valori</i>
Lunghezza		m	7.76
Larghezza		m	2.4
Altezza		m	3.05
Passeggeri (posti)			25
Massa del veicolo a pieno carico	m	kg	8700
Sezione frontale		m ²	7.32
Coefficiente aerodinamico	Cx		0.380
Tipo di pneumatici			225/75 R-16

Tabella 1. Principali dati del veicolo utilizzati nelle simulazioni

Per ridurre i rischi associati a una maggiore massa, possono essere adottate diverse tecniche di contenimento dei rischi, tra cui:

- Progettazione del sistema di sospensione e dei freni: Una progettazione attenta e robusta di questi sistemi può contribuire a garantire una buona stabilità del veicolo, consentendo una guida sicura anche su terreni accidentati o con pendenze ripide;
- Utilizzo di tecnologie avanzate per il controllo della trazione e l'assistenza alla frenata: L'implementazione di sistemi come il controllo elettronico della trazione e l'assistenza alla frenata può migliorare ulteriormente la sicurezza di guida, consentendo una migliore gestione della potenza e un controllo più preciso del veicolo in situazioni critiche;
- Gestione sicura delle celle a combustibile e delle batterie: Le celle a combustibile e le batterie sono componenti fondamentali di un veicolo ibrido. Per garantire la sicurezza, è necessario implementare misure come sistemi di monitoraggio avanzati per rilevare tempestivamente anomalie o malfunzionamenti. Inoltre, è importante seguire procedure di manutenzione regolari e formare adeguatamente il personale sulla gestione sicura di queste tecnologie.

3.2 Descrizione del percorso

È stato selezionato un percorso di andata e ritorno (161 km) nell'area extraurbana dell'Aquila Figura 3 (a). Il percorso fa parte dell'attuale linea di autobus regionale che collega le città di Avezzano e L'Aquila.



(a)



(b)

Figura 3. (a) Vista del percorso selezionato per il caso di studio (a sinistra); (b) il kit di valutazione del sistema globale di navigazione satellitare (GNSS) ad alta precisione adottato per il tracciamento del veicolo (a destra)

Per acquisire le caratteristiche topografiche del percorso e il ciclo di guida della missione del veicolo, è stato installato un sistema di misura basato su un sistema di acquisizione con dispositivo GPS su un autobus diesel con caratteristiche prestazionali simili a quelle del progetto. La stazione di misura adotta un u-blox 7 Evaluation Kit con sistema Precise Point Positioning che supporta il modulo NEO-7P.

Il modulo, riportato nella figura 3 (b), è un sistema globale di navigazione satellitare (GNSS) ad alta precisione.

I risultati dell'acquisizione mostrano che: i) l'altitudine massima è compresa tra 600 m e 1500 m s.l.m.; ii) la pendenza massima e media sono rispettivamente del 15% e del 4,5%; iii) la velocità massima e media sono rispettivamente di 20,98 m/s e 9,63 m/s.

4. Risultati sperimentali

La simulazione del veicolo descritto in precedenza è stata eseguita in base ai dati acquisiti relativi al ciclo di guida e al percorso, al fine di dimensionare i componenti della catena cinematica.

