

Servizi ferroviari con treni a idrogeno: vincoli normativi e valutazione di un caso di studio

Hydrogen-powered trains operation: normative constraints and assessment on a cases study

Livia Maria GANDINI ^(*)

Stefano RICCI ^(*)

Francesca VERRASCINA ^(*)

(<https://www.medra.org/servlet/view?lang=it&doi=10.57597/IF.10.2023.ART.1>)

Sommario - L'impiego dell'idrogeno nei sistemi di propulsione ferroviari è molto promettente e ha già trovato applicazioni commerciali di rilievo. Sono tuttavia emerse alcune potenziali barriere all'ulteriore sviluppo e alcuni elementi critici, attualmente allo studio della comunità scientifica, in relazione alla distribuzione e allo stoccaggio dell'idrogeno a bordo dei treni. Stazioni di rifornimento e serbatoi devono soddisfare criteri di sicurezza non ancora consolidati nei regolamenti ferroviari e gestire efficacemente i connessi vincoli temporali. In questo ampio contesto, il presente studio si concentra su due aspetti chiave del problema: 1) l'identificazione dei vincoli normativi esistenti, a vari livelli, nella progettazione di regole di sicurezza sostenibili e armonizzate, basate su sistematiche e robuste analisi del rischio; 2) la valutazione comparativa, per un caso di studio tipico di linea non elettrificata, fra attuale esercizio con trazione diesel e la soluzione con alimentazione a idrogeno, senza investimenti per l'elettrificazione dell'intera linea.

1. Introduzione

Nel 2013, la Commissione Europea ha annunciato una serie di misure per assicurare lo sviluppo e l'impiego di fonti energetiche alternative, che include elettricità, idrogeno, biocombustibili, gas naturale, e gas di petrolio liquefatto [1]. Ciò in vista della richiesta riduzione del 40% delle emissioni di gas serra entro il 2030 (rispetto a quelle del 1990) e dell'obiettivo del 90% di riduzione entro il 2050.

Nel 2021, il pacchetto *Fit for 55* [2], presentato dalla Commissione Europea, mira alla realizzazione degli obiettivi della Legge Europea sul Clima: neutralità climatica entro il 2050 e riduzione del 55% delle emissioni di gas serra entro il 2030, rispetto a quelle del 1990. Esso

Summary - The use of Hydrogen-powered propulsion in railways is very promising and already found relevant commercial applications. Some potential barriers emerged anyway as critical issues addressed by the scientific community, about the Hydrogen distribution and storage onboard. Indeed, Hydrogen Refuelling Stations (HRS) and tankers must fulfil safety criteria not yet consolidated in railway regulations and manage effectively recharging time constraints. In this context, the present study focuses on two key aspects of the problem: 1) the identification of the existing normative constraints, at various levels, in the process to design sustainable and harmonized safety rules based on systematic and robust risk analysis approaches; 2) the comparative assessment of the present diesel-powered operation on a case study not electrified line with the solution of Hydrogen-powered operation, without need of investments on catenary.

1. Introduction

In 2013, the European Commission announced a series of measures aimed at ensuring the development of the use of alternative energy sources, including electricity, Hydrogen, biofuels, natural gas, liquefied petroleum gas [1]. It was in view of required reductions of 40% in greenhouse gas emissions by 2030 (compared to 1990) and the target of a 90% reduction in emissions by 2050.

In 2021, The Fit for 55 [2] package, presented by the European Commission, is aiming to realise the European Climate Law objectives: climate neutrality by 2050 and a 55% reduction of net greenhouse gas (GHG) emissions by 2030, compared with 1990 levels. It consists of 13 inter-linked proposals to revise existing EU climate and energy laws and six proposals for new legislation.

^(*) Sapienza Università di Roma, DICEA.

^(*) Sapienza University of Rome, DICEA, Roma.

consiste di 13 proposte tra loro connesse per rivedere le leggi sul clima e l'energia esistenti e 6 nuove proposte legislative.

Nonostante l'inclusione del settore ferroviario nel pacchetto non sia esplicito, nel quadro delle nuove soluzioni applicabili ai sistemi di trasporto l'uso della trazione alimentata a idrogeno si presenta come un'alternativa attraente per le linee non elettrificate.

Uno specifico e riconosciuto vantaggio del treno come candidato naturale all'uso di questa tecnologia è lo spazio disponibile a bordo, maggiore di quello disponibile sul veicolo stradale, e l'esercizio di flotte su base territoriale e spesso con orari regolari e sotto la responsabilità di singoli operatori.

Inoltre, l'idrogeno non richiede la costruzione di costose infrastrutture elettriche diffuse, concentrando gli investimenti principalmente sul materiale rotabile e sugli impianti di stoccaggio dell'idrogeno per raggiungere prestazioni comparabili in termini di emissioni gassose e di rumore.

Il Coradia iLint, in esercizio in Germania dal 2018, è stato il primo treno in esercizio, equipaggiato con celle a combustibile idrogeno, che producono potenza elettrica per la trazione. Tale treno emette bassi livelli di rumore e solo vapore e acqua condensata come gas di scarico, con una distanza operativa dichiarata di circa 1000 km.

Il treno è anche equipaggiato con batterie per l'accumulo dell'energia recuperata durante la frenatura utilizzabile durante l'accelerazione. Oltre alla Germania, nazioni che stanno testando l'uso di treni a idrogeno o programmano di farlo a breve sono Austria, Canada, Danimarca, Francia, Norvegia, Spagna, Regno Unito e Stati Uniti d'America.

I treni alimentati a idrogeno Hydroflex sono in fase di test nel Regno Unito dal 2019, nell'ambito del piano nazionale per l'eliminazione della trazione diesel entro il 2040. Inoltre, la St. Andrew University in Scozia ha avviato un progetto per la conversione a idrogeno di un treno di tre unità nell'ambito del progetto nazionale *Zero Emission Train* in collaborazione con imprese scozzesi pubbliche e private. L'obiettivo di decarbonizzazione delle Ferrovie scozzesi è attualmente uno dei più ambiziosi: il governo scozzese spera di eliminare le emissioni dovute al trasporto passeggeri entro il 2035.

2. Quadro normativo ed efficienza energetica

Il fine è quello di identificare i vincoli normativi esistenti, a vari livelli, per la redazione di linee guida per la progettazione di regolamenti di sicurezza sostenibili e armonizzati per i sistemi di trasporto a guida vincolata alimentati a idrogeno.

Lo studio vuole fornire il necessario supporto metodologico per mettere a punto un chiaro quadro normativo da applicarsi all'introduzione delle tecnologie basate sull'idrogeno al campo ferroviario e delineare valutazioni e

Despite the involvement of railway sector in the package is not explicit, in the framework of new solutions applicable to transport systems, the use of Hydrogen-powered traction promises to be anyway an attractive alternative on not electrified lines.

A specific recognized advantage of the train as a natural candidate for the use of these technology, is the space available on board, larger than in road vehicles, and the operation of fleets on a territorial basis and often with regular scheduling under the responsibility of single operators.

Moreover, Hydrogen does not require the construction of an expensive diffused electrical infrastructure, concentrating the investments mainly on rolling stock and localised Hydrogen storage facilities to achieve comparable performance in terms of gaseous and noise emissions.

The Coradia iLint, in operation in Germany since 2018, was the first Hydrogen-powered train in operation, equipped with Hydrogen fuel cells, which produce electrical power for traction. This train emits low levels of noise and only steam and condensed water as exhaust gases, with a declared range of about 1000 km.

This train is also equipped with batteries for the accumulation of energy recovered during braking and usable during acceleration. Beyond Germany, countries that are testing Hydrogen trains or planning to do so soon are Austria, Canada, Denmark, France, Norway, Spain, UK and USA.

Hydrogen-powered Hydroflex trains are under tests in the UK since 2019, as part of the national plan to eliminate diesel traction by 2040. Furthermore, St. Andrew University in Scotland has started a project to convert a train consisting of three coaches into Hydrogen as part of the Zero Emission Train project in collaboration with Scottish public and private enterprises. The decarbonisation goal of Scotland's railways is currently one of the most ambitious: the Scottish government hopes to eliminate pollutant emissions related to passenger transport by 2035.

2. Normative framework and energy efficiency

The focus is here the identification of the existing normative constraints, at various levels, in the process to produce guidelines for the design of sustainable and harmonized safety rules for Hydrogen-powered rail-based transport systems.

