



Recupero di energia nelle ferrovie regionali a singolo binario

Energy saving in Single-Track Regional Railways

Valter DI MARIO ^(*)

Riccardo LICCIARDELLO ^(**)

Gabriele MALAVASI ^(***)

Luca RIZZETTO ^(**)

Angelo RUFINO ^(****)

Pietro VITALI ^(*****)

(<https://www.medra.org/servlet/view?lang=it&doi=10.57597/IF.03.2025.ART.1>)

Sommario - La trazione elettrica ferroviaria e la guida vincolata costituiscono elementi favorevoli alla gestione sostenibile dei sistemi di trasporto. I motori elettrici utilizzati nella trazione sono reversibili e possono trasformare facilmente energia meccanica in elettrica.

Nei sistemi di trasporto passeggeri la contemporaneità di servizi sulla stessa linea facilitano il trasferimento di energia da treno a treno.

La disponibilità di misure sperimentali durante l'esercizio ha permesso di esaminare e quantificare il risparmio energetico ottenuto con il recupero dell'energia prodotta dalla frenatura elettrodinamica.

I consumi misurati sono stati confrontati con quelli ottenuti con un modello semplificato. L'esame dettagliato della marcia di treni contemporanei ha evidenziato le fasi in cui gli avviamenti di un treno si sovrappongono alla frenatura di un altro a dimostrazione del risparmio energetico rispetto ai treni isolati.

1. Introduzione

La necessità di andare verso sistemi ecosostenibili nel campo dei trasporti interessa anche il sistema ferroviario in cui l'energia elettrica utilizzata per la trazione, rispetto ad altri tipi di energia, si presta a rendere disponibile la potenza richiesta con un alto rendimento energetico.

L'analisi delle potenze effettivamente utilizzate durante l'esercizio reale e la loro quantificazione forniscono elementi utili per definire i criteri progettuali e gestionali da utilizzare nei modelli teorici finalizzati a massimizzare l'efficienza tecnica ed economica.

Summary - Electric railway traction and constrained guidance are favourable elements for the sustainable management of transport systems. The electric motors used in traction are reversible and can easily transform mechanical energy into electrical energy.

In passenger transport systems the contemporaneity of services on the same line facilitate the energy transfer from train to train.

The availability of experimental measurements has allowed us to examine and quantify the energy savings obtained with the recovery of energy produced by electrodynamic braking.

The measured consumptions were compared with those obtained with a simplified model. The detailed examination of the running of contemporary trains highlighted the phases in which the starting of one train overlaps with the braking of another, demonstrating the energy saving compared to isolated trains.

1. Introduction

The need to move towards eco-sustainable systems in the field of transport also affects railways. The electrical energy almost always used for railway traction is better suited than other types of energy to make the required power available with high energy efficiency.

The analysis and quantification of power consumption during real operations can provide useful elements for rail system design and management, by supporting the validation of theoretical models aimed at maximizing technical and economic efficiency.

^(*) Phd.

^(**) Sapienza Università di Roma.

^(***) Sapienza Università di Roma a r.

^(****) Ferrovie Emilia Romagna s.r.l.

^(*****) Development & Innovation in Transport Systems s.r.l.

^(*) Phd.

^(**) Sapienza Università di Roma.

^(***) Sapienza Università di Roma a r.

^(****) Ferrovie Emilia Romagna s.r.l.

^(*****) Development & Innovation in Transport Systems s.r.l.

Il consumo di energia per trazione, l'uso della frenatura elettrodinamica sono stati argomenti di interesse e costantemente studiati dai ricercatori a partire dalle applicazioni dei motori elettrici nella trazione ferroviaria [1].

La letteratura scientifica affronta il tema del consumo di energia come bilancio tra l'energia necessaria per la trazione e quella disponibile per la frenatura elettrodinamica. A dimostrazione dell'interesse scientifico, nel seguito si inquadra l'argomento richiamando alcuni riferimenti bibliografici su aspetti principali del tema, tra cui stile di guida, sistemi di accumulo ed esperienze sperimentali di recupero dell'energia.

Una metodologia di analisi dei consumi energetici di treni merci e passeggeri a media e lunga distanza, caratterizzata da pochi parametri significativi, è stata proposta in [2]. I risultati ottenuti hanno dimostrato come lo stile di condotta del macchinista in relazione alla velocità ed all'istante di applicazione della forza frenante hanno sensibili effetti sui consumi energetici.

Tecniche combinate di simulazione e ottimizzazione del consumo energetico di un singolo servizio ferroviario a guida manuale con stazioni intermedie lungo una linea ad alta velocità sono proposte per valutare i consumi di energia. Vengono riportate le curve di Pareto del tempo di percorrenza e del consumo energetico di ogni tratto e un caso di studio [3].

Vari lavori si sono occupati dell'accumulo di energia a bordo mediante supercapacitori [4]. L'impiego di sistemi accumulatori di energia nell'alimentazione ferroviaria permette, oltre al recupero ottimizzato dell'energia di frenatura dei veicoli, riduzione dei picchi di potenza, stabilizzazione della tensione linea di contatto incremento della potenza di picco nel sistema in corrente continua [5].

I vantaggi sull'utilizzo di dispositivi di accumulo di energia elettrica a bordo e dispositivi di accumulo di energia elettrica a terra nei tram e nelle metropolitane sono esaminati in [6]; l'energia accumulata a terra potrebbe essere utilizzata in punti ricarica per auto elettriche e per l'alimentazione del tram.