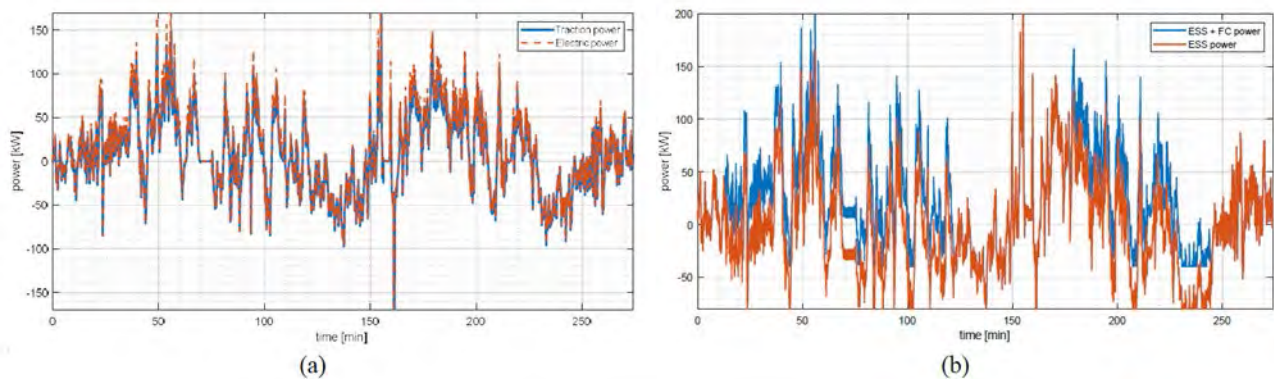


Figura 5. Descrizione del profilo della missione: (a) profili di trazione e potenza elettrica; (b) profili di potenza di ESS e cella a combustibile

Nella Figura 5 (a) sono riportati i profili di trazione e potenza elettrica. La Figura 5 (b) illustra rispettivamente la potenza dell'ESS e l'unità di potenza (potenza dell'ESS e della cella a combustibile). I risultati mostrano che la potenza di picco elettrica è di 160 kW e la potenza di picco dell'ESS è di 200 kW in scarica e 80 kW in carica. Di conseguenza, è stato scelto un motore di trazione con potenza di picco di 150 kW. La Figura 6 (a) mostra come la cella a combustibile e l'ESS gestiscano la richiesta di potenza del veicolo. Si può notare che una potenza della cella a combustibile di 40 kW e un'energia della batteria di 50 kWh sono in grado di fornire la potenza elettrica richiesta evitando condizioni di sovraccarico o sotto-carica della batteria.

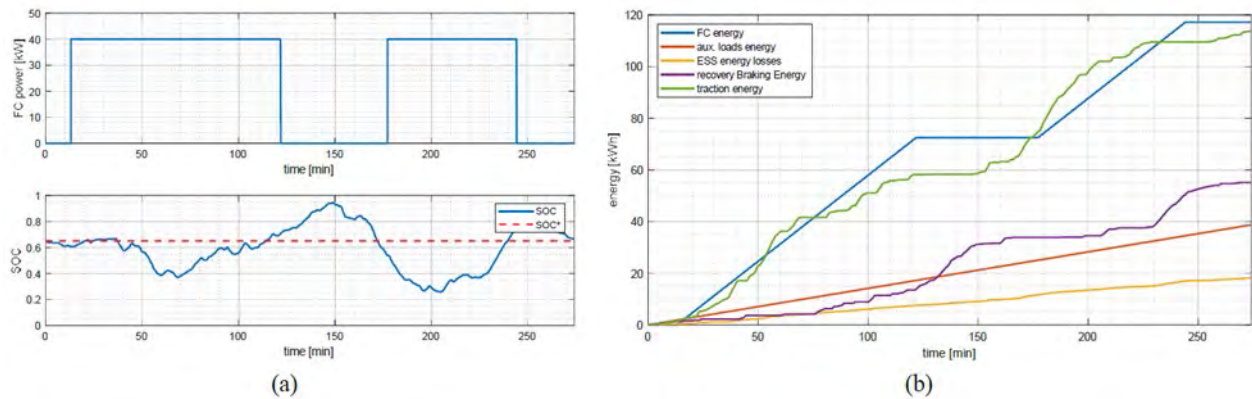


Figura 6. Descrizione del profilo della missione: (a) Potenza richiesta dalla cella a combustibile (in alto) e dall'ESS (in basso). (b) Profilo energetico del componente principale del sistema