The purpose of the study is to provide the necessary methodological support to identify a clear regulatory framework applicable to the introduction of Hydrogen technology in the railway field and to depict the risk analyses and assessments aimed at supporting the guidelines for the design of sustainable and harmonized safety rules based on them.

Already the Directive 2009/28/EC [3] established a common framework for the promotion of energy from renewable sources. It set mandatory national general targets for the overall share of energy from these sources in gross final energy consumption and for the share of energy from renew-

SCIENZA E TECNICA

analisi del rischio necessarie a supportare la redazione delle suddette linee guida sulla base di un approccio robusto e sistematico basato su di esse.

Già la Direttiva 2009/28/EC [3] fissava una cornice comune per la promozione dell'energia da fonti rinnovabili. Essa rimandava a obiettivi nazionali obbligati per la quantità globale di energia consumata globalmente e per i sistemi di trasporto prodotte da queste fonti e l'obbligo legale di raggiungere il 10% (in termini di contenuto energetico) per i sistemi di trasporto entro il 2020. Inoltre, definiva ruolo e obiettivi da garantirsi sull'origine di elettricità, calore e raffreddamento prodotti da fonti energetiche rinnovabili.

Più recentemente, la Direttiva per le iniziative sui combustibili alternativi (DAFI) del Parlamento Europeo e del Consiglio [4] sulla costruzione di infrastrutture necessarie a tali combustibili (incluso l'idrogeno), fissa un quadro comune di misure e requisiti minimi per ridurre la dipendenza dagli oli combustibili e mitigare l'impatto ambientale dei sistemi di trasporto.

La trasposizione di questa Direttiva è stata decisiva per l'apertura verso il trasporto dell'idrogeno, come una specifica tecnica comune per i punti di stoccaggio e rifornimento e i requisiti informativi per gli utenti.

Inoltre, un insieme di standard internazionali ISO è in vigore per regolare la produzione dell'idrogeno e il suo impiego nei sistemi di trasporto (Fig. 1), sebbene specifici riferimenti alle applicazioni ferroviarie non siano disponibili.

L'uso dell'idrogeno nel settore del trasporto ferroviario richiede un'accurata analisi dei contenuti energetici assicurati da questa soluzione nelle varie declinazioni di pro-

able sources in transport, as well as a legally binding target of 10% (energy content) for renewable energy in transport in 2020. Furthermore, it defines the role and scope of guarantees of origin of electricity, heat and cooling produced from renewable energy sources.

More recently, the Directive for Alternative Fuels Initiative (DAFI) of the European Parliament and of the Council [4] on the construction of the infrastructures for alternative fuels (including Hydrogen), establishes a common framework of measures and minimum requirements to reduce the dependence on oil and mitigate the environmental impact of transport.

The transposition of this Directive was decisive for an opening towards Hydrogen transport, such as a common technical specification for storage and refuelling points and information requirements for users.

Moreover, a set of ISO international standards is in place to regulate the Hydrogen production and use in transport systems applications (Fig. 1), though specific references to railway applications are not available.

The use of Hydrogen in the rail transport sector requires a careful analysis of the energy contents ensured by this solution in the various declinations of production and storage of the Hydrogen itself. The key indicator is thereby the Well-To-Wheels (WTW), capable to assess the whole Life Cycle of fuels, from the extraction of raw materials to their use. It is normally considered a first component, from Well-To-Tank (WTT), including the fuel production (normally expressed as the no-dimensional ratio between the amount of energy required to produce a MJ and the amount of energy itself available at the tank), and a second Tank-To-Wheels (TTW)

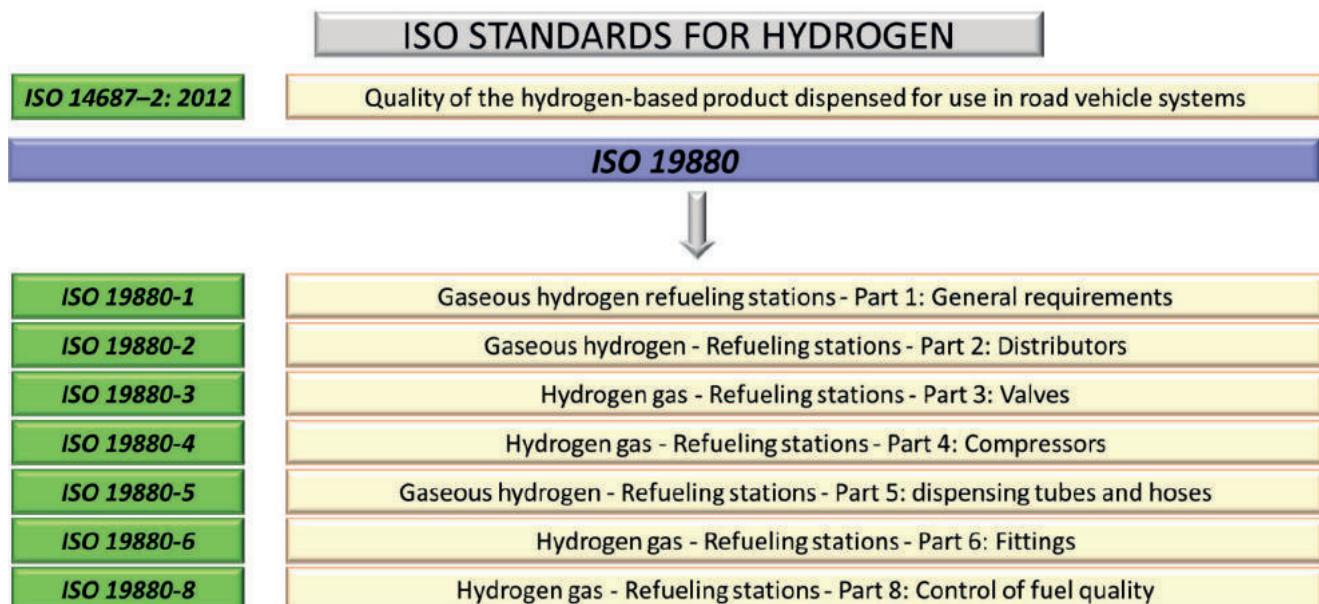


Figura 1 – Standard ISO per la produzione l'impiego dell'idrogeno nei sistemi di trasporto.

Figure 1 – ISO standards on production and use of Hydrogen in transport systems.

duzione e stoccaggio dell'idrogeno stesso. L'indicatore chiave per questo è il cosiddetto Well-To-Wheels (WTW), cioè dal pozzo alle ruote, che consente di valutare l'intero ciclo di vita dei combustibili, dall'estrazione dei materiali grezzi al loro utilizzo. Si considera normalmente come primo indicatore il Well-To-Tank (WTT), cioè dal pozzo al serbatoio, che include la produzione del combustibile (normalmente espresso come rapporto adimensionale fra la quantità di energia necessaria a produrre 1 MJ e la quantità dell'energia stessa disponibile al serbatoio), e come secondo indicatore il Tank-To-Wheels (TTW), cioè dal serbatoio alle ruote, che include l'impiego del combustibile (normalmente espresso come la quantità di energia necessaria a porre in movimento un veicolo lungo una certa distanza, anche in funzione del sistema di propulsione impiegato). Il WTW è largamente impiegato nel settore automobilistico ma più raramente in quello ferroviario.

In [5] vengono riportati i valori di WTT per vari combustibili potenzialmente impiegabili in campo ferroviario, incluso il diesel (1,16) e l'idrogeno prodotto da gas naturale (1,82), elettrolisi da energia elettrica di produzione eolica (1,74) e sulla base del mix produttivo medio dell'UE (4,58).

Allo stesso tempo, valori del TTW (0.104-0.148 MJ/t km) sono stati calcolati per diverse tipologie di treni ad alta velocità (AVE, ICE e TGV), mentre i valori del WTW per la trazione elettrica dei medesimi treni sono rispettivamente variabili fra 0,005-0,007 MJ/km (elettricità di produzione eolica) e 0,368-0,522 (elettricità da mix produttivo medio dell'UE).

Le differenze fra i vari processi per rendere l'idrogeno disponibile all'impiego a bordo dei treni emergono chiaramente, in termini di ciclo di vita e, conseguentemente, di prestazioni energetiche, ambientali ed economiche, e sono sinteticamente rappresentate dal codice cromatico di Fig. 2.

component, including the use of fuel (normally expressed as the energy required to move a vehicle along a certain distance, also depending on its propulsion system). The WTW is largely employed in automotive sector but more rarely employed in rail sector.

