



## Analisi preliminare di tecnologie avanzate per applicazioni di treni leggeri ad idrogeno nelle tratte sub-urbane non elettrificate

### *Preliminary analysis on advanced technologies for hydrogen light-rail trains application in sub-urban non electrified routes*

Prof. Ing. Gino D'OVIDIO<sup>(\*)</sup>  
Dott. Ing. Alessandro CARPENITO<sup>(\*)</sup>  
Dott. Ing. Carlo MASCIOVECCHIO<sup>(\*\*)</sup>  
Prof. Ing. Antonio OMETTO<sup>(\*\*\*)</sup>

**Sommario** - Questo articolo presenta l'analisi preliminare di fattibilità di un treno, propulso ad idrogeno, in grado di operare senza emissioni inquinanti lungo le linee ferroviarie "complementari" non elettrificate.

Le linee "complementari", per lo più a singolo binario, furono originariamente costruite per connettere città di piccole e medie dimensioni e contesti suburbani. Attualmente, poiché l'elettrificazione di tali linee risulta quasi sempre non economicamente conveniente, il servizio viene espletato con treni a trazione diesel.

Nuove opportunità tecnologiche riguardanti apparati ibridi di propulsione avanzata consentono di realizzare sistemi urbani di trasporto ferroviario, ambientalmente sostenibili in grado di operare, ad alta efficienza energetica, anche sulle linee non elettrificate.

In questo studio si propone un'innovativa architettura di sistema riguardante un treno, di tipo leggero (tram-treno) ad emissioni nulle, propulso da un'unità ibrida di potenza costituita da celle a combustibile ad idrogeno e da apparati di accumulo dell'energia con volani ad alta velocità di rotazione.

Le performance di sistema sono state valutate tramite l'elaborazione di un modello numerico dinamico in grado di simulare la percorrenza del treno su una determinata tratta, al variare dei parametri di sistema, con l'obiettivo primario di verificarne le performance e la fattibilità tecnica.

**Summary** - The paper presents a preliminary feasibility analysis of a hydrogen powered light-rail train able to operate without emissions along non-electrified "complementary" rail lines.

The majority of the "complementary" lines are mostly single track and were originally constructed to connect both small-medium regional centers and sub urban areas. Nowadays, the business case for electrification is almost always unfavorable and diesel traction is usually provided.

New technological opportunities concerning advanced hybrid propulsion systems offer to realize a city railway transportation systems environmental friendly able to operate at high energy efficiency also along non-electrified lines.

In this study we propose a preliminary novel design of an emission-free light-train (tram-train type) powered by a hybrid power unit consisting of a hydrogen fuel cells and high-speed kinetic energy storage systems.

A numerical dynamic simulator of the proposed light-rail train has been developed in order to compute performance by varying system parameters with the aim to numerically verify the technical feasibility.

The simulation of the proposed light-train run along a re-designed non-electrified single track line in the sub-urban territory of L'Aquila city (Italy) is reported.

Finally, the hydrogen power-train and a traditional diesel train have been compared in terms of energy consumption and emissions.

<sup>(\*)</sup> Università dell'Aquila - Dipartimento di Ingegneria civile, costruzione architettonica e ambientale.

<sup>(\*\*)</sup> Consulente elettrotecnico ed energetico.

<sup>(\*\*\*)</sup> Dipartimento Industriale e Ingegneria dell'informazione ed economia.

<sup>(\*)</sup> University of L'Aquila - Dept. of Civil, Construction-Architectural and Environmental Engineering.

<sup>(\*\*)</sup> Electrotechnical and energy consultant.

<sup>(\*\*\*)</sup> Dept. of Industrial and Information Engineering and Economics.

L'operatività del treno proposto è stata simulata lungo un tratto di linea esistente, non elettrificata e a binario unico, opportunamente riadattata ad uso urbano, che attraversa il contesto territoriale della città di L'Aquila (Italia).

A conclusione, è stata realizzata un'analisi comparativa tra il treno ad idrogeno ed un treno diesel tradizionale, in termini di consumi e di emissioni.

## 1. Introduzione

Come noto, la rete ferroviaria italiana è suddivisa nelle seguenti tre categorie:

- linee “fondamentali” (36.8%);
- linee “complementari” (57.5%);
- linee di “nodo” (5.7%) [1].

In questo articolo si pone l'attenzione sulle linee “complementari” che sono prevalentemente a binario unico, non elettrificate e spesso sottoutilizzate. Questa tipologia di linee rappresenta un'infrastruttura altamente distribuita sul territorio nazionale, realizzata per connettere sia città di medio-piccole dimensioni sia polarità insediative all'interno di contesti inter-urbani e suburbani.

A causa degli elevati costi, l'elettrificazione delle linee complementari risulta quasi sempre non conveniente e, conseguentemente, su tali linee si utilizzano treni a trazione diesel. Il materiale rotabile diesel italiano ha però un'età considerevole: i treni più recenti usano infatti motori con certificazione EURO 3 [2].

Attualmente, come conseguenza di un'accresciuta sensibilità sociale a tutela dell'ambiente, le politiche di trasporto sostenibile assumono un ruolo sempre più centrale e pertanto cambiamenti strategici in termini tecnologici, progettuali e gestionali nel campo dei trasporti sono divenuti indispensabili.

In quest'ottica, i veicoli alimentati con energie “pulite” assumono un ruolo chiave, soprattutto nei paesi dell'Unione Europea, in quanto possono contribuire a realizzare l'obiettivo di ridurre del 80-95%, entro il 2050, le emissioni di gas serra dovute ai sistemi di trasporto [3].

La combinazione tra idrogeno e celle a combustibile, denominate anche fuel cell (FC), è divenuta altamente attrattiva per realizzare sistemi di trasporto ad emissioni “zero” aprendo nuove opportunità di utilizzo anche nel campo del trasporto ferroviario passeggeri.

La FC è un dispositivo elettrochimico che converte direttamente l'energia chimica potenziale del carburante in energia elettrica, combinando idrogeno ed ossigeno (contenuto nell'aria) con un catalizzatore; l'unica emissione prodotta durante il funzionamento è una piccola quantità di acqua calda pulita e vapore. Le singole celle sono assemblate in “stack” la cui potenza dipende dalla dimensione: infatti il voltaggio aumenta con il numero di celle mentre la corrente massima è funzione della superficie delle celle stesse [4].

## 1. Introduction

As well known, the operating Italian railway network is usually divided into the following categories:

- “fundamental” lines (36.8%);
- “complementary” lines (57.5%);
- “node” lines (5.7%) [1].

In this paper we focus on the “complementary” lines that are mostly single track, not-electrified and often under-utilized. This kind of lines represents a considerable and highly distributed infrastructure in the national territory able to connect both small-medium regional centers and inter/sub-urban areas.

The business case for electrification of Italian railway lines is almost always unfavorable due to the significant electrification costs. Consequently, diesel-powered trains are generally used in the complementary lines. The Italian diesel rolling stock has a considerable age; the most recent versions are EURO 3 certified [2].

Nowadays, as a result of increased environmental social awareness, sustainable transport policy is becoming increasingly important and essential changes in technology, design and management are required in the transportation field.

In this view, vehicles powered by clean energy sources can play a key role in the EU countries by contributing to realize a carbon free transport system in order to reduce greenhouse gas emissions of 80-95% by 2050 [3].

Hydrogen fuel combined with fuel cell (FC) technology has become very attractive for emission free traction systems and has opened up new opportunities in railway passenger transport.

A FC is an electrochemical device that directly converts the fuel chemical potential energy into electric energy by combining hydrogen and oxygen (from air) with a catalyst; the only emission produced during operation is a small amount of clean warm water and steam. Single cells are assembled in a stack whose power output depends on its size. Higher values of the voltage and maximum current can be respectively achieved by increasing the number of cells in a stack and the surface area of the cells [4].

The hydrogen can be produced from natural gas (re-forming) or by water electrolysis. In the latter case, if the hydrogen is produced with renewable energy, FC vehicles are potentially able to ensure emission-free energy cycle. The hydrogen can be stored aboard of vehicle as compressed gas in vessels, as cryogenic liquid at low temperature (–253°C) or as atomic state reversibly adsorbed in a metal hydride.

Internationally much research work, tests and successful services experiences have been carried out in order to use hydrogen power via onboard FC for different rail applications [5,6].

For urban use, a first hydrogen powered three-cars tram

L'idrogeno può essere prodotto da gas naturale (reforming) attraverso appositi dispositivi o attraverso il processo di elettrolisi dell'acqua. In quest'ultimo caso, se l'idrogeno è prodotto con energia elettrica proveniente da fonti rinnovabili, i veicoli a FC sono alimentati con ciclo energetico privo di emissioni. L'idrogeno può essere immagazzinato a bordo del veicolo in appositi contenitori sia in forma di gas compresso, sia in forma di liquido criogenico a basse temperature ( $-253^{\circ}\text{C}$ ) sia in uno stato atomico reversibile assorbito in materiali a base di idruro di metallo.