I profili energetici dei principali componenti del sistema sono riportati nella Figura 6 (b). Il consumo stimato di H_2 è di 6,4 kg (circa 0,039 kg/km) per il tragitto considerato. Tuttavia, è importante notare che alcuni parametri di incertezza possono influenzare i risultati della simulazione. Tra gli altri, quelli che possono avere la maggiore influenza sono gli errori associati all'accuratezza dei sensori, la possibile perdita del segnale GPS, anche a causa della presenza di lunghi tunnel, e l'effettiva energia elettrica che può essere recuperata sia in discesa che durante il freno rigenerativo nelle fasi di decelerazione. Pertanto, anziché considerare un singolo consumo medio per chilometro, è più appropriato assumere un intervallo di valori che, per lo studio in questione, si situa tra 20/25 km/kg H_2 , con il primo valore il più realistico.

5. Rischi connessi all'utilizzo dell'idrogeno nei sistemi di trazione

L'adozione dell'idrogeno come fonte di energia per autotrazione rappresenta una delle frontiere più promettenti nella ricerca di combustibili puliti ed efficienti. Tuttavia, come per qualsiasi nuova tecnologia, è importante valutare attentamente i rischi associati all'utilizzo dell'idrogeno come fonte energetica. L'idrogeno è l'elemento chimico più leggero. Allo stato legato è presente nell'acqua e in tutti i composti organici e organismi viventi. Allo stato libero è scarsamente presente sulla Terra e deve quindi essere prodotto da altre fonti; rappresenta quindi un vettore di energia, come l'energia elettrica, e non una fonte. Essendo l'elemento più leggero presenta una grossa criticità dovuta al basso contenuto energetico per unità di volume, cosa che ne rende difficile il trasporto e lo stoccaggio. I principali aspetti da considerare sono la sicurezza durante lo stoccaggio, il trasporto e la distribuzione dell'idrogeno. Pertanto è fondamentale garantire l'adeguata progettazione e l'implementazione di sistemi di stoccaggio e di distribuzione sicuri.

5.1 Infiammabilità

L'idrogeno è altamente infiammabile, con un intervallo di infiammabilità molto ampio (limiti di infiammabilità nell'aria dal 4% al 75% in volume). Questo significa che può prendere fuoco a una concentrazione di solo il 4% nell'aria e bruciare con una fiamma molto calda e quasi invisibile, che emette pochissimo calore radiante e, quindi, dà un avvertimento limitato della sua presenza. L'accensione di miscele infiammabili idrogeno-aria avviene con un apporto energetico molto basso, circa un decimo di quello di una miscela benzina-aria, tanto che una scintilla invisibile e/o una carica elettrostatica possono causare un'accensione. Pertanto un'accidentale fuoriuscita di idrogeno durante il rifornimento, la produzione o l'utilizzo dei veicoli può comportare gravi rischi e pertanto sono richieste misure di sicurezza specifiche per prevenire incidenti o esplosioni quali:

- Le stazioni di rifornimento di idrogeno devono essere progettate per prevenire fughe e disperdere rapidamente l'idrogeno in caso di incidente;
- Deve essere prevista l'installazione di sensori di rilevamento dell'idrogeno per monitorare costantemente le concentrazioni nell'aria e attivare gli allarmi in caso di superamento delle soglie di sicurezza;
- Deve essere predisposta una formazione adeguata per gli operatori e gli utenti finali sull'uso sicuro dell'idrogeno, inclusi protocolli di emergenza.

5.2 Stoccaggio

L'idrogeno presenta una scarsa densità energetica volumetrica, 1 kg di H₂ occupa in condizioni normali (1,013 bar e 0°C) un volume di 11212 litri, richiedendo quindi serbatoi di grandi dimensioni per il suo deposito. Aumentare la pressione del gas migliora la densità di energia per unità di volume, ottenendo contenitori meno ingombranti. Le perdite di idrogeno da tubi, recipienti e apparecchiature possono provocare una fiamma a getto se l'idrogeno si accende (ad esempio per attrito o elettricità statica). La lunghezza della fiamma del getto dipende dalla pressione dell'idrogeno e dalle dimensioni della perdita. L'idrogeno richiede quindi condizioni specifiche per essere stoccato in modo sicuro, poiché può esistere come gas compresso o liquido criogenico. La pressurizzazione e il raffreddamento richiedono attrezzature specializzate, che possono essere soggette a guasti o malfunzionamenti, pertanto è necessario:

- L'utilizzo di serbatoi di stoccaggio conformi a standard di sicurezza rigorosi. La soluzione oggi più utilizzata per lo stoccaggio dell'idrogeno a bordo dei veicoli o anche per le stazioni di servizio è costituita da bombole di gas compresso alla pressione di 350 oppure 700 bar, costituite in genere da 3 strati, uno interno polimerico, uno intermedio in fibra di carbonio capace di sopportare elevate trazioni e uno più esterno in acciaio in grado di proteggere il sistema da danni meccanici e corrosivi;
- L'ispezione e la manutenzione regolari con controllo periodico dei serbatoi per rilevare eventuali danni o segni di degrado;

- L'adozione di tecnologie di raffreddamento all'avanguardia per garantire il mantenimento di temperature sicure;
- Il monitoraggio in modo permanente o periodico dei serbatoi a pressione utilizzando rilevatori di atmosfera esplosiva al fine di identificare le perdite prima possibile e intraprendere le azioni correttive necessarie;
- La progettazione delle linee di sfiato dell'idrogeno deve ridurre al minimo il rischio associato alla potenziale accensione (detonazione vs deflagrazione) considerando il rapporto lunghezza/ diametro. Il design meccanico deve essere in grado di resistere all'accensione all'interno della linea di sfiato a meno che l'accensione all'interno dello sfiato non sia impedita, ad esempio, mediante uno spurgo di azoto o un dispositivo antifiamma.
- I flussi dagli sfiati e dalle apparecchiature di sicurezza devono essere convogliati in un luogo sicuro dove non generano un pericolo per le persone o le strutture vicine, lontano da aree del personale, linee elettriche e altre fonti di accensione, prese d'aria, aperture di edifici e sporgenze. Le leghe di rame o l'acciaio inossidabile sono materiali preferiti per ridurre al minimo la possibilità di accensione dovuta alle particelle di corrosione atmosferica.

5.3 Produzione e Distribuzione

La produzione di idrogeno richiede attenzione ai dettagli per evitare impatti ambientali negativi, mentre la distribuzione richiede una rete di infrastrutture ben pianificata. È quindi necessario:

- L'utilizzo di metodi sostenibili, come l'elettrolisi dell'acqua tramite energia rinnovabile, per la produzione di idrogeno;
- L'adozione di standard rigorosi per la progettazione e la gestione delle stazioni di rifornimento di idrogeno;
- Laddove sia necessario far passare le condutture dell'idrogeno nello stesso condotto o cavidotto utilizzati per i cavi elettrici, tutti i giunti nelle tubazioni dell'idrogeno nel condotto/ cavidotto devono essere saldati o brasati. Una distanza minima di separazione dai cavi elettrici e da qualsiasi altra tubazione deve essere determinata dalla valutazione dei rischi o da norme/regolamenti locali. La tubazione dell'idrogeno dovrebbe essere collocata a un'altezza maggiore rispetto ad altre condutture;
- La continuità elettrica deve essere mantenuta in tutto il sistema;
- Laddove sono montati manicotti esterni, questi devono essere opportunamente forati per evitare il gonfiaggio;
- Gli strumenti e gli indicatori devono essere progettati e posizionati in modo tale che, in caso di perdita o rottura e possibile incendio successivo, il rischio per il personale sia ridotto al minimo. Si raccomanda l'uso di vetri di sicurezza e sfiato posteriore sui manometri (la cosiddetta costruzione «solid front»).