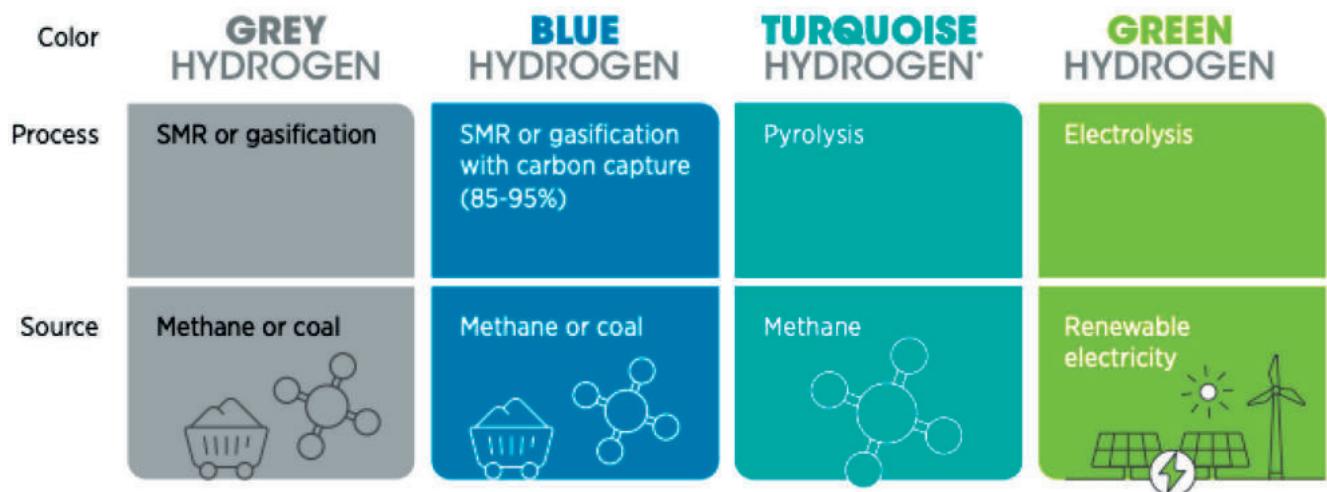
In [5] were reported WTT values for various potentially railway relevant fuels, including diesel (1.16) and Hydrogen produced from natural gas (1.82), electrolysis by Eolic-produced energy (1.74) and by average EU production mix (4.58).

Meanwhile, values of TTW (0.104-0.148 MJ/t km) are calculated for various high-speed trains (AVE, ICE and TGV) and the values of WTW for the electric traction of the same trains are respectively variable between 0.005-0.007 MJ/km (Eolic produced electricity) and 0.368-0.522 (electricity produced by average EU mix).

The differences among the various processes to make the Hydrogen available for the use onboard trains are clearly emerging, in terms of lifecycle and, correspondingly, in terms of energetic, environmental and economic performances, and are synthetically represented by the color-codes in Fig. 2.

In the present situation, the commercial cost of the Green Hydrogen is still higher than others. Therefore, the following economic evaluations will be considering this option as a prudential worst case to check the economic rentability of the Hydrogen-based solutions, beyond its evident environmental friendliness.

In a longer-time perspective, the European Hydrogen production and use could increase dramatically, with the transport sector estimated to account for more than 50% of global potential Hydrogen demand (about 50 Mt by 2050) [6]. A mix of production, though with increasing role for renewable electricity, is expected to cover the expected huge



(Fonte – Source: World Economic Forum)

Figura 2 – Codifica cromatica dei processi di produzione dell'idrogeno.

Figure 2 – Hydrogen production processes codification by colors.

Nella situazione attuale, il costo commerciale dell'idrogeno *Green* è ancora più alto degli altri. Pertanto, le valutazioni economiche che seguono considerano questa opzione come un *worst case* prudenziale per stimare la fattibilità economica delle soluzioni basate sull'idrogeno, al di là della sua evidente valenza dal punto di vista ambientale.

In una prospettiva di più lungo termine, la produzione e l'impiego dell'idrogeno in Europa potrebbero accrescere notevolmente, con il settore trasporti che si stima possa ammontare al 50% della domanda potenziale globale di idrogeno (circa 50 Mt entro il 2050) [6]. Nonostante il ruolo crescente dell'elettricità da fonti rinnovabili, il notevole fabbisogno si prevede possa essere coperto con un mix di processi produttivi. Pertanto, quantità di idrogeno *Grey*, *Blue* e *Turquoise* continueranno a coprire una parte del crescente fabbisogno. Infatti, una copertura totale della domanda con idrogeno *Green* nell'UE necessiterebbe di impianti solari ed eolici di 1800-2000 GW di potenza complessiva, tenendo conto che la produzione globale di energia da fonti rinnovabili nel 2019 è stata di 574 GW. In questa situazione, anche l'importazione di idrogeno da fuori dell'UE potrebbe giocare un ruolo significativo.

3. Valutazione dei rischi nell'impiego dell'idrogeno nei sistemi di trasporto

Componenti chiave dello studio sono le celle a combustibile alimentate a idrogeno e, in particolare, veicoli e infrastrutture connesse con l'impiego dell'idrogeno per generare elettricità, sulla base delle sue proprietà chimiche e fisiche. L'impiego diretto dell'idrogeno per alimentare i motori a combustione è un'ulteriore opzione, da investigare per valorizzarne l'efficienza, ma generalmente non considerata dagli operatori come opzione di breve termine a causa della sua complessa compatibilità con i requisiti di sicurezza antincendio.

Indubbiamente l'aspetto più critico per l'impiego dell'idrogeno nei sistemi di trasporto, che è al momento un campo pressoché vergine con limitate esperienze solo nelle applicazioni ai veicoli stradali, consiste nella sua bassa densità, che comporta significative questioni connesse alla sicurezza, in particolare per i sistemi di stoccaggio.

Fra i vari metodi di stoccaggio dell'idrogeno, la tecnica più utilizzata è la compressione. Pertanto, una stazione di rifornimento tipica include varie problematiche di sicurezza connesse con eventuali perdite di idrogeno da vari componenti della struttura.

Si può studiare attraverso valutazioni basate sull'albero degli eventi o altre analisi quantitative dei rischi basate su approfondimenti tecnici e tecniche matematiche utili alla combinazione delle probabilità e delle conseguenze degli incidenti [7].

In questo contesto, esso include la descrizione del sistema e l'identificazione dei pericoli che possono nascere dalle proprietà fisiche delle sostanze e dei materiali, dalla temperatura, dalla pressione e dal processo stesso.

need, regardless of the policy path chosen. Therefore Grey, Blue and Turquoise Hydrogen will continue to cover the increasing needs. A full coverage by Green Hydrogen would require 1800-2000 GW of dedicated solar and wind installed, having in mind that in 2019 the global production power from renewable sources in the EU was 574 GW. In this context, the import of Hydrogen from extra-EU countries could also play a role.

3. Risks assessment for the use of Hydrogen in transport systems

Central component of the present study are Hydrogen-powered fuel cells and, specifically, vehicles and infrastructures related to the use of Hydrogen to generate electricity, basing on its main chemical and physical characteristics. The direct employment of Hydrogen for fuelling internal combustion engines remains an additional option, to be further investigated to valorise its efficiency but, it is generally not considered by rail operators as a short-term option due to its hard compatibility with fire safety requirements.

Indeed, the main criticality found in the use of Hydrogen as a fuel in transport systems, which is presently an almost virgin field, with limited experiences for road vehicles applications only, consists of its low density, which provides with significant safety-related implications, particularly for the storage systems.

Among the various methods for Hydrogen storage, the most used technique is compression. Therefore, a typical refuelling station includes various safety-related aspects due to the risk of Hydrogen leaks from various components of the structure.

It can be typically studied by event-tree risk assessments or other quantitative risk analyses based on technical investigations and mathematical techniques to combine the estimations of probability and consequences of accidents [7].

In this context, it includes the description of the system and the identification of hazards that may arise from physical properties of substances and materials, temperature, pressure, as well as the processes themselves.

After the identification of hazards, the analysis of possible accidents includes the events that can aggravate the consequences of the accident itself in terms of human injury, environmental damage and loss of production and equipment.