A livello internazionale, le applicazioni di FC ad idrogeno sono state oggetto di numerosi lavori di ricerca, test ed esperienze condotte con successo sia in ambito ferroviario urbano che extraurbano [5,6].

Per quanto concerne le applicazioni di trasporto urbano, un primo tram (con tre carrozze dalla capienza complessiva di 380 passeggeri), alimentato ad idrogeno e con motori elettrici, è stato testato e costruito in Cina [7]. Nel 2015 sette tram alimentati con FC ad idrogeno sono entrati in servizio lungo una linea di 8.8 km in Qingdao [8].

Per quanto riguarda le applicazioni di servizio extraurbano, un treno, alimentato da FC ad idrogeno ibridizzate con batterie elettrochimiche, è stato progettato e testato dalla Alstom in Germania [9].

Nel campo degli accumulatori energetici utilizzabili a bordo di sistemi mobili, una soluzione alternativa all'uso delle batterie elettrochimiche è rappresentata dagli apparati di accumulo energetico a volano, denominati anche Flywheel Energy Storage System (FESS) [10-13]. Questi dispositivi rappresentano una soluzione, ad alto contenuto tecnologico, ormai matura per produzioni ed applicazioni di massa, in grado di supportare, ad alto rendimento e con modalità rispettose dell'ambiente, una vasta gamma di applicazioni quali: fornitura/accumulo di potenza in gruppi di turbine o generatori, supporto di tensione nelle reti elettriche del sistema ferroviario, miglioramento della qualità dell'energia nella rete elettrica, gruppi di continuità elettrica (UPS), gestione della potenza nel settore dei mezzi di trasporto (autobus, tram, auto).

I FESS sono sistemi basati sull'utilizzo di un volano; essi sono classificati in due categorie: bassa velocità di rotazione (fino 10,000 giri per minuto) e alta velocità di rotazione (fino a 100,000 giri per minuto). In quest'ultimo caso sono necessari rotori realizzati con materiali compositi molto resistenti, cuscinetti magnetici e contenitori depressurizzati per abbattere sia gli attriti meccanici sia le resistenze aerodinamiche.

Il funzionamento del FESS risulta efficiente per rapporti tra energia e potenza compresi tra 1 secondo e 10 minuti mentre il funzionamento delle batterie è ottimale per rapporti di circa un'ora o più. I FESS possono essere completamente caricati e scaricati per un numero elevatissimo cicli. Rispetto alle batterie elettrochimiche, i FESS ad alta velocità hanno una maggiore densità specifica di potenza con minori costi unitari per ciclo di carica/scarica, nessuna degradazione dovuta ai cicli, bassissimi

(380 passengers of carrying capacity) with electrical traction drives was tested and built in China [7]. In 2015 seven hydrogen FC trams entered passenger service on an 8.8 km line in Qingdao [8].

*For regional service applications, a train powered by hydrogen FC hybridized with electrochemical batteries has been designed and tested by Alstom in Germany [9].*

*In the field of energy storage devices for mobile applications, the flywheel energy storage system (FESS) represents an advanced green technology able to propel applications ranging from cars to railroad trains [10-13]; it is one of the current alternatives to the electrochemical batteries for urban/sub-urban routes.*

*These devices represent a high-tech and mature solution for mass production that can be utilized, with high performance and with environmentally friendly modes, in a wide range of applications such as: ride-through power in turbine or generator sets, voltage support in the rail system, power quality improvement in the electric grid, uninterruptible power supplies (UPS) and energy storing in the automotive sector (bus, tram and car).*

*The flywheel devices are used to store energy in the rotating inertia of a flywheel; they are categorized into low-speed (10,000 rpm or less) and high speed (up to 100,000 rpm). In the latter case, stronger materials, magnetic bearings and vacuum vessel to decrease friction and windage losses are required.*

*FESSs are efficient for an energy to power ratio of 1 s to 10 min while the proper battery ratio is in the order of 1 h or greater. Compared with an electrochemical battery, the high-speed FESS has much higher specific power density and lower full cycle life costs; moreover, it can be charged and discharged for many cycles, needs little maintenance and has a very low environmental impact [14,15].*

*Several authors have studied the use of flywheel for urban transit buses [16-20]. Flywheel use has also been analyzed in railway applications ranging from light rail transit to hybrid locomotive [21-26]. Parry People Movers supplies light electric tramway and railcars powered by small gas, diesel or hydrogen motors coupled to FESS [27].*

*The principal advantages of a hydrogen powered train compared to a diesel train are: i) pollution free operation, ii) traction by electric drive that allows the gear box to be taken off and a low noise level and braking energy recovery to be achieved. Conversely, the main disadvantages are related to the current lack of a hydrogen refueling network. In this direction the European Commission has elaborated a useful plane to promote the utilization of alternative fuels, such as hydrogen [28]. Moreover, current high costs of hydrogen, FESS and FC make hydrogen power-train solution very expensive due to its small commercial use but costs are expected to drop significantly in the next years.*

*This paper focuses on the preliminary system design and the technological aspect analysis of a novel light hybrid electric (LHE) train with hydrogen FC and FESS.*



ma necessità di manutenzione, brevissimo periodo di carica e nessun impatto ambientale [14-15].

Diversi autori hanno proposto ed analizzato l'uso del FESS per autobus urbani [16-20] ed applicazioni ferroviarie che variano dal trasporto di tipo leggero alle locomotive ibride [21-26]. Parry People Movers costruisce tram elettrici leggeri ed automotrici con motori alimentati da unità di potenza alimentate a gas, diesel o idrogeno e da FESS [27].

Rispetto al treno diesel, i principali vantaggi del treno ad idrogeno sono: emissioni nulle, l'utilizzo di motori elettrici di trazione che comportano basso livello di rumore e la possibilità di recuperare l'energia in frenata. Di contro, i principali svantaggi sono connessi alla mancanza di una rete capillare di stazioni di rifornimento per l'idrogeno. Per ovviare tale situazione, la Comunità Europea ha elaborato un piano strategico per promuovere l'utilizzo di carburanti alternativi, quali l'idrogeno e la corrispettiva installazione della rete di rifornimento [28]. Inoltre gli attuali costi dell'idrogeno, dei FESS e delle FC rendono i treni ad idrogeno economicamente poco convenienti a causa del basso tasso di utilizzo commerciale, anche se, nel prossimo futuro, si prevede una riduzione significativa dei costi di tali componenti.

Questo articolo affronta lo studio preliminare di sistema e l'analisi degli aspetti tecnologici connessi ad una tipologia di treno elettrico di tipo leggero, denominato Light Hybrid Electric (LHE), con unità di potenza ibrida costituita da FC a idrogeno e FESS.

L'obiettivo dello studio è mirato a verificare numericamente la fattibilità e le performance di sistema.

Come caso studio, la percorrenza del treno LHE è stata simulata ed analizzata lungo una tratta di linea ferroviaria "complementare" esistente, opportunamente riprogettata ad uso urbano, che insiste sul territorio sub-urbano della città di L'Aquila.

## 2. Caratteristiche del sistema moto-propulsivo

L'architettura di sistema del treno LHE proposto è sinteticamente illustrata in fig. 1; il convoglio consiste in

*The aim of this study is to numerically verify the feasibility and performance of the system.*

*As a case study, the proposed LHE train has been simulated to run along a re-designed existing "complementary" line section in the sub-urban territory of L'Aquila city.*

## 2. Power-train overview

*A simplified scheme of the proposed train architecture is shown in fig. 1; it consists of two side rail cars and a towed wagon. The traction motors are located in the two end side trolleys while the FC and the hydrogen containers are equally distributed and placed on the roof of the two side rail cars.*

*For each rail car, the proposed power system uses an electric traction motor (EM) fed by the hybrid power unit (HPU) consisting of a FC, a FESS and an electrochemical battery (AB) used to feed auxiliary devices on board of train; all of these are connected to the DC bus (continuous red line) by means of power converters (PCs) to manage the power flows as required by the master control system (CS) via the communication bus (dotted green line).*

*Given that the master control imposes a constant set point for the FC power because of its slow dynamic response the FESS must be able to handle the load variations: it provides power when the load power is higher than the FC power, it recovers when the FC power is higher than the load power and during the regenerative electrical braking.*

## 3. Models

*In this preliminary study we focus on the power flows to evaluate and minimize the energy needed by the propulsion system for different operating conditions. To this aim the system has been modeled in a very simple way (fig. 2) by using Scilab-Xcos tool: only the mechanical dynamic model of the train has been considered. The model computes the power flows and the actual train speed by using the required speed and acceleration (reference driving cycle) as input. The actual speed ( $v$ ) and acceleration ( $a$ ) of the train are determined considering the motor capability, i.e. maximum torque ( $T_m$ ) and maximum power ( $P_m$ ); it means*

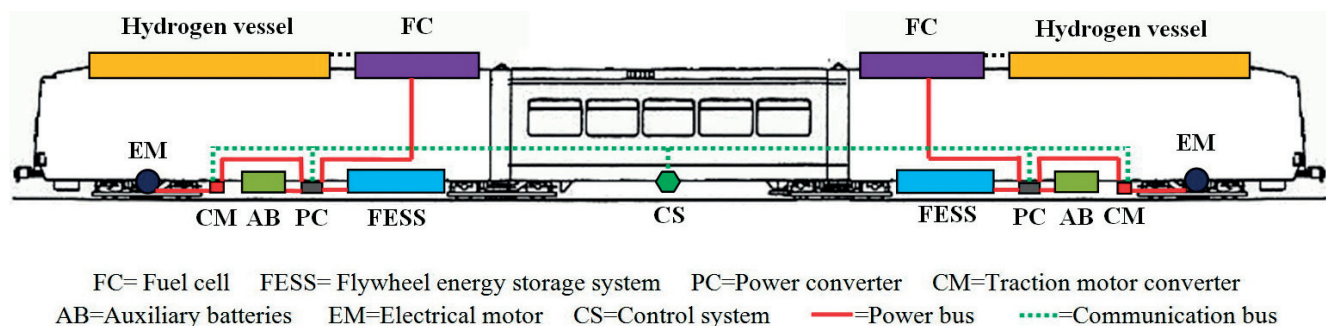


Fig. 1 - Schema semplificato del sistema di potenza del treno LHE.