5.4 Compatibilità dei Materiali

L'idrogeno può causare problemi di compatibilità con alcuni materiali, portando alla fragilità e alla rottura di componenti critici. Si rende quindi indispensabile:

- L'Utilizzo di materiali che resistono alla corrosione e alla diffusione dell'idrogeno. Non devono essere utilizzati tubi e raccordi in ghisa. Si sconsiglia l'uso di qualsiasi ghisa a causa della permeabilità all'idrogeno e della possibilità di porosità nella ghisa;
- Laddove è probabile che l'ammoniaca sia presente come impurità o come contaminante atmosferico, le leghe a base di rame/stagno/zinco non devono essere utilizzate per tubi o raccordi poiché questi materiali sono suscettibili all'attacco dell'ammoniaca. Si dovrebbe anche prendere in considerazione la possibilità che siano presenti altri contaminanti e prendere adeguate precauzioni;
- L'uso di giunti saldati o brasati (la saldatura dolce non è consigliata) è raccomandato ove possibile. Laddove si ritengano necessari giunti fragili (filettati, flangiati, ecc.), questi dovrebbero essere ridotti al minimo poiché sono una potenziale fonte di perdite. Devono essere prese in considerazione le potenziali perdite dalle connessioni dovute alla permeabilità dell'idrogeno a tutte le pressioni;
- Il monitoraggio costante delle prestazioni dei materiali in ambienti ad idrogeno.

5.5 Rischi di utilizzo sui veicoli ad uso civile

L'idrogeno può esser utilizzato sui veicoli essenzialmente in due modi:

- Direttamente come carburante in un motore a combustione interna (HICEV Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicle);
- Nelle celle a combustibile (Fuel Cells) per produrre energia elettrica che poi alimenta il motore elettrico del veicolo (FCEV Fuel cells Electric Vehicle).

La tecnologia Fuel Cells va raccomandata rispetto al motore a combustione interna in quanto più efficiente; tuttavia, l'uso diretto dell'energia elettrica stoccata nelle batterie costituisce un sistema ancora più efficiente in quanto evita le trasformazioni tra i diversi vettori energetici; pertanto, dove possibile, sarebbe raccomandabile usare direttamente l'energia prodotta da fonti rinnovabili nell'auto elettrica, evitando le perdite di energia dovute alle trasformazioni. Sembrerebbe più logico ed efficiente destinare l'uso dell'idrogeno principalmente nel settore heavy duty (Camion, TIR, Autobus, Treni, Navi) dove l'uso delle batterie non sembra proponibile per questioni di dimensioni, autonomia, tempi di ricarica. Pertanto, la scelta ricade sulla tecnologia delle celle a combustibile a idrogeno in quanto il rendimento è circa il doppio di quello di un motore termico. L'utilizzo di tale tecnologia richiede comunque una particolare attenzione alla gestione del gas e ai potenziali rischi ad esso associati. Ciò include la prevenzione delle fughe di idrogeno, la gestione delle pressioni e

l'adozione di misure di sicurezza per garantire il corretto funzionamento del sistema di alimentazione.

Un altro aspetto fondamentale riguarda la formazione e la sensibilizzazione dei conducenti dei veicoli a idrogeno, che devono essere adeguatamente informati sui rischi associati all'utilizzo dell'idrogeno come combustibile e devono seguire le pratiche di sicurezza raccomandate. Ciò include l'addestramento sul corretto utilizzo del sistema di alimentazione, la gestione dei serbatoi di idrogeno e le procedure da seguire in caso di emergenza.