For the identification of probabilities of events, references are reliable data published or estimated basing on recognized mathematical models. Meanwhile, the consequences estimation bases on statistics and simulated evolution of events measured in terms of losses of human lives and monetary cost. The combination of probability and consequences determines the risk.

Despite this systematic approach, the public reactions to accidents are largely basing on the effects of media on the materialization of the population's opinions. Acceptable risk

Dopo l'identificazione dei pericoli, l'analisi di possibili incidenti comprende gli eventi che possono aggravare le sue conseguenze in termini di ferimento di persone, danni ambientali e materiali e perdite di produzione.

Per l'identificazione delle probabilità degli eventi, i riferimenti sono i dati pubblicati o stimati attraverso modelli matematici riconosciuti. Mentre la stima delle conseguenze si basa sulle statistiche e l'evoluzione simulata degli eventi misurata in termini di perdite di vite umane e costi monetari. La combinazione della probabilità e delle conseguenze dell'evento determina il rischio ad esso associato.

Nonostante questo approccio sistematico, le reazioni pubbliche agli incidenti si basano soprattutto sugli effetti dei media nella formazione delle opinioni pubbliche. I livelli accettabili di rischio dipendono essenzialmente da giudizi di valore non standardizzati per definizione.

Ad esempio, gli effetti amplificati dei rari incidenti che coinvolgono treni e aerei superano largamente quelli dei numerosi incidenti che coinvolgono auto e motori, con i quali la popolazione è generalmente più familiare e pronta ad accettarne i molto maggiori rischi in cambio dei benefici apportati dal loro uso quotidiano. Ciò evidenzia una volta in più la necessità di basare il progetto di nuove e robuste normative per l'impiego dell'idrogeno nell'ambiente ferroviario su metodi e procedure rigorosi.

4. Esercizio con alimentazione a idrogeno su linee non elettrificate

Sebbene l'elettrificazione di una linea ferroviaria sia una soluzione ambientalmente auspicabile, è una pratica costosa, che può richiedere 1.0-1.4 MEUR/km, senza considerare le possibili complicazioni locali dovute all'interazione con ambienti urbani o ambientalmente sensibili [8]. Pertanto, una possibile soluzione radicalmente alternativa prevede l'uso di veicoli alimentati a idrogeno.

Pertanto, la seconda parte dello studio si focalizza sull'applicazione a un caso di studio reale: una linea attualmente esercita esclusivamente con treni diesel molto rumorosi e inquinanti.

La linea selezionata come caso di studio per la valutazione del suo esercizio con treni alimentati a idrogeno è la linea Ionica, sita nella regione Calabria nella parte meridionale della penisola italiana e particolarmente la sezione di essa compresa fra Reggio Calabria Centrale e Catanzaro Lido (Fig. 3) per un'estensione complessiva di 177,5 km, non elettrificata con la sola eccezione della sezione suburbana (29,8 km) fra Reggio Calabria Centrale e Melito Porto Salvo.

Lo studio considera come soluzione elettrificata di riferimento il treno Jazz ETR 324 (Fig. 4 e Fig. 5) composto di 4 carrozze, parte della più ampia famiglia dei treni Coradia prodotti da Alstom, le cui caratteristiche principali

levels essentially depend on value judgments, not standardized by default.

As an example, the amplified effects of the rare accidents involving trains or planes largely overpasses those of the many accidents involving cars and motorbikes, with which the population is generally more familiar and ready to accept their much larger risks in change of the benefits brought by their daily use. This highlights once more the need of basing the design of new robust normative for the use of Hydrogen in railway environment on rigorous methods and procedures.

4. Hydrogen-powered operation on not electrified lines

Although electrification of a railway is an environmentally sound solution, it is a very expensive practice, which, could cost in the range 1.0-1.4 MEUR/km, without considering local complications due to the interactions with urban or natural sensible environments [8]. For this reason, a possible radical alternative solution involves the use of Hydrogen-powered vehicles.

Therefore, the second part of the study focuses on a real case study application: a line operated today exclusively by highly noisy and polluting diesel trains.

The selected case study line for the assessment of the operation by Hydrogen-powered trains is the Ionian line, located in the Calabria region, southern part of Italian peninsula, and particularly the section between Reggio Calabria Centrale and Catanzaro Lido (Fig. 3) for a total length of 177.5 km, not-electrified with the only exception of the suburban section (29.8 km) between Reggio Calabria Centrale and Melito Porto Salvo.

The study considers as a reference electrified solution the four-coach train Jazz ETR 324 (Fig. 4 and Fig. 5), part of the wider family of electric trains Coradia by Alstom, whose main characteristics are reported in Tab. 1 and the traction force diagram is represented in Fig. 6.

The aim of the study is to find the power required by this train and the energy needed for the various phases of motion, including 13 stops between Reggio Calabria Centrale and Catanzaro Lido. This is the basis to estimate the approximate need of Hydrogen required for the entire run and the possible economic advantage, in addition to the environmental benefits, of a fuel cell-based operation.

Since the project does not envisage any changes to the infrastructure, the maximum design speed of 130 km/h and the local limits currently imposed on the line are unchanged. The inputs for the calculation model are the traditional ones, namely traction/speed function of the train, Planimetry and profile of the line, affecting the operational performances in addition to the driving style adopted [9][10].

The coastal morphology of the line is quite flat with maximum slope of 10.4‰ (Fig. 7). The case study was



Figura 3 – Rete ferroviaria della regione Calabria con la sezione della linea scelta come caso di studio (evidenziata in verde) da Reggio Calabria Centrale a Catanzaro Lido.

Figure 3 – Railway network of Calabria region, including the case study section (highlighted in green) from Reggio Calabria Centrale to Catanzaro Lido.

sono riportate in Tab. 1 e il cui diagramma della forza di trazione è rappresentato in Fig. 6.

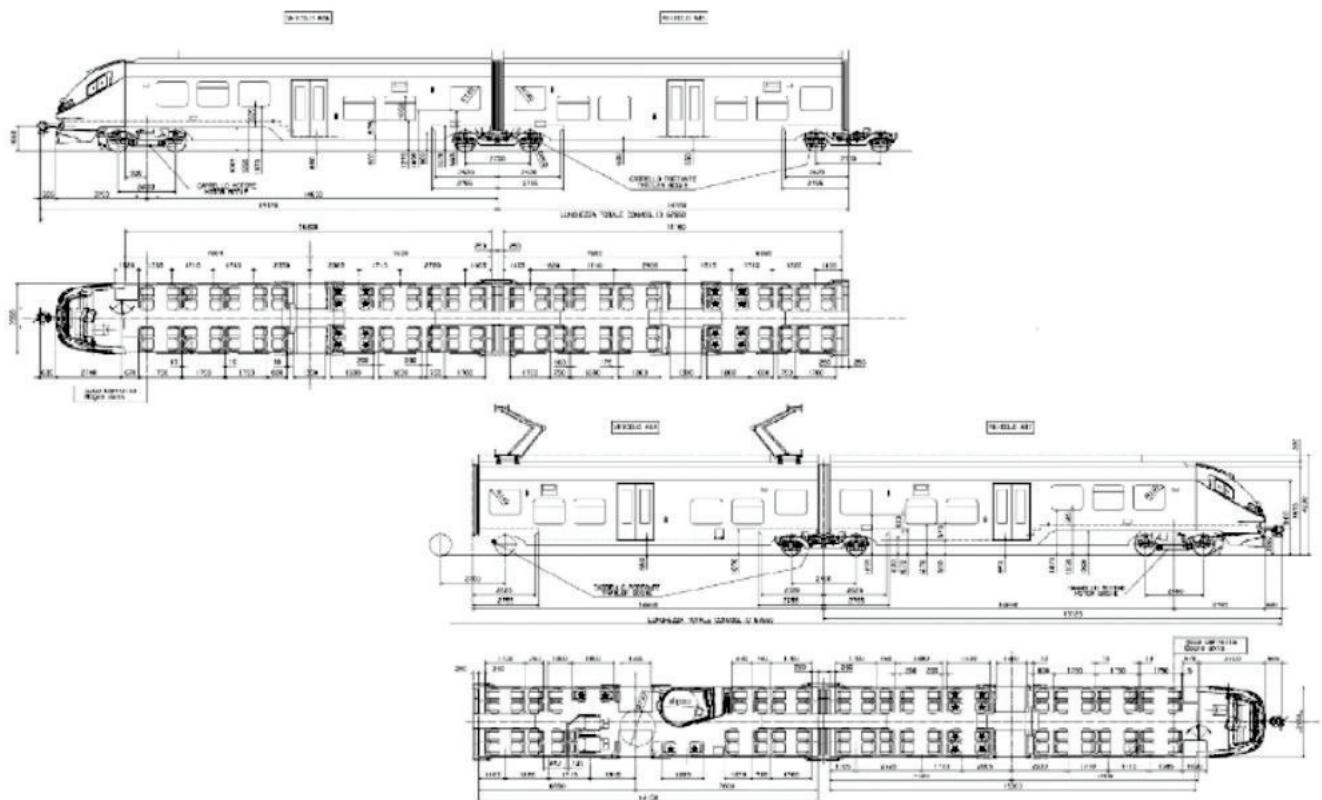
Lo scopo dello studio è la quantificazione della potenza richiesta e dell'energia utilizzata durante le varie fasi del moto, considerando 13 fermate per servizio viaggiatori fra Reggio Calabria Centrale e Catanzaro Lido. Ciò rappresenta la base per stimare il fabbisogno approssimativo di idrogeno richiesto per l'intera corsa e il possibile vantaggio economico ottenibile, in aggiunta ai benefici ambientali, con un esercizio basato su celle a combustibile alimentate a idrogeno.