Fig. 1 - Power system simplified scheme of the LHE train.

due automotrici di estremità ed un vagone centrale trainato. I motori di trazione sono collocati nei due carrelli di estremità mentre le FC ed i contenitori di idrogeno sono simmetricamente distribuiti e posti sull'imperiale delle due automotrici.

Gli apparati di potenza, collocati su ogni automotrice, usano un motore a trazione elettrica (EM) alimentato da un'unità di potenza ibrida, denominata hybrid power unit (HPU). Questa è composta dall'accoppiamento funzionale di FC, FESS e di una batteria (AB) utilizzata solo per alimentare gli apparati ausiliari a bordo del convoglio. Tutti gli apparati di potenza sono connessi al bus DC (linea rossa continua) tramite dei convertitori (PC) che gestiscono il flusso di potenza, così come richiesto dal sistema di controllo centrale (CS) attraverso l'impianto di comunicazione (linea verde tratteggiata).

A causa della lentezza di risposta dinamica della FC, il sistema di controllo principale impone che la FC lavori ad un valore di potenza costante e prefissato e che il FESS gestisca invece le variazioni di potenza. In tal modo il FESS fornisce energia quando la richiesta di potenza dei motori di trazione supera quella erogata dalla FC, mentre accumula energia nel caso contrario e durante la frenatura elettrica rigenerativa.

## 3. Modelli

Lo studio proposto è incentrato sull'analisi preliminare dei flussi di potenza del sistema moto-propulsivo con l'obiettivo di valutare e minimizzare l'energia di trazione necessaria al treno al variare delle condizioni operative. A questo scopo, il sistema è stato simulato attraverso un modello di tipo meccanico-dinamico (fig. 2), elaborato tramite software Scilab-Xcos. Il modello calcola i flussi di potenza e le velocità effettivamente raggiunte del treno prendendo a riferimento i valori di velocità ed accelerazione richiesti dal diagramma del moto. L'input del modello dinamico è costituito quindi dalle grandezze cinematiche del diagramma del moto di riferimento che correla le velocità e le accelerazioni del treno al tempo.

I valori della velocità ( $v$ ) e dell'accelerazione ( $a$ ) effettivamente raggiunte del treno durante la percorrenza so-

that a difference between the reference and actual speed occurs when the required values of torque or power exceed  $T_m$  or  $P_m$  respectively. Despite the simplicity of the model the transmission mechanical power losses and the electric motor power losses are taken into account.

The input of the dynamic model is a reference driving cycle that represents a set of train speed points versus time.

The mechanical power at the motors can be evaluated as follows:

$$P_M(t) = \frac{1}{\eta_t} \cdot (R_W \pm R_S + R_A + R_I) \cdot v(t) \quad (1)$$

where  $\eta_t$  is the transmission efficiency. The motion resistances are evaluated by using the following relations:

$$R_W = \left[ 0.7 + \frac{130}{m_{ax} \cdot g} + 0.009 \cdot v \right] \cdot m \cdot g \cdot \cos(\beta) \quad (2)$$

$$R_S = m \cdot g \cdot \sin(\beta) \quad (3)$$

$$R_A = 0.0473 \cdot C_A \cdot S \cdot v^2 + (n-1) \cdot (0.0716 \cdot v^2) \quad (4)$$

$$R_I = \alpha \cdot m \cdot a(t) \quad (5)$$

where  $R_W$  is the rolling resistance,  $R_S$  is the slope resistance,  $R_A$  is the air resistance,  $R_I$  is the inertial resistance,  $m_{ax}$  is the mass on axle,  $m$  is the gross mass,  $v$  is the train speed,  $g$  is the gravity acceleration,  $\beta$  is the angle of the track slope,  $C_A$  is the drag coefficient,  $S$  is the vehicle frontal area,  $n$  is the wagons number,  $\alpha$  is the rotational mass inertial coefficient and  $a(t)$  is the acceleration.

As relations (2) and (4) are empirical formulations, speed is in km/h, mass in t and resistance in N.

Considering regenerative electrical braking, the power  $P_u$  required from the supply system (HPU) is:

$$\begin{cases} P_u(t) = \frac{P_M(t)}{\eta_M} & a(t) > 0 \\ P_u(t) = -\eta_M \cdot P_M(t) & a(t) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

where  $\eta_M$  is the electromechanical conversion efficiency of the traction motors.

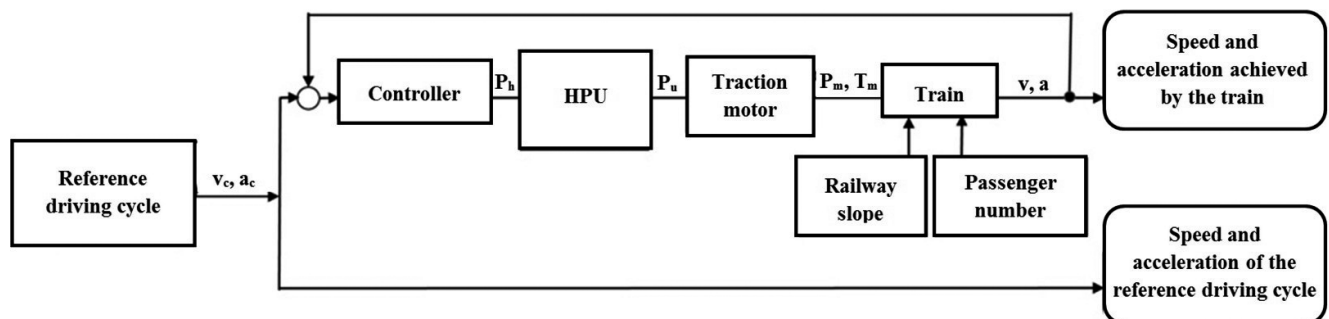


Fig. 2 - Diagramma di flusso del modello dinamico.  
Fig. 2 - Dynamic model flowchart.

no determinati in funzione delle caratteristiche dei motori, quali ad esempio la coppia massima ( $T_m$ ) e la potenza massima ( $P_m$ ). Ciò significa che, quando i valori richiesti di coppia o potenza superano quelli massimi ( $T_m$  e  $P_m$ ), la velocità effettiva del treno risulterà la massima ottenibile anche se inferiore a quella di riferimento. Il modello inoltre contempla le perdite di potenza della trasmissione meccanica e del motore elettrico.

La potenza meccanica  $P_M(t)$  ai motori di trazione è valutata attraverso la seguente relazione:

$$P_M(t) = \frac{1}{\eta_t} \cdot (R_W \pm R_S + R_A + R_I) \cdot v(t) \quad (1)$$

dove  $\eta_t$  è il rendimento della trasmissione. Le resistenze al moto del convoglio sono calcolate tramite le seguenti relazioni:

$$R_W = \left[ 0.7 + \frac{130}{m_{ax} \cdot g} + 0.009 \cdot v \right] \cdot m \cdot g \cdot \cos(\beta) \quad (2)$$

$$R_S = m \cdot g \cdot \sin(\beta) \quad (3)$$

$$R_A = 0.0473 \cdot C_A \cdot S \cdot v^2 + (n-1) \cdot (0.0716 \cdot v^2) \quad (4)$$

$$R_I = \alpha \cdot m \cdot a(t) \quad (5)$$

dove  $R_W$  è la resistenza al rotolamento,  $R_S$  è la resistenza alla pendenza longitudinale del tracciato,  $R_A$  è la resistenza aerodinamica,  $R_I$  è la resistenza di inerzia,  $m$  è la massa a pieno carico del convoglio,  $m_{ax}$  è la massa che grava su un'asse,  $v$  è la velocità del treno,  $g$  è l'accelerazione di gravità,  $\beta$  è l'angolo che il tracciato forma con l'orizzontale,  $C_A$  è il coefficiente aerodinamico,  $S$  è l'area frontale del treno,  $n$  è il numero dei vagoni del convoglio,  $\alpha$  è il coefficiente inerziale delle masse rotanti e  $a(t)$  è l'accelerazione.