Per quanto concerne il sistema di alimentazione dei veicoli ad uso civile ad idrogeno al fine di garantire la sicurezza nell'utilizzo possono essere adottate diverse misure, tra le quali l'impiego dei seguenti sistemi di controllo:

- **Sensori di rilevamento delle fughe di idrogeno:** I veicoli a idrogeno possono essere dotati di sensori che rilevano la presenza di fughe di idrogeno nel sistema di alimentazione. Questi sensori avvisano il conducente o attivano misure di sicurezza come l'interruzione dell'alimentazione o la chiusura delle valvole di sicurezza. Al giorno d'oggi sensori per applicazioni automotive capaci di rilevare fughe sono difficilmente reperibili in commercio, in quanto tale tecnologia e tale cultura della sicurezza non è ancora consolidata fra i produttori di veicoli ibridi o full electric.
- **Sistema di gestione termica:** Un sistema di gestione termica può essere implementato per controllare e mantenere la temperatura dell'idrogeno nel sistema di alimentazione entro limiti sicuri. Ciò può prevenire situazioni di surriscaldamento o formazione di pressioni elevate che potrebbero causare problemi di sicurezza;
- **Valvole di sicurezza:** Le valvole di sicurezza sono dispositivi di sicurezza che si attivano in caso di pressioni eccessive nel sistema di alimentazione. Queste valvole si aprono automaticamente per rilasciare l'eccesso di idrogeno in caso di situazioni di emergenza o sovrappressione, contribuendo a prevenire incidenti;
- **Sistemi di spegnimento automatico:** In situazioni di emergenza, i veicoli possono essere dotati di sistemi di spegnimento automatico che interrompono l'alimentazione di idrogeno al motore e chiudono le valvole di sicurezza per ridurre il rischio di esplosioni o incendi;
- **Protezione termica:** La protezione termica può essere applicata alle parti sensibili del sistema di alimentazione dell'idrogeno per prevenire danni da temperature elevate o incendi accidentali. Questa protezione deve essere realizzata utilizzando materiali resistenti al calore o sistemi di isolamento termico.

È importante specificare che queste sono solo alcune delle possibili misure di controllo che possono essere adottate per garantire la sicurezza nell'utilizzo dell'idrogeno come combustibile per i veicoli ad uso civile. La scelta dei sistemi di

controllo dipenderà dalle specifiche tecniche del veicolo, dalle normative di sicurezza vigenti e dalle best practice raccomandate.

6. Conclusioni

L'utilizzo dell'idrogeno per autotrazione offre enormi vantaggi in termini di riduzione delle emissioni e sostenibilità, tuttavia, è essenziale comprendere e mitigare i rischi ad esso associati. L'adozione di misure di sicurezza rigorose in ogni fase del ciclo dell'idrogeno insieme a una formazione completa del personale e all'implementazione di tecnologie avanzate, garantirà un utilizzo sicuro e responsabile dell'idrogeno nell'industria automobilistica. In tal modo si potranno affrontare con successo le sfide future e sfruttare appieno il potenziale dell'idrogeno come carburante pulito.

Bibliografia

- [1] EC. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. The European Green Deal COM/2019/640 final. 2019.
- [2] MIM. Cambiamenti climatici, infrastrutture e mobilità. 2022.
- [3] Bucci G., Ciancetta F., Fiorucci E. An automatic test system for the dynamic characterization of PEM fuel cells. Proceedings from the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. 2004. pp. 675–680. <https://doi.org/10.1109/imtc.2004.1351137>
- [4] EC. Sustainable and smart mobility strategy. 2020.
- [5] Ajanovic A., Glatt A., Haas R. Prospects and impediments for hydrogen fuel cell buses. Energy, 235, 121340. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121340>
- [6] Bucci G., Ciancetta F., Fiorucci E., Veglio F. An Experimental Approach to the Modeling of PEM Fuel Cells in Dynamic Conditions. Proceedings from the IEEE Lausanne Power Tech. 2007. pp. 1094–1099. <https://doi.org/10.1109/PCT.2007.4538468>
- [7] Di Battista D., Villante C., Cipollone R. Optimal Components Design of a Fuel Cell Electric Vehicle. SAE Technical Paper. 2015. <https://doi.org/10.4271/2015-24-2546>
- [8] Villante C. A tool for Well-to-Wheels evaluation of alternative public transport means. Proceedings from EVS28. 2015.