Poiché il progetto non prevede modifiche infrastrutturali, la velocità



Figura 4 – Treno ETR 324 in esercizio commerciale.

Figure 4 – ETR 324 train in commercial operation.



(Fonte – Source: Trenitalia)

Figura 5 – Layout del treno ETR 324.
Figure 5 – Layout of ETR 324 train.

massima di 130 km/h e gli altri limiti imposti localmente lungo la linea si considerano come invariabili. Gli input per il modello di calcolo sono quelli tradizionali, quali la curva forza di trazione/velocità del treno, la planimetria e il profilo della linea, che condizionano le prestazioni operative in combinazione con gli stili di guida adottati [9][10].

La morfologia costiera della linea è prevalentemente pianeggiante con pendenza massima del 10,4% (Fig. 7). La simulazione bidirezionale della marcia sulla linea scelta come caso di studi (Fig. 8) ha evidenziato un consumo di energia moderato, pari a circa 900 kWh per una singola corsa fra Reggio Calabria Centrale e Catanzaro Lido.

I risultati sono in linea con quelli ottenuti in analoghi studi di rilievo, quali quelli sviluppati con riferimento alla linea Leeuwarden-Groningen nei Paesi Bassi [11] e alla più breve linea

Tabella 1 – Table 1

Principali caratteristiche del treno ETR 324
Main characteristics of train ETR 324

Parametri del treno <i>Train parameters</i>	Unità <i>Units</i>	Valori <i>Values</i>
Velocità massima <i>Max Speed</i>	km/h -	160
Capacità <i>Capacity</i>	numero di passeggeri <i>number of passengers</i>	202 posti+145 in piedi 202 seats + 145 standing
Massa in servizio <i>Mass in service</i>	t -	168
Massa a vuoto <i>Empty mass</i>	t -	136
Dimensioni (L x W x H) <i>Dimensions (L x W x H)</i>	m -	67.550 x 2.950 x 3.820
Tensione <i>Power supply</i>	kV -	1.5-3.0 d.c.
Unità di trazione <i>Traction units</i>	-	2

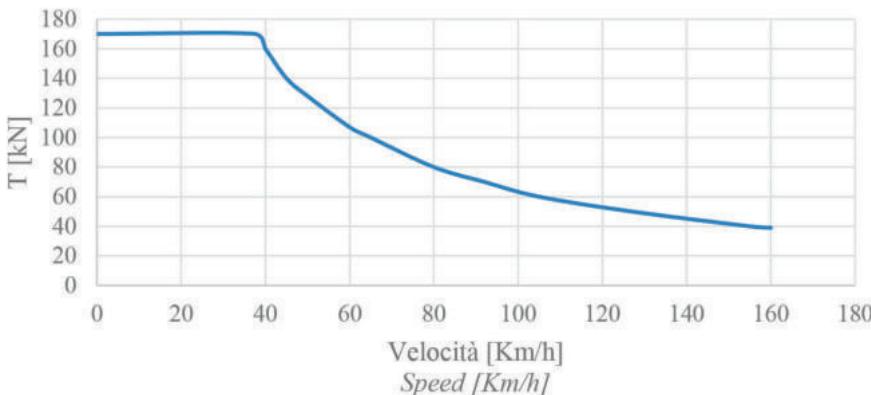


Figura 6 – Diagramma della forza di trazione del treno ETR 324.
Figure 6 – Traction force diagram of train ETR 324.

Saluzzo-Savigliano nella regione Piemonte [12]. Con le modalità di frenatura previste, l’impiego della frenatura rigenerativa può consentire importanti risparmi energetici, calcolati approssimativamente in 180 kWh (il 20% circa del totale impegnato durante le frenature), utilizzabili per ricaricare gli accumulatori utilizzati per alimentare i servizi ausiliari e per contribuire a coprire i picchi di potenza richiesti durante le fasi di accelerazione.

Il calcolo della quantità di idrogeno richiesto parte dalla potenza richiesta, calcolata come segue [13]:

$$P_{\text{required}} = P_{\text{el}} + P_{\text{aux}} \quad (1)$$

Dove P_{el} è la potenza elettrica di trazione espressa da (2), pari al rapporto fra la potenza meccanica (P_{me}) e il rendimento (assunto pari al 90%) durante la fase di accelerazione e il loro prodotto durante la fase di frenatura:

$$P_{\text{el}} = \begin{cases} \frac{P_{\text{me}}}{\eta} & \text{se } P_{\text{me}} \geq 0 \\ P_{\text{me}} \cdot \eta & \text{se } P_{\text{me}} < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Tuttavia, per uno studio più preciso, è necessario considerare che la potenza richiesta dagli ausiliari P_{aux} , sebbene costante per periodi definiti, varia nelle diverse stagioni e periodi del giorno, assumendo un valore più elevato durante le stagioni invernali ed estive e durante i periodi più caldi e più freddi del giorno, quando i sistemi di condizionamento dell’aria richiedono più energia.

Come rappresentato in Fig. 9, la potenza rimane prevalentemente al di

studied by a bidirectional running simulation on the line (Fig. 8), which highlighted a corresponding quite moderate energy consumption of about 900 kWh for a single run between Reggio Calabria Centrale and Catanzaro Lido.

The results are in line with similar relevant studies, such as those developed with reference to the Leeuwarden-Groningen line in the Netherlands [11] and the shorter line Saluzzo-Savigliano in Piedmont region [12]. As far as the braking phase is concerned, the assumption of regenerative braking would allow great energy savings. The recovered energy, approximately calculated in 180 kWh (about 20% of the total during braking), can recharge the

accumulators used to energize the auxiliary services and to contribute to the high-power requirements in the acceleration phases.

The calculation of the required quantities of Hydrogen starts from the power required, calculated as follows [13]:

$$P_{\text{required}} = P_{\text{el}} + P_{\text{aux}} \quad (1)$$

Reggio Calabria Centrale - Catanzaro Lido:
Altitudine (m) Altitude (m)

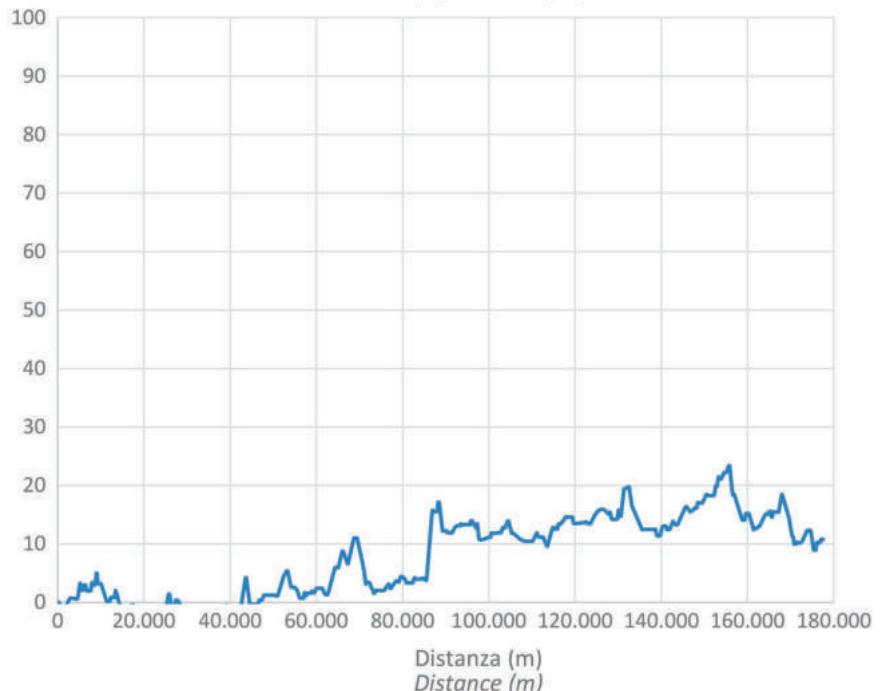


Figura 7 – Profilo longitudinale della tratta Reggio Calabria Centrale-Catanzaro Lido.
Figure 7 – Longitudinal profile of Reggio Calabria Centrale-Catanzaro Lido section.