Nelle relazioni (2) e (4), in quanto formulazioni empiriche, la velocità è espressa in km/h, la massa in tonnellate e la resistenza in N.

Considerando anche le condizioni di frenatura elettrica rigenerativa, i valori di potenza  $P_u$  dell'unità di potenza HPU, si ricavano dalla relazione (6):

$$\begin{cases} P_u(t) = \frac{P_M(t)}{\eta_M} & a(t) > 0 \\ P_u(t) = -\eta_M \cdot P_M(t) & a(t) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

dove  $\eta_M$  è il rendimento dei motori di trazione.

L'unità di potenza HPU è stata modellata attraverso l'elaborazione di due sotto modelli inerenti la FC ed il FESS.

Il modello della FC utilizza le curve caratteristiche di corrente ed efficienza ricavate sperimentalmente al variare dei valori di potenza di una FC di tipo proton exchange membrane (PEM) con basse temperature di esercizio (60-80°C) ed adatte per applicazioni su sistemi mobili.

The power unit is modeled by considering two sub-models consisting of the FC and FESS.

The FC model is based on the current and efficiency experimental characteristics as function of the output power of a proton exchange membrane (PEM) FC with low operating temperatures (60-80 °C) that is suitable for applications on mobile systems.

The efficiency against current experimental characteristic of a single PEM fuel cell is shown in fig. 3 [29-31].

Based on the above experimental data, a FC constant efficiency  $\eta_{fc} = 0.60$  is conservatively assumed.

As regards the FESS model, the amount of useful energy can be calculated as

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} J (\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2) = \frac{1}{2} m_f r^2 k (\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2) \quad (7)$$

where  $J$  is the moment of inertia of the rotor,  $m_f$  is the rotor mass,  $r$  is the rotor radius,  $k$  is the inertial constant which depends on the rotor shape,  $\omega_{\max}$  and  $\omega_{\min}$  are the maximum and minimum values of angular speed, respectively.

Given the stored energy quadratic dependence on the rotational speed, higher speed flywheels are smaller and then more attractive for mobile applications. The high speed flywheel is suspended on magnetic bearings to reduce friction losses and placed in a partial vacuum vessel to reduce the losses due to air drag. The vacuum vessel is also a containment safety structure in the event of flywheel failure.

The flywheel power losses ( $P_L$ ) are accounted by the relation (8):

$$P_L = \delta \cdot E_K \quad (8)$$

where  $\delta$  is a constant and its value is computed so that the stored kinetic energy is reduced by 15% in one hour.

The electric traction motor is simply modeled by means of its torque and power capability, i.e. the torque/speed and power/speed limit curves. Fig. 4 shows the performance of the rail train motor considered in this study. In this case, the motor can deliver 400 kW and almost 1600 Nm as maximum values of power and torque.

#### 4. Case study

As a case study, the existing non-electrified single track railway section (23.6 km long with four stations) in the sub-urban territory of L'Aquila city was considered; it is a part of the line that connects L'Aquila to the cities of Rieti (at West) and Sulmona (at East). Currently it is served by diesel trains at very low average frequency (1 train per hour).

The line section has been redesigned for urban use by introducing seven new stations in addition to the four existing ones (fig. 5a) in order to intercept the greatest possible number of residential/service polarities and to increase the line operating frequency up to 4 trains per hour. The



La fig. 3 illustra la curva sperimentale che correla l'efficienza alla corrente di una singola FC di tipo PEM [29-31].

Poiché la FC eroga una potenza costante, il punto di operatività è scelto in modo tale da massimizzarne l'efficienza ( $\eta_{fc}$ ).

A seguito dei dati sperimentali sopra citati, un'efficienza costante ( $\eta_{fc}$ ) della FC pari 0.60 è stata cautelativamente assunta nel modello di calcolo.

Per quanto concerne il modello del FESS, l'energia utile teorica immagazzinabile in un volano è data dalla seguente relazione:

$$\Delta E_k = \frac{1}{2} J (\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2) = \frac{1}{2} m_f r^2 k (\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2) \quad (7)$$

dove  $J$  è il momento di inerzia del volano,  $m_f$  è la massa del volano,  $r$  è il raggio del volano,  $k$  è la costante inerziale che dipende dalla forma,  $\omega_{\max}$  e  $\omega_{\min}$  sono, rispettivamente, i valori di massima e minima velocità angolare.

Tanto più alta è la velocità angolare del volano quanto maggiore è l'attrattività dei FESS soprattutto per applicazioni su sistemi mobili a seguito delle ridotte dimensioni dovute al fatto che l'energia immagazzinabile cresce con il quadrato della velocità angolare. Per alte velocità, il volano, costituito da materiale composito, è sospeso nel suo asse tramite cuscinetti magnetici all'interno di un apposito contenitore depressurizzato per abbattere le perdite di attrito e le resistenze aerodinamiche. Il contenitore funge anche da elemento di sicurezza per il contenimento di eventuali rotture meccaniche del rotore.

Le perdite di potenza del volano ( $P_L$ ), durante la rotazione, sono valutate attraverso la relazione (8):

$$P_L = \delta \cdot E_K \quad (8)$$

dove  $\delta$  è una costante il cui valore è calcolato in modo che l'energia cinetica si riduca del 15% in un'ora.

Il modello del motore elettrico di trazione utilizza le curve limite coppia/velocità e potenza/velocità per determinare i valori erogabili. La fig. 4 mostra le performance del motore preso in considerazione nello studio. In questo caso, il motore eroga valori massimi di potenza e coppia rispettivamente pari a 400 kW e 1600 Nm.

corresponding driving cycle model was theoretically carried out by taking into account the following parameters: max speed of 22 m/s; max acceleration/deceleration of 0.6 m/s<sup>2</sup>, average stopping time at stations of 60 s (fig. 5b). A railway truck constant uphill slope of 13‰, that corresponds to the maximum uphill section slope of the considered railway line, has been taken into account; the curvature resistances have been neglected.

A light rail architecture based on the use of a tram-train (0.27 t/pass.) is proposed and taken into consideration; the train, whose design main data are listed in table1, is motorized according to the scheme of fig. 1.

## 4.1. Simulation and results

The LHE train has been simulated considering the reference driving cycle described in the previous paragraph. The calculation has been performed by using the numerical models, as described in section 3.

Table 2 lists the results of the main design data of power unit components.

Power train components are designed for reducing the fuel consumption and for overcoming the use of chemical batteries for traction.

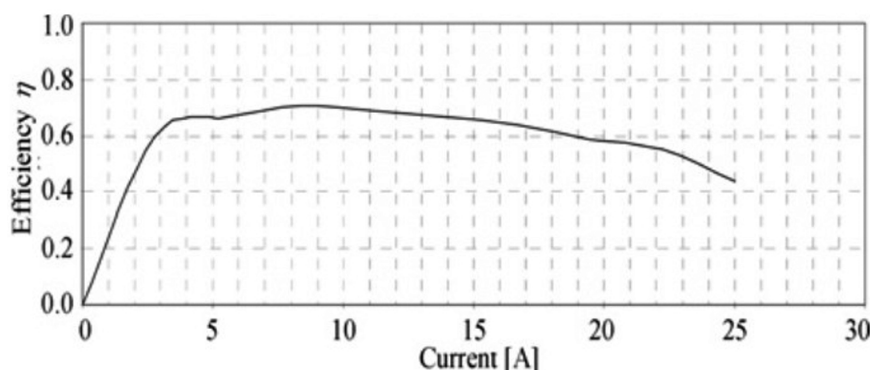


Fig. 3 - Diagramma sperimentale dell'efficienza di una FC di tipo PEM.  
Fig. 3 - Efficiency of PEM fuel cell.

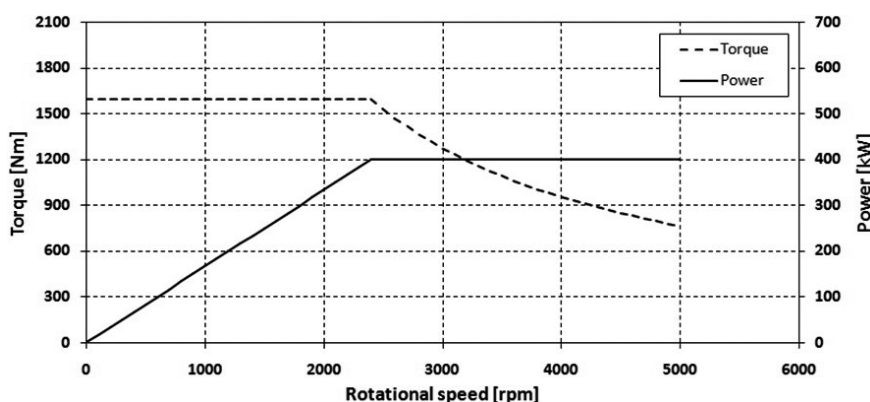


Fig. 4 - Coppia e potenza limite del motore.  
Fig. 4 - Torque and power limits of the motor.

#### 4. Caso di studio

Come caso di studio, è stato preso in esame un tratto ferroviario esistente non elettrificato (23.6 km di lunghezza con 4 stazioni) che attraversa il territorio sub-urbano di L'Aquila. Il tratto fa parte di una linea che collega le città di L'Aquila con quelle di Rieti (ad Ovest) e di Sulmona (a Est). Attualmente sulla linea vi transitano treni diesel a bassa frequenza di esercizio (mediamente un treno/ora).

Il tratto di linea ferroviaria esaminato è stato riprogettato ad uso urbano, introducendo sette nuove stazioni in aggiunta alle quattro già esistenti, così come riportato nello schema della fig. 5a. Gli obiettivi di progetto mirano ad aumentare l'accessibilità al sistema, intercettando quanto più possibile le polarità residenziali e di servizio esistenti sul territorio, e ad incrementare la frequenza di esercizio fino a 4 treni/ora. Il corrispondente diagramma del moto della tratta progettata è stato elaborato teoricamente prendendo in considerazione i seguenti parametri cinematici del treno: velocità massima di 22 m/s; accelerazione/decelerazione massima di  $0.6 \text{ m/s}^2$ , tempo di fermata medio nelle stazioni di 60 s (fig. 5b). Nell'analisi numerica, per tutta la lunghezza della tratta è stato adottato un valore di pendenza longitudinale costante pari 13‰ che rappresenta il valore massimo di livelletta del tracciato esistente. La percorrenza del convoglio è stata simulata in salita trascurando le resistenze in curva.

L'architettura di sistema del treno LHE presa in considerazione nell'analisi numerica si basa sull'uso di un convoglio leggero di tipo "tram-treno" (0.27 t/pass.) le cui caratteristiche principali di progetto sono elencate in tabella 1; l'apparato moto-propulsivo del convoglio segue lo schema illustrato in fig. 1.

##### 4.1. Simulazione e risultati

La percorrenza del convoglio LHE sulla tratta ferroviaria presa in esame, illustrata nel paragrafo precedente, è stata simulata attraverso l'uso dei modelli numerici descritti nel paragrafo 3.

La tabella 2 elenca i risultati del dimensionamento dei principali componenti dell'unità di potenza HPU.

Il sistema propulsivo è stato progettato per ridurre il consumo di carburante e per ovviare l'uso delle batterie chimiche ai fini della trazione.

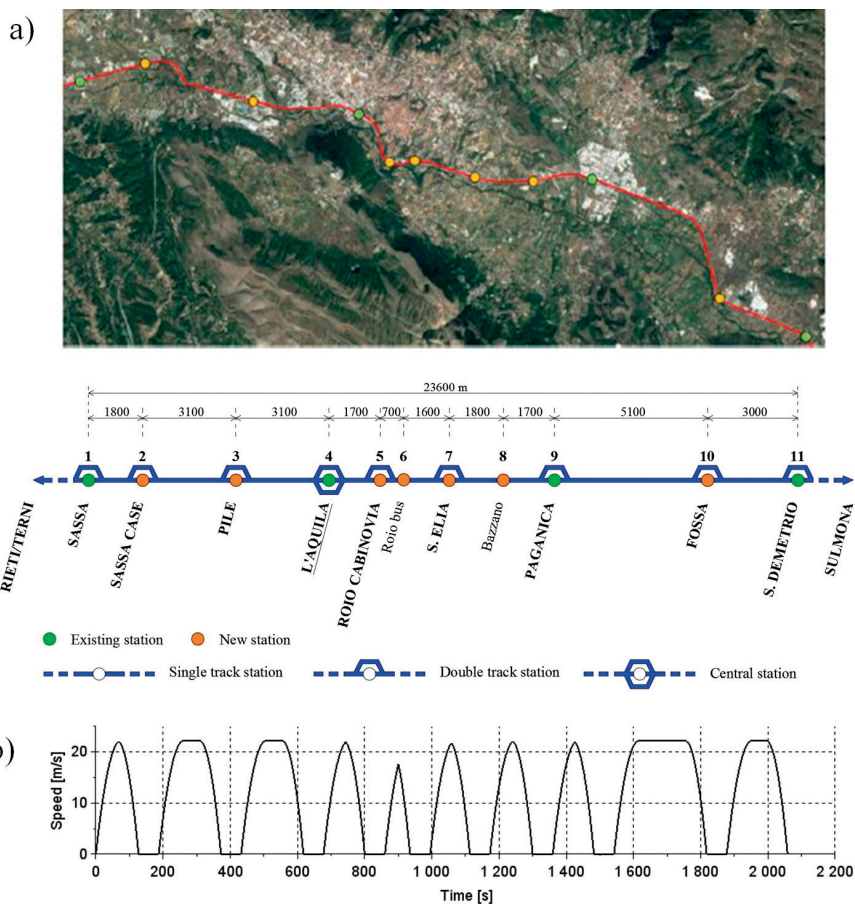


Fig. 5 - Linea ferroviaria riprogettata: a) schema della linea; b) diagramma del moto.

Fig. 5 - Redesigned railway line: a) line scheme; b) driving cycle.

The results illustrate that each side rail car has a traction motor of 400 kW fed by a power unit essentially composed of a FC of 110 kW and a set of four FESS (with 26.65 MJ of total energy storage capacity and 270 kW of peak power).

Fig. 6 shows the speed and acceleration values that the LHE train actually reaches (continuous green lines) compared to the reference ones (dotted black lines). It can be seen that the LHE convoy is able to follow the reference driving cycle with good approximation.

The power values vs time of the traction motors, FC, FESS and auxiliary batteries computed by means of the system model are shown in fig. 7. The graphs highlight that the FC provides a constant power while the FESS handles the transient loads. Additionally, when the motors power is not requested, the FC recharges the FESS or the auxiliary batteries when the FESS is fully charged. The results show that a downsized FC (220 kW) can be used, with the advantage of reducing hydrogen consumption, costs and on board mass.

Fig. 8 shows the flywheel rotational speed of FESS that varies between 20,000 and 60,000 rpm.



I risultati mostrano che ogni automotrice è dotata di un motore di trazione da 400 kW alimentato da un'unità di potenza composta da FC di 110 kW ed un gruppo costituito dall'aggregazione funzionale di quattro FESS (per un totale complessivo di 26.65 MJ di energia immagazzinabile e 270kW di potenza di picco).

La fig. 6 illustra i grafici dei valori di velocità e di accelerazione effettivamente conseguiti del treno (linea verde continua) durante la percorrenza della tratta esaminata sovrapposti ai grafici del diagramma del moto di riferimento (linea punteggiata nera). La comparazione evidenzia come la percorrenza del treno LHE rispetti con una buona approssimazione l'input del diagramma del moto assegnato.

I grafici dei valori di potenza dei motori di trazione, della FC, dei FESS e delle batterie ausiliarie, sono illustrati in fig. 7. L'analisi dei grafici evidenzia che la FC eroga potenza costante mentre i FESS gestiscono le variazioni di carico. Inoltre, quando non è richiesta la potenza di trazione, la FC supporta energeticamente i FESS e, solo dopo la loro completa ricarica, anche le batterie ausiliarie.

I risultati mostrano che le FC generano una potenza costante di soli 220 kW, con il vantaggio di ridurre il consumo di idrogeno, i costi e la massa a bordo.

La fig. 8 illustra che la velocità rotazionale dei volani dei FESS varia tra 20,000 e i 60,000 gpm.

La fig. 9 mostra i grafici dell'energia delle componenti del sistema moto-propulsivo. I risultati evidenziano che l'energia di trazione necessaria al treno per percorrere un ciclo di marcia è pari a 358 MJ. La FC fornisce 450 MJ di energia mentre il gruppo FESS recupera attraverso la frenatura rigenerativa 98 MJ (circa il 21% dell'energia necessaria alla percorrenza di un ciclo di marcia). Il surplus di energia (23 MJ) generato dall'unità ibrida di potenza (HPU) viene usato per ricaricare le batterie ausiliarie.

La fig. 10 illustra il grafo orario del treno LHE propulso dall'unità di potenza considerata.

4.2. Confronto dei consumi e delle emissioni

In questo paragrafo si procede alla stima del consumo di idrogeno del treno LHE. Conoscendo il valore del potere calorifico inferiore  $H_i$  dell'idrogeno (119.9 MJ/kg) [32], il consumo di carburante, espresso in termini di massa, necessario per percorrere un ciclo di marcia (23.6 km) lungo il percorso considerato, è così calcolato:

$$m_{H_2} = \frac{E_e}{\eta_{fc} \cdot H_i} = \frac{450}{0.6 \cdot 119.9} = 6.3 \text{ kg} \quad (9)$$

dove  $E_e$  è l'energia elettrica erogata dalla FC durante il ciclo di marcia e  $\eta_{fc}$  (0.6) è l'efficienza della FC. I risultati mostrano che il consumo di carburante del treno è pari a 1.24 gH<sub>2</sub>/passeggero/km.