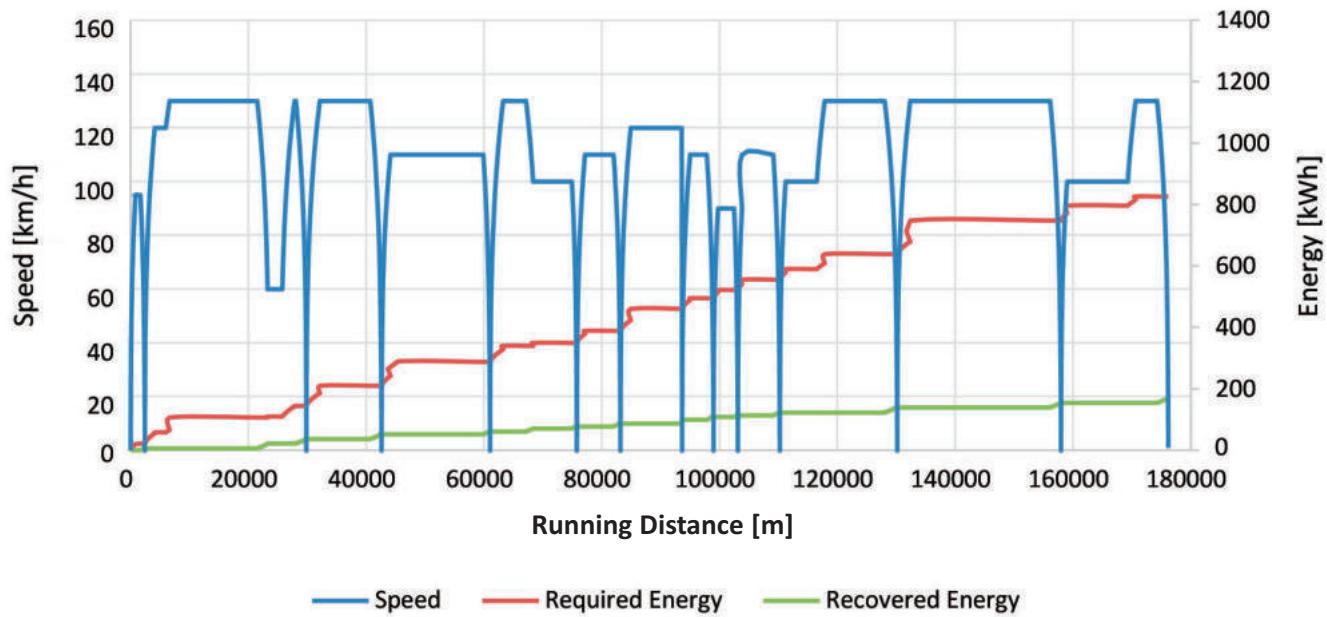


Figura 8 – Variazione della velocità, energia richiesta ed energia recuperata in frenatura lungo la tratta Reggio Calabria Centrale-Catanzaro Lido.

Figure 8 – Spatial variation of speed, required energy and recovered energy along the Reggio Calabria Centrale-Catanzaro Lido section.

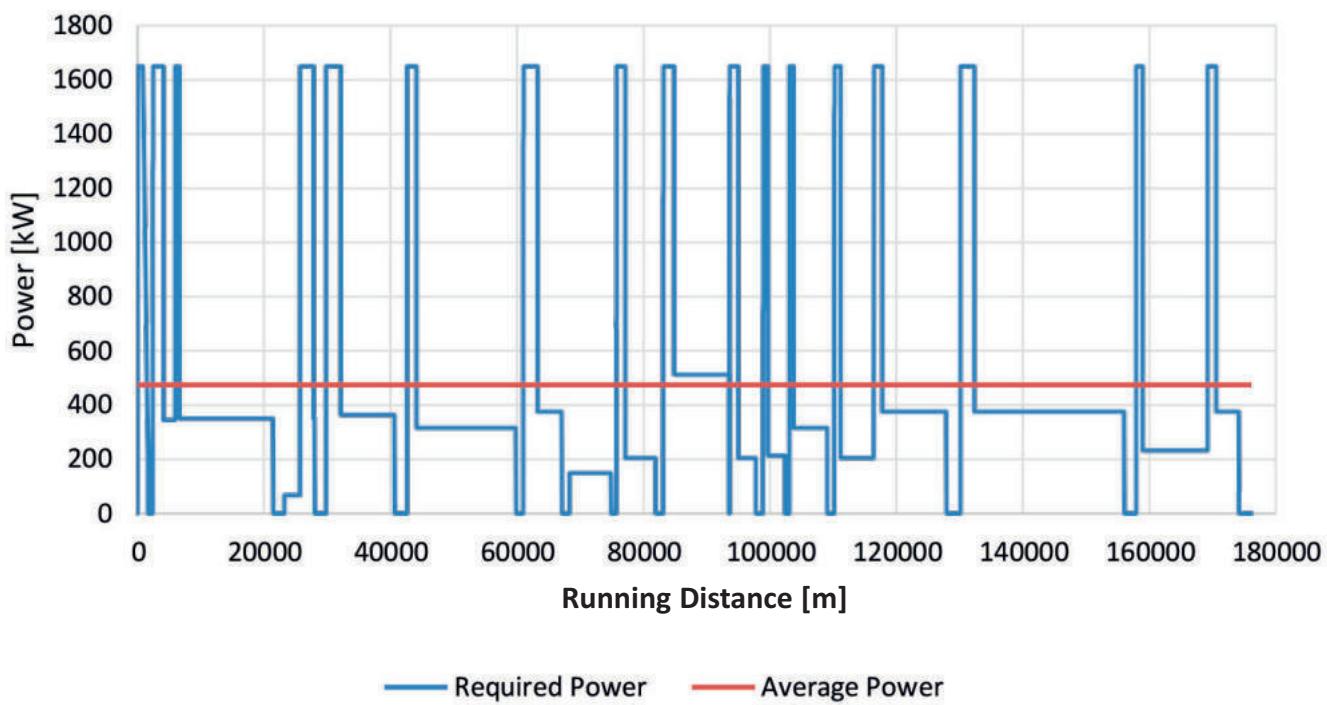


Figura 9 – Variazione nello spazio della potenza richiesta e potenza media da Reggio Calabria Centrale a Catanzaro Lido.

sotto dei 400 kW con picchi più elevati limitati a brevi periodi. Poiché dimensionare le celle a combustibile per tali valori di picco porterebbe a un sistema costoso e sovradimensionato, una soluzione potrebbe essere dimensionare le celle a combustibile e calcolare la quantità di idrogeno necessaria considerando il valore medio della potenza richiesta, circa 475 kW, e coprire la domanda aggiuntiva di potenza attraverso gli accumulatori.

L'energia è calcolata come integrale della potenza nel tempo:

$$E = \int P dt \quad (3)$$

Durante la fase di accelerazione il treno consuma energia chimica per incrementare l'energia cinetica fino al raggiungimento della velocità desiderata. Durante la fase di decelerazione si svolge il processo opposto e l'energia cinetica si trasforma in energia elettrica accumulata chimicamente all'interno di accumulatori, parzialmente ricaricati senza consumo di energia diversa.