TABELLA 1 – TABLE 1

Dati di progetto del treno LHE  
Design data of the LHE train

	Simbolo Symbol	Unità Unit	
Numero di carri Number of wagons	n	-	3
Numero di vagoni ferroviari Number of rail cars		-	2
Capacità di carico Carrying capacity	N. of pass	-	215
Tara Tare		t	58
Massa lorda Gross mass	m	t	73.05
Massa per asse Axle mass	m <sub>ax</sub>	t	9.2
Wide		m	2.65
Lunghezza Length		m	37.61
Zona anteriore Front Area	S	m <sup>2</sup>	9.8
Coefficiente di resistenza aerodinamica Drag coefficient	C <sub>A</sub>	-	0.45
Potenza motore max Max motor power	P <sub>max</sub>	kW	400
Coppia massima del motore Max motor torque	C <sub>max</sub>	Nm	1600
Efficienza del motore di trazione/generatore Efficiency of traction motor/generator	η <sub>M</sub>	-	0.965
Efficienza della trasmissione Transmission efficiency	η <sub>t</sub>	-	0.93
Rapporto di trasmissione Transmission ratio		-	4.8
Coefficiente di massa inerziale rotazionale Rotational mass inertial coefficient	α	-	1.18
Raggio della ruota Radius of wheel		m	0.425

Fig. 9 shows the energy of the power-train components. It can be noted that the traction energy needed to complete the full driving cycle is 358 MJ. The FC provides 450 MJ and the set of eight FESS recovers 98 MJ (about 21% of driving cycle traction energy) through the regenerative braking. The surplus energy (23 MJ) that is generated by the HPU is used to recharge the auxiliary batteries.

Fig. 10 shows the traveled distance by the LHE train, obtained by means of the considered power-unit.

4.2. Consumption and emission comparison

In this paragraph the LHE train hydrogen consumption is estimated. By knowing the lower heating hydrogen value  $H_i$  (119.9 MJ/kg) [32], the mass of hydrogen that the LHE

Stando ai risultati dei calcoli, il quantitativo di idrogeno necessario al treno per compiere una percorrenza giornaliera di circa 300 km, abbastanza da assicurare il servizio di tipo urbano, è di circa 80kg. In tal caso, nell'ipotesi di utilizzare a bordo del treno serbatoi metallici con gas pressurizzato a 300 bar, il quantitativo di idrogeno richiesto dalla percorrenza giornaliera può essere stoccato in 8 serbatoi cilindrici (ognuno di 0.30 m di diametro interno e 8 m di lunghezza), ovvero 4 serbatoi per ogni automotrice.

A conclusione dello studio, è stata svolta un'analisi comparativa, in termini di consumo di carburante e di emissioni di CO<sub>2</sub>, tra il treno LHE proposto ed uno similare a trazione diesel. Il convoglio preso in considerazione per la comparazione è di tipo "Minuetto" (tre carrozze con 110 t di massa, capacità massima di 286 passeggeri e potenza di picco dei motori pari a 2x560 kW) il cui consumo medio di carburante è stato stimato in circa 1.83 kg<sub>diesel</sub>/km con un fattore di emissione pari a 3.175 kg di CO<sub>2</sub> /kg<sub>diesel</sub> [33].

I risultati dell'analisi comparativa, riportati in tabella 3, mostrano che, rispetto al treno diesel, il treno LHT consente di ottenere una riduzione delle emissioni locali per chilometro pari a 20.31g di CO<sub>2</sub> per passeggero trasportato, con un chiaro beneficio per l'ambiente. Conseguentemente, per una percorrenza giornaliera del treno di 300 km, si ha un risparmio di emissioni pari a 6.1kg di CO<sub>2</sub> per passeggero. Inoltre, se l'idrogeno è prodotto tramite energia rinnovabile, le emissioni globali sono nulle.

5. Conclusioni sviluppi futuri e considerazioni di R&S

In questo articolo è stata illustrata la progettazione preliminare di un innovativo treno ad idrogeno, di tipo leggero, alimentato elettricamente da un'unità ibrida di potenza costituita da celle a combustibile e da un gruppo di accumulatori energetici con volani ad alta velocità di rotazione.

La percorrenza del treno è stata

TABELLA 2 – TABLE 2

Risultati del dimensionamento delle principali componenti dell'unità di potenza  
Results of the main design data of power unit components

	#	Parametri Parameters	Simbolo Symbol	Unità Unit	
FESS	8	Rotore massa Rotor mass	$m_r$	kg	27.72
		Raggio del rotore Rotor radius	$r$	m	0.13
		Momento d'inerzia del rotore Rotor inertial moment	$J$	kgm <sup>2</sup>	0.36
		Efficienza di carica/scarica Charge/discharge efficiency	$\eta_f$	-	0.9
		Velocità del rotore Rotor speed	$n_{min}-n_{max}$	rpm	15,000-60,000
		Accumulo di energia cinetica Kinetic energy storage	$E_{max}$	MJ	6.66
		Potenza di picco Peak power	$P_F$	kW	67.5
FC	2	Efficienza Efficiency	$\eta_{fc}$	-	0.6
		Potenza Power	$P_{FC}$	kW	110

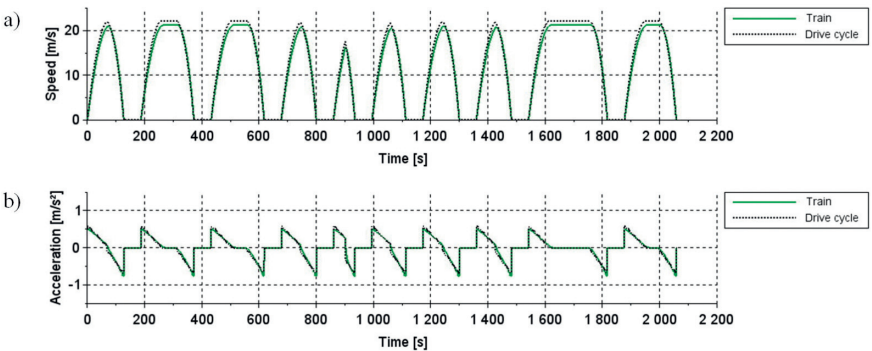


Fig. 6 - a) velocità del treno sovrapposta a quella del diagramma del moto assegnato; b) accelerazione del treno sovrapposta a quella del diagramma del moto assegnato.

Fig. 6 - a) train speed Vs driving cycle speed; b) train acceleration Vs driving cycle acceleration.

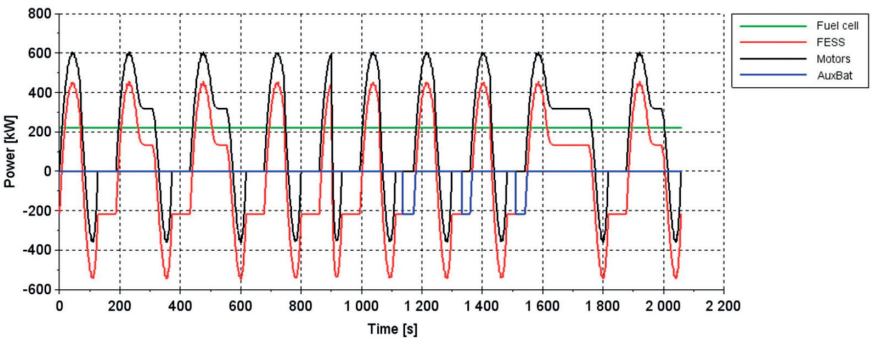


Fig. 7 - Potenza dei motori di trazione, FC, FESS e batterie ausiliarie.  
Fig. 7 - Power of traction motors, FC, FESS and auxiliary batteries.

simulata su un tratto ferroviario di linea “complementare” esistente, opportunamente riprogettata ad uso urbano, ricadente nel territorio sub-urbano della città di L'Aquila.

I risultati ottenuti mostrano che la configurazione di sistema proposta consente di ottenere consumi di carburante pari a 1.24 gH<sub>2</sub>/passengero/km sotto-dimensionando la potenza (220 kW) delle celle a combustibile e gestendo le variazioni di carico attraverso un gruppo di accumulatori energetici con volano (540 kW). Gli stessi accumulatori consentono di recuperare, attraverso la frenatura rigenerativa elettrica, un quantitativo di energia del 21%.

Inoltre l'analisi comparativa effettuata in termini di emissioni ha evidenziato che, rispetto ad un treno diesel,

train consumes along the considered driving cycle (23.6 km long) is calculated as follows:

$$m_{H_2} = \frac{E_e}{\eta_{fc} \cdot H_i} = \frac{450}{0.6 \cdot 119.9} = 6.3 \text{ kg} \quad (9)$$

where  $E_e$  is the FC electrical energy output during a driving cycle and  $\eta_{fc}$  (0.6) is the FC efficiency. The result shows a LHE train fuel consumption of 1.24 gH<sub>2</sub>/passenger/km.