Tuttavia, la frenatura elettrica non porta mai all'arresto completo delle ruote in quanto la sua azione frenante è efficace soltanto con le ruote in movimento. La sua efficienza si riduce quando si reduce la velocità poiché il rotore assume velocità angolari così basse che il potenziale generato è ridotto. Pertanto, il recupero di energia è considerato solo al di sopra dei 60 km/h. Al di sotto di questa velocità il contributo della frenatura elettrica non viene considerato e si suppone in azione la sola frenatura pneumatica.

5. Risultati e loro discussione

Considerando in prima approssimazione la densità energetica volumetrica dell'idrogeno compresso variabile nel range 2.5-5.0 MJ/l e il rendimento medio di una cella a combustibile del 50% circa [14], con riferimento alla quantità di energia necessaria calcolata in 900 kWh, la quantità necessaria di idrogeno è stimabile considerando la capacità del serbatoio di idrogeno a 700 bar a 25°C pari a 0,039 kg/l. Pertanto, la corrispondente quantità di idrogeno richiesta è approssimativamente di 48 kg.

Assumendo un costo commerciale dell'idrogeno variabile fra 2,50 USD/kg (produzione di idrogeno Grey or Blue) e 6,80 USD/kg (produzione di idrogeno Green) [15] e un valore intermedio, ottimistico in vista di futuri attendibili riduzioni dei costi, di 3.50 USD/kg (3.25 EUR/kg), il costo approssimativo dell'idrogeno per percorrere l'intera tratta (177.5 km) sarebbe di circa 155 EUR.

La fattibilità economica nel confronto con treno a trazione diesel di pari prestazioni, quale l'ETR 324, deve considerare per questa soluzione una densità energetica approssimativa di 35 MJ/l e un rendimento del 30% circa. [16]. Su questa base, il costo approssimato risultante del combustibile sarebbe di circa 253 EUR, maggiore di quello dell'idrogeno del 63% circa.

Where P_{el} is the electric traction power expressed by (2), equal to the ratio between the mechanical power (P_{me}) and the efficiency (assumed 90%) during the acceleration phase and their product during the braking phase:

$$P_{el} = \begin{cases} \frac{P_{me}}{\eta} & \text{if } P_{me} \geq 0 \\ P_{me} \cdot \eta & \text{if } P_{me} < 0 \end{cases} \quad (2)$$

However, for a more precise study, it is necessary to consider that the power required by the auxiliaries P_{aux} , although constant for limited periods, varies according to seasons and times of the day, assuming a higher value during the winter or summer seasons and during the hottest or coldest time within the day, when the air conditioning systems are more demanding.

As represented in Fig. 9, the power is mainly below 400 kW and demands for higher values occur for short periods. Since sizing the fuel cells for such peak values would lead to an expensive and oversized system, a solution could be to size the fuel cells and calculate the amount of Hydrogen required, considering the average value of the power demand, about 475 kW, and covering the surplus power demand by the accumulators.

The energy is calculated by the integral of the power over time:

$$E = \int P dt \quad (3)$$

During the acceleration phase, the train expends chemical energy to increase its kinetic energy until the desired speed is reached. During the deceleration phase, the opposite process takes place and kinetic energy is taken from the train by increasing the electrical energy stored chemically in an accumulator, partly recharged free of charge.

Electric braking, however, never causes the wheels to lock completely as the action of this brake is only effective when the wheels are moving. This effectiveness decreases as the speed decreases because the rotor of the motor assumes an angular speed such that the potential generated is low. Therefore, the energy recovery is only considered over the threshold of 60 km/h. Below this speed the contribution of the electric brake is not considered and only the pneumatic brake is supposed to be in action.

5. Results and discussion

Considering the volumetric energy density of compressed Hydrogen variable in the range 2.5-5.0 MJ/l and the efficiency of a fuel cell around 50% [14], with reference to the calculated amount of 900 kWh, the necessary quantity of Hydrogen is estimable considering the capacity of the 700-bar Hydrogen tank at 25°C equal to 0.039 kg/l. Therefore, the corresponding quantity of Hydrogen required is approximately 48 kg.

Questa prima stima non include i costi del capitale per gli impianti di produzione e distribuzione, così come le eventuali modifiche ai treni in servizio o l'acquisto di nuovi treni. Cionondimeno, il margine è sufficientemente significativo per assicurare che un vantaggio economico, in aggiunta agli ovvi benefici ambientali, sia comunque ottenibile.

Il concetto è rinforzato dai risultati dello studio descritto in [17], nel quale gli autori dimensionano una stazione di rifornimento dell'idrogeno per uso ferroviario, nella stessa regione del nostro caso di studio, per soddisfare una domanda giornaliera di 260 kg, stoccati alla pressione di 350 bar, tramite un processo di elettrolisi a membrana di scambio protonico (PEM) della potenza di 670 kW e successiva compressione per raggiungere le condizioni di stoccaggio. In questa situazione l'investimento viene recuperato dopo un tempo di 4,2 anni con un saggio di rendimento interno del 19% circa.

In merito all'architettura del veicolo, la Fig. 10 riporta un esempio puramente funzionale del treno alimentato a idrogeno, ispirato al treno Coradia iLint, nel quale i serbatoi (*Hydrogen fuel tank*) e le celle a combustibile (*Fuel cell composition*) sono disposti sull'imperiale per meglio soddisfare i requisiti di sicurezza.

L'energia in eccesso rispetto al fabbisogno delle celle a combustibile e quella recuperata in frenatura viene accumulata nei pacchi di batterie (*Battery composition*), che possono essere disposti nel sotto cassa, assieme agli inverter (*Traction inverter DC/AC-converter*) che alimentano i motori di trazione (*Traction motor*), con la necessaria potenza durante le fasi di accelerazione e crociera e recuperano l'energia cinetica in fase di frenatura, e gli ausiliari (*Auxiliary converter*).

Assuming a commercial cost of Hydrogen variable in the range from 2.50 USD/kg (Grey/Blu production) to 6.80 USD/kg (Green production) [15] and an intermediate value, optimistic in view of future expected costs reduction, of 3.50 USD/kg (3.25 EUR/kg), the approximate cost of Hydrogen on the whole section (177.5 km) would be about 155 EUR.

The economic viability in comparison with a diesel-powered train with the same performances, such as ETR 324, must consider for this solution an energy density of approximately 35 MJ/l and an efficiency around 30% [16]. On this basis, the approximate resulting cost of the diesel fuel is about 253 EUR, about 63% more expensive than the Hydrogen.

This first estimation does not include the capital costs for fuel production and distribution plants, as well as the modification of existing vehicles or the purchase of new vehicles. Nevertheless, the margin is relevant enough to ensure that an economic advantage, additional to the obvious environmental benefits, would be anyway achievable.

This concept is reinforced by the results of the study described in [17], where the authors sized a Hydrogen fuelling station for railway use in the same region of our case study, capable to satisfy a daily demand of 260 kg, stored at 350 bars, by means of a 670 kW Proton Exchange Membrane (PEM) electrolyser and the compression process for reaching the required storage pressure. In this situation, the breakeven point of the investment is reached after a payback period of 4.2 years and an ROI of about 19%.

Concerning the vehicle architecture, Fig. 10 depicts a purely functional example of the Hydrogen-powered train, inspired by the Coradia iLint, where the Hydrogen tanks and cells are on the roof of the vehicle to better fulfil safety requirements.