According to calculation results, a train travel autonomy of about 300 km, enough to ensure a daily urban service, requires about 80 kg of hydrogen. Considering pressurized metal tanks at 300 bar to store fuel, a set of 8 cylindrical tanks (0.30 m of inner diameter and 8 m of length) must be installed on board of the train (4 tanks for each rail car).

Finally, a comparison in terms of fuel consumption and CO<sub>2</sub> emission between the LHE train and a similar diesel train has been carried out. To this purpose, the features of “Minuetto” three cars diesel train (110 t of mass, 286 passengers of carrying capacity and 2x560 kW of peak power) have been considered; an average fuel consumption of 1.83 kg/km with CO<sub>2</sub> emission factor of 3.175 kg/kg<sub>diesel</sub> has been estimated [33].

The results of comparison (table 3) highlight that the hydrogen power train solution allows a 20.31 gCO<sub>2</sub>/passenger/km local emission to be saved with a clear environmental benefit. Consequently, about 6.1 kg-CO<sub>2</sub>/passenger are saved for a train daily travel of 300 km. Moreover, if the hydrogen is produced by clean energies there is no polluting emission at all.

## 5. Conclusions, future developments and R&D considerations

The preliminary design and simulation of a light hybrid electric train powered by hydrogen fuel cell and a set of high-speed flywheel energy storage systems has been illustrated. The light-rail power train has been simulated for running over a driving cycle corresponding to a redesigned “complementary” line section (23.6 km long) in the sub-urban territory of L'Aquila city.

The preliminary numerical results have shown that a fuel consumption of 1.24 gH<sub>2</sub>/passenger per km can be achieved by downsizing the fuel cell

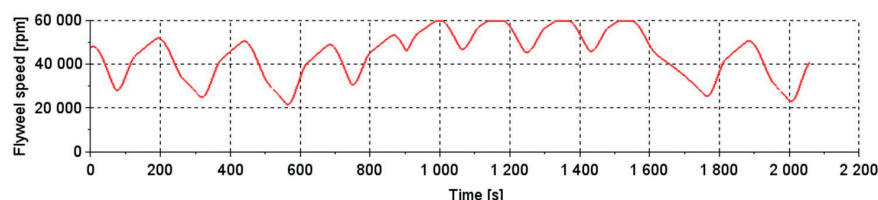


Fig. 8 - Velocità rotazionale del volano del FESS.  
Fig. 8 - Flywheel rotational speed of FESS.

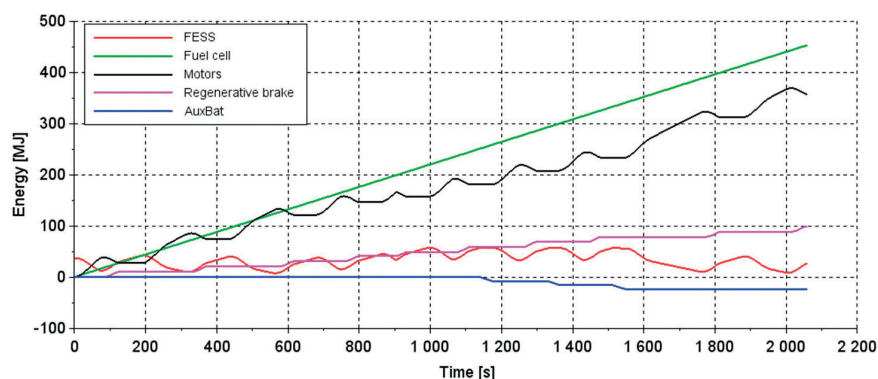


Fig. 9 - Energia dei motori di trazione, FC, FESS e batterie ausiliarie.  
Fig. 9 - Energy of traction motor, FC, FESS and auxiliary batteries.

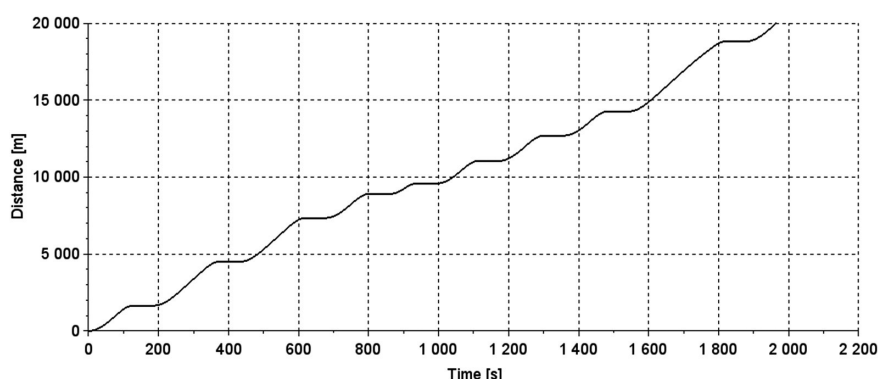


Fig. 10 - Distanza percorsa dal treno LHE in funzione del tempo.  
Fig. 10 - LHE Train distance traveled vs time.



TABELLA 3 – TABLE 3

Confronto dei consumi di carburante e delle emissioni di CO<sub>2</sub>  
*Comparison of fuel consumption and CO<sub>2</sub> emission*

Treno LHE <i>LHE train</i>		Treno diesel standard <i>Standard diesel train</i>	
Consumo di H <sub>2</sub> (gH <sub>2</sub> /passengero/km) <i>H<sub>2</sub> consumption</i> (gH <sub>2</sub> /passenger/km)	Emissioni di CO <sub>2</sub> (gCO <sub>2</sub> /passengero/km) <i>CO<sub>2</sub> emission</i> (gCO <sub>2</sub> /passenger/km)	Consumo diesel (g <sub>diesel</sub> /passengero/km) <i>Diesel consumption</i> (g <sub>diesel</sub> /passenger/km)	Emissioni di CO <sub>2</sub> (gCO <sub>2</sub> /passengero/km) <i>CO<sub>2</sub> emission</i> (gCO <sub>2</sub> /passenger/km)
1.24	-	6.4	20.31

il treno leggero ad idrogeno consente di ottenere un risparmio di emissioni pari a 20.31 gCO<sub>2</sub>/passengero/km.

In sintesi i risultati dello studio evidenziano la possibilità di ridurre i consumi energetici per la trazione veicolare e di abbattere le emissioni da traffico.

La tematica proposta ed esaminata in questo articolo si inserisce all'interno di programma di attività di ricerca, promosso ormai da tempo all'Università degli Studi dell'Aquila, incentrato sullo studio e definizione di sistemi avanzati di trasporto collettivo.

Pur se in forma preliminare, i risultati confermano che nuove opportunità tecnologiche consentono di realizzare sistemi di trasporto ecocompatibili (carbon-free) con una maggiore efficienza energetica.

Evoluzioni future a breve termine di questa specifica tematica prevedono la continuazione e l'estensione di attività propedeutiche di ricerca in laboratorio incentrate sulla realizzazione di attrezzature di prova e misura. Il tutto per ottenere, su scala ridotta, alcuni riscontri sperimentali necessari alla calibrazione dei modelli numerici con i quali simulare in modo più dettagliato le performance del sistema e delle singole componenti al variare dei parametri in gioco.

Ulteriori approfondimenti sono necessari per meglio definire il sistema e le sue componenti ed analizzare in dettaglio la filiera energetica, i costi ciclo delle componenti al fine di valutare i costi per passeggero trasportato.

Occorre però evidenziare che le sole attività di ricerca di base, pur svolgendo un ruolo centrale, non sono elementi sufficienti a realizzare innovazione di prodotto. I processi innovativi più virtuosi necessitano infatti di ingenti investimenti in conoscenza e tecnologia che si basano sull'iterazione dinamica, spesso di tipo circolare, tra le fasi di ricerca, sviluppo (prototipale-pre-industriale) ed industrializzazione.

Nel caso ferroviario, l'innovazione di sistema, indispensabile per competere in un mercato ormai globale, necessita di investimenti in R&S proporzionali al contenuto d'innovazione ed ai costi dei mezzi di trasporto e, nei casi limite, anche delle infrastrutture. Per tali motivi i processi virtuosi sopra richiamati non possono prescindere da azioni comuni e sinergiche promosse da univer-

(220 kW) and by handling the transient power by means of the flywheel energy storage system (540 kW). Such a system also allows an energy saving of about 21% to be achieved through the regenerative braking.

*The comparison between light hybrid electric train and diesel train has highlighted that the hydrogen power train solution allows a 20.31 gCO<sub>2</sub>/passenger per km emission to be saved.*

*In summary, the results of the study highlight the possibility of reducing energy consumption and polluting emissions for vehicles traction by using new technologies.*

*The subject proposed and examined in this paper is part of a research program, which has long been promoted at the University of L'Aquila, focusing on the study and definition of advanced systems of collective transport.*

*Although in the preliminary form, the results confirm that it is possible to introduce new technological opportunities in order to outline environmentally sustainable transport systems (carbon-free) with higher energy efficiency.*

*Future short-term evolutions on this specific thematic include the continuation and extension of propaedeutic research activities in laboratory focused on the realization of testing and measurement equipment. This is necessary to obtain, on a small scale, some experimental results needed to calibrate the numeric models as to simulate in detail the performance of the system and individual components as the parameters change.*

*Further insights are needed to better define the system and its components and analyze in detail the energy chain and the cycle cost of components in order to estimate the actual cost per passenger.*

*It should be emphasized that only basic research activities, while playing a central role, are not enough to get product innovation. Especially for transport systems, innovation processes require considerable investment in knowledge and technology in order to move from research, development (prototype-preindustrial) and industrialization in a circular way.*

*In the railway case, system innovation, which is indispensable to compete in a global marketplace, requires R&D investment proportional to the content of innovation, the costs of means of transport and, where needed, infrastruc-*

sità, centri di ricerca ed aziende di settore. Queste ultime, per caratteristiche e dimensione industriale, sono le sole in grado di supportare le fasi di R&S mettendo in gioco strutture, competenze ed adeguata capacità finanziaria.

Le esperienze internazionali di innovazione ferroviaria, richiamate nel testo del presente articolo, dimostrano quanto sia grande l'attenzione di alcuni player industriali, supportati da ben precise politiche nazionali, su tematiche d'avanguardia incentrate fondamentalmente sull'innovazione tecnologica mirata a ridurre i consumi energetici e l'abbattimento delle emissioni. Non vi è dubbio che, in un futuro ormai prossimo, tali prerogative possano asurgere a parametri discriminanti per la riconferma di aree di mercato o l'acquisizione di nuove, anche e soprattutto nel campo dei sistemi di trasporto collettivo di tipo urbano.

*tures too. For these reasons, the abovementioned processes need common and synergistic actions promoted by universities, research centers and companies that, by their characteristics and industrial dimension, are the only ones that can properly support the R&D phases by investing in facilities and know-how.*

*The international experiences of railway innovation, referred to in this paper, show how great is the attention of some industrial players, supported by well-defined national policies, on cutting-edge issues focused essentially on technological innovation aimed at reducing energy consumption and polluting emissions. There is no doubt that, in the near future, these prerogatives may emerge as discriminatory parameters for the reconfirmation of market areas or the acquisition of new ones, especially in the field of urban-type transport systems.*

## BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] Available at (May 11, 2017): <http://www.rfi.it>, "Istantanea sulla rete".
- [2] GIANNELLI N., CARIGLIA R., "Rinnovo della flotta: gli swing e i loro servizi", La Tecnica Professionale, N. 4, pp. 29-31, April 2016,
- [3] AEA report electric vehicles and the energy sector – impacts on European future emissions.
- [4] Available at (May 11, 2017): <http://www.fuelcellstore.com>.
- [5] MILLER A.R., PETERS J., SMITH B.E., VELEV O.A., "Analysis of fuel cell hybrid locomotives", Journal Power Sources, Vol. 157(2), pp. 855-861, 2006.
- [6] HOFFRICHTER A., HILLMANSEN S., ROBERTS C., "Conceptual propulsion system design for a hydrogen-powered regional train", IET Electrical Systems in Transportation, Vol. 6(2), pp 56-66, 2016.
- [7] Available at (May 11, 2017): <https://www.bloomberg.com> "China's Hydrogen-Powered Future Starts in Trams, Not Cars".
- [8] Available at (May 11, 2017): <http://www.railwaygazette.com>, "Qingdao opens fuel cell tram route".
- [9] Available at (May 11, 2017): <http://www.alstom.com> "Alstom unveils its zero-emission train Coradia iLint at InnoTrans".
- [10] VAN MERLO J., MAGGETTO G., LATIAIRE PH., "Which energy source for road transport in the future? A comparison of battery, hybrid and fuel cell vehicles", Energy Convers. Manage., Vol. 47, pp. 2748-2760, 2006.
- [11] PRODROMIDIS G.N., COUNTELIERS F.A., "Simulations of economical an technical feasibility of battery and flywheel hybrid energy storage systems in autonomous projects", Renew. Energy, Vol. 39, pp. 149-153, 2012.
- [12] VAN MIERLO J., VAN DEN BOSSCHE P., MAGGETTO G., "Models of energy sources for EV and HEV: fuel cells, batteries, ultracapacitors, flywheels and enginegenerators", J. Power Sources, Vol. 128, pp. 76-89, 2004.
- [13] DOUCETTE REED T., MCCULLOCH MALCOM D., "A comparison of high-speed flywheels, batteries, and ultracapacitors on the bases of cost and fuel economy as the energy storage system in a fuel cell based hybrid electric vehicle", J. Power Sources, Vol. 196, pp. 1163-1170, 2011.
- [14] EMADI, A., RAJASHEKARA, K., WILLIAMSON, S.S., et al., "Topological overview of hybrid electric and fuel cell vehicular power system architectures and configurations", IEEE Trans. Veh. Technol., Vol. 54(3), pp. 763-770, 2005.
- [15] KOSHIZUKA, N., ISHIKAWA, F., NASUB, H., et al., "Present status of R&D on superconducting magnetic bearing technologies for flywheel energy storage system", Physica C, Supercond., 378-381, Part 1, pp. 11-17, 2002.
- [16] HEARN C.S., FLYNN M.M., LEWIS M.C., et al., "Low cost flywheel energy storage for a fuel cell powered transit bus", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conf. VPPC, 9-12 September, pp. 829-836, 2007.
- [17] Available at: [http://www.ivi.fraunhofer.de/frames/images/autotram/Autotram\\_RollOut.pdf](http://www.ivi.fraunhofer.de/frames/images/autotram/Autotram_RollOut.pdf) Fraunhofer Insitut Verkehrs and Infrastruktursysteme: "AutoTram: technologie for mobility and sustainability in the future".

- [18] FLYNN, M.M., ZIRER, J.J., THOMPSON, R.C., *"Performance testing of a vehicular flywheel energy system"*, SAE World Conf., Detroit, MI, April 2005.
- [19] D'OVIDIO G.: *"Design of a hybrid power plant for city buses"*, World Electr. Veh. Assoc. J., Vol. 1, pp. 68-72, 2007.
- [20] D'OVIDIO G., MASCIOVECCHIO C., ROTONDALE A., *"Hydrogen fuel cell and kinetic energy recover system technologies for powering urban bus with zero emission energy cycle"*, IET Intelligent Transport System, pp. 573-578, June 2016.
- [21] THELEN R.F., HERBST J.D., CAPRIO M.T., *"A 2MW Flywheel for Hybrid Locomotive Power"*, IEEE Vehicular technologic conference, Orlando, Florida, USA, pp 3231-3235, 4-9 Oct. 2003.
- [22] READ M.G., SMITH R.A., C., PULLEN K.R., *"Are flywheels right for rail?"*, IJR International Journal of Railway, Vol. 2, N. 4, pp. 139-146, December 2009.
- [23] SPIRYAGIN M., WOLFS P., SZANTO F., SUN Y.Q., COLE C. NIELSEN D., *"Application of flywheel energy storage for heavy haul locomotives"*, Applied Energy, pp. 607-618, 2016.
- [24] LIY.L., ZHANG X.Z., DAI X.J., *"Flywheel energy storage system for city trains to save energy"*, Advanced Mater Res, Vol. 512, pp 1045-1048, 2012.
- [25] RUPP A., BAIER H., MERTINY P., SECANELL M., *"Analysis of a flywheel energy storage system for light rail transit"*, Energy, pp. 625-638, 2016.
- [26] JANDURA P., RICHTER A., FERKOVÁ Z., *"Flywheel energy storage system for city railway"*, International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, pp. 1155-1159, Anacapri, Italy, June 2016.
- [27] Available at (May 11, 2017): <http://www.parrypeoplemovers.com/index.htm>.
- [28] Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the council of 22 October 2014 on the deployment of alternative fuels infrastructure.
- [29] CIANCETTA, F., OMETTO, A., ROTONDALE, N., *"Analysis of PEM fuel cell-supercapacitor-battery pack system during standard cycle"*, SPEEDAM Conf., Pisa, Italy, 14-16 June 2010.
- [30] BUCCI, G., CIANCETTA, F., FIORUCCI, E., *"An automatic test system for the dynamic characterization of PEM fuel cells"*, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf., Como, Italy, 18-20 May 2004.
- [31] BUCCI, G., CIANCETTA, F., FIORUCCI, E., et al., *"An experimental approach to the modeling of PEM fuel cells in dynamic conditions"*, IEEE Powertech, Lausanne, Switzerland, 1-5 July 2007.
- [32] VOIGT C., HOELLER S., AND KUETER U., *"Fuel Cell Technology for Classroom Instruction"*, Wasserstoff-Energie-Systeme Gmb, Luebeck, 2016.
- [33] Available at (May 11, 2017): <http://info.rejseplanen.dk>, "Ecopassenger Methodology Report".