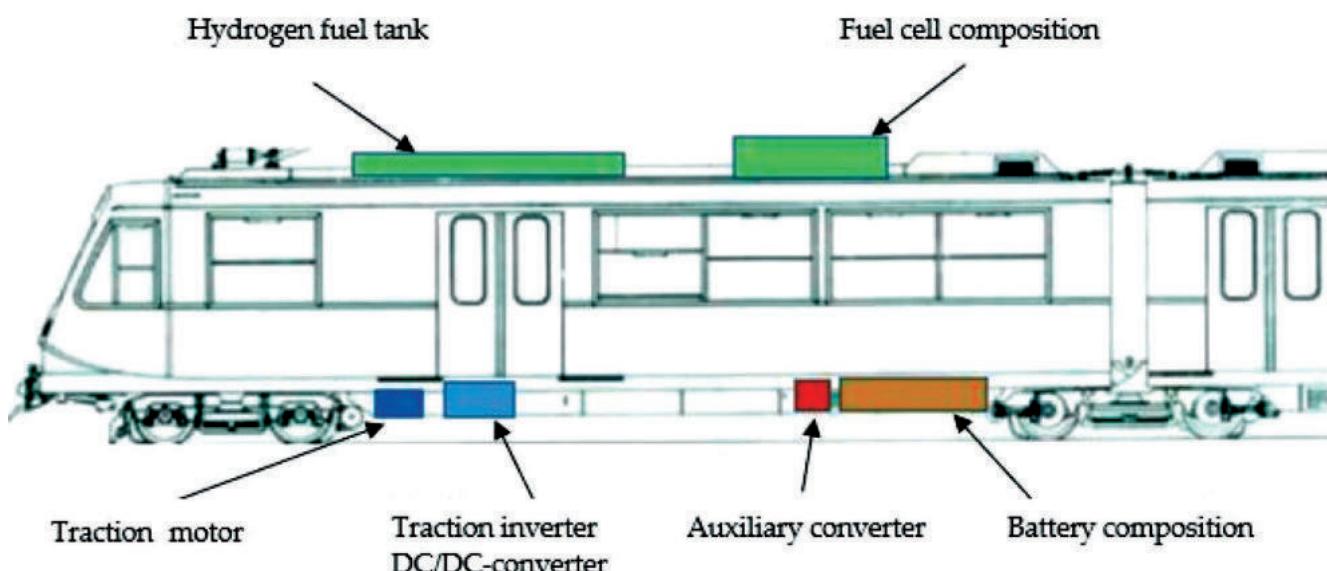


Figura 10 – Rappresentazione schematica di un treno tipo alimentato con celle a combustibile a idrogeno.

Figure 10 – Schematic representation of a typical Hydrogen fuel cell train.

6. Conclusioni

Questo articolo tratta delle prospettive di miglioramento delle linee ferroviarie esercite con treni a combustione interna, per le quali l'elettrificazione risulterebbe troppo costosa, con treni alimentati a idrogeno. L'applicazione sistematica della metodologia utilizzata ha dimostrato che, in specifiche condizioni, si potrebbero ottenere importanti economie.

Ancorché ancora lontani da conclusioni definitive, non giustificate allo stato attuale delle implementazioni, i risultati incoraggiano a orientare la ricerca in varie direzioni per la potenziale applicazione dell'idrogeno ai sistemi di trasporto ferroviario.

Dal punto di vista della sicurezza, il prossimo sviluppo dovrebbe essere orientato allo sviluppo di un quadro normativo semplice e sistematico basato su robusti approcci di analisi del rischio per prevenire vincoli eccessivamente restrittivi, che potrebbero generare costi aggiuntivi e ridurre i vantaggi economici dimostrati. Dal punto di vista dell'esercizio, il punto prioritario sviluppare è l'analisi dei campi di applicazione delle soluzioni con alimentazione a idrogeno in una visione sistematica, che includa, oltre al veicolo, le questioni aperte tecniche e operative in merito alla produzione e alla distribuzione dell'idrogeno stesso.

Allo stato attuale delle conoscenze, le soluzioni competitive per un esercizio ferroviario meno inquinante sulle linee non elettrificate sembrano essere ristrette a [18]:

- celle a combustibile alimentate a idrogeno a bordo del veicolo;
- ricarica rapida di batterie di accumulatori durante le fermate in stazioni equipaggiate con brevi tratti di catenaria.

Una questione chiave aperta ad approfondimenti, che richiedono una combinazione di competenze tecnologiche e d'esercizio, è l'identificazione dei più appropriati campi di applicazione per esse, con riferimento ai sistemi per le lunghe distanze e a quelli urbani-suburbani, ai servizi per i passeggeri e a quelli per le merci.

The energy exceeding the need from the fuel cells production and braking recovery is stored in battery packs that could be under the train bed, where are also the inverter supplying the traction motor, with the appropriate electrical power during accelerating and cruising phases and recovering kinetic energy during braking, and the auxiliaries.

6. Conclusions

This paper discusses the challenge of upgrading railway lines served by combustion engine trains, for which electrification work would be largely expensive, with new Hydrogen-powered trains. The systematic application of the developed methodology demonstrated that, in specific conditions, considerable savings would be achievable.

Far away from definitive conclusions, unjustified at the present implementation stage, the results encourage to orient the research in various directions concerning the potential application of Hydrogen in rail transport systems.

On the safety side, the next steps should be towards the development of a simple and systematic regulatory framework basing on robust risk analysis approaches to prevent excessive restrictive constraints, which could generate additional costs and reduce the demonstrated economic advantages.

On the operation side, the most relevant need is to analyse the problem of the application fields of Hydrogen-powered solution in a systemic vision, including, in addition to the vehicle itself, the production and distribution technical and operational open issues.

At the present state of the knowledge, the competitive solutions for a cleaner operation on not electrified lines seems restricted to [18]:

- hydrogen-powered fuel cells on board vehicles;*
- fast recharge of batteries during stops in stations equipped with short sections of catenary.*

A key open issue to further develop, requiring a combination of technological and operation competences, is to identify the most appropriate application fields for them, having in mind both long-distance and urban-suburban systems, as well as passengers and freight services.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] European Commission (2013), "Clean energy for transport: a European strategy on alternative fuels" - Brussels.
- [2] European Parliamentary Research Services (2022), "Fit for 55 Package. Briefing. Towards climate neutrality" - PE 733.513, June.
- [3] European Parliament and the Council (2009), "Directive 2009/28/EC of 23/04/2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC" - Brussels.
- [4] European Parliament and the Council (2014), "Directive 2014/94/EU of the on the Deployment of Alternative Fuels Infrastructure (DAFI)" - Brussels.
- [5] B. DALLA CHIARA, R. RICAGNO, M. SANTARELLI (2008), "Sostenibilità energetica dei trasporti: analisi dei consumi e della soluzione ferroviaria" - Ingegneria Ferroviaria, 531-543, 6.

- [6] D. VALDENAIRE (2022), "Hydrogen for Europe" - Concawe Review, 30.
- [7] D.A. CROWL, Y. DO JO (2006), "The hazards and risks of Hydrogen" - Proceedings of 40th Annual Loss Prevention Symposium, AIChE Spring Natural Meeting, 337-349, 20.
- [8] S. FISHER (2020), "Hydrogen rides the rails" - ENI.
- [9] F. BRUNO, N. COVIELLO, B. DALLA CHIARA, A. DI PAOLA, P. PAGLIERO, V. VIKTOROV (2015), "The energy consumption of trains in operation: simulation, a methodology for the analysis and influence of the driving style" - Ingegneria Ferroviaria, 327-357, 4.
- [10] C. MIGLIORINI, S. RICCI, E. TOMBESI (2017), "Analysis and assessment of eco-driving strategies for train drivers training" - Ingegneria Ferroviaria, 727-758, 10.
- [11] M. KAPETANOVIC, A. NUNEZ, N. VAN OORT, R.M.P. GOVERDE (2022), "Analysis of Hydrogen-powered propulsion system alternatives for diesel-electric regional trains" – Journal of Rail Transport Planning and Management, 23, 100338.
- [12] S. GURRÌ, E. SANTACATERINA, M. GUARRERA, B. DALLA CHIARA (2023), "Driving modal shift on low-traffic railway lines through technological innovation: a case study in Piedmont (Italy) including Hydrogen fuel-cells as an alternative" - Transportation Procedia, 2352-1465.
- [13] Z. TIAN, N. ZHAO, S. HILLMANSEN, S. SU, C. WEN (2020), "Traction Power Substation Load Analysis with Various Train Operating Styles and Substation Fault Modes" - Energies, 13, 2788.
- [14] J. WOLF (2002), "Liquid-Hydrogen technology for vehicles" - MRS Bulletin, September, 684-687.
- [15] L. COLLINS (2020), "Global news and intelligence for the Energy Transition, a wake-up call on green Hydrogen: the amount of wind and solar needed is immense" - Recharge.
- [16] European Automobile Manufacturers' Association (2016), "Differences between Diesel and Petrol" - ACEA.
- [17] F. PIRAINO, M. GENOVESE, P. FRAGIACOMO (2021), "Towards a new mobility concept for regional trains and Hydrogen infrastructure" - Energy Conversion and Management 228, 113650.
- [18] M. KAPETANOVIC, M. VAJIHI, R.M.P. GOVERDE (2021), "Analysis of Hybrid and Plug-In Hybrid Alternative Propulsion Systems for Regional Diesel-Electric Multiple Unit Trains" - Energies 14, 5920.