Il ruolo dell'accumulo a volano nelle applicazioni ferroviarie è studiato in [7] esaminando l'efficienza della installazione di strutture di stoccaggio sui binari.

Parimenti sono studiate le possibilità di utilizzazione delle sottostazioni reversibili; alcuni riferimenti bibliografici sono riportati in [8].

In altro studio vengono analizzati i consumi di energia per trazione di un sistema di trasporto di tipo metropolitano, i parametri caratterizzanti e le possibilità di riduzione per contribuire ad una mobilità sostenibile [9]. Si confrontano i valori teorici con i valori effettivi dell'energia recuperata sulla base di misure effettuate sulla Metropolitana di Roma. Risultati sperimentali evidenziano come il recupero dell'energia sia influenzato sia dal programma di esercizio sia dalla distanza fra le fermate.

Traction energy consumption and recuperation of regenerative electrodynamic braking energy have been topics of interest and continuously studied by researchers since the applications of electric motors in railway traction [1].

The scientific literature addresses the energy saving topic as a balance between energy needed for traction and energy available from regenerative braking. The scientific interest is testified in the following considerations drawn from several bibliographic references, in which the topic's main aspects are addressed, including driving style, accumulation systems and experimental experience on energy recuperation.

A methodology for the analysis of energy consumption of medium and long-distance freight and passenger trains, characterized by a few significant parameters, was proposed in [2]. The results showed how the driver's driving style, particularly the choice of speed and the instant of application of the braking force, have significant effects on energy consumption.

A hybrid energy consumption simulation/optimization model was proposed for a single railway service, with manual driving and intermediate stops along a high-speed line. The Pareto curves of travel time, as well as energy consumption of each section are reported along with a case study [3].

Research work has addressed on-board energy accumulation by means of super-capacitors [4]. In addition to optimized braking energy recuperation, the use of energy accumulation systems in the railway's power supply system also enables power "peak shaving", stabilization of line voltage, and also peak power increase in direct current systems [5].

The advantages of using both on-board and wayside energy accumulation devices, the latter specifically for metro and tram applications, are examined in [6]. Wayside accumulated energy could be used in charge points for electric road vehicles as well as for the trams' power supply.

The role of flywheel accumulation in railway applications is studied in [7] by examining the efficiency of the installation of the accumulation structures installed on the tracks.

The possibilities of using reversible electrical power supply substations are also studied. Some bibliographic references are available in [8].

Another study addresses the traction energy consumption for a metropolitan railway [9]. Characteristic parameters are identified, as well as the energy-saving potential as a contribution to sustainable mobility. The theoretical values are compared with the actual energy-saving values based on measurements made on the Rome Metro. Experimental results show how energy saving is influenced both by the operations plan and the distance between stops.

Models to estimate the potential for energy saving on a rapid mass transit system are proposed in [10]. The application to a generic line with six stations and to line A of the Rome metro network shows that intervals of 120-150 s are ideal for energy saving as they allow energy transfers between accelerating and braking trains.

Modelli per stimare il potenziale di risparmio energetico su un sistema di trasporto rapido di massa vengono proposti in [10]. L'applicazione ad una linea generica con sei stazioni e alla linea A della rete metropolitana di Roma mostra che intervalli di 120-150 s sono ideali per il risparmio energetico in quanto consentono i trasferimenti tra treni in frenata e in accelerazione.

In un precedente lavoro [8] sono analizzati i consumi di energia di un sistema elettrico ferroviario, riferito soprattutto alle linee metropolitane. Sono esaminati sia i consumi delle utenze civili sia quelli della trazione in modo da evidenziare le potenze richieste e le possibilità di risparmio energetico. Per le utenze civili di stazione e di deposito non si evidenziano particolari indicazioni, tuttavia la loro quantificazione fornisce elementi per valutare il loro contributo al consumo totale e le possibilità di risparmio energetico utili per la progettazione e la gestione di nuove linee.

L'utilizzo dell'energia prodotta dalla frenatura elettrodinamica per l'avviamento di treni sulla stessa linea costituisce una concreta possibilità di risparmio energetico, ma il suo sfruttamento dipende, sia da parametri strutturali e impiantistici della linea, sia dal programma di esercizio e dal suo andamento reale. I rilievi sperimentali forniscono elementi utili per la calibrazione dei modelli teorici ed evidenziano l'effetto della distanza tra le fermate e del cadenzamento dei treni sulla possibilità di risparmio energetico [11].

In questo lavoro si vuole riprendere il tema del recupero di energia in frenatura ed esaminare e quantificare il recupero di energia da parte di altri treni sulla linea con riferimento ad una linea regionale a bassa frequenza di cui sono stati resi disponibili i rilievi sperimentali effettuati a terra e a bordo delle grandezze elettriche e cinematiche in condizioni reali di circolazione.

2. Richiami teorici

2.1. Cinematica e dinamica del moto

Il moto ideale di un veicolo ferroviario fra due stazioni di una linea ferroviaria si compone, generalmente, di tre fasi:

- fase di avviamento (fase di accelerazione partendo da fermo): in questa fase è richiesto lo sforzo di trazione massimo per vincere le inerzie dei corpi;
- fase a velocità di regime: il veicolo procede a velocità costante;
- fase di frenatura: applicando uno sforzo frenante il veicolo decrementa la sua velocità nel tempo (moto decelerato).

Segue poi la fase relativa alla sosta in stazione durante la quale il treno è fermo in stazione per permettere la discesa e la salita dei passeggeri.

Il moto reale dipende dal sistema di regolazione della

In a previous paper [8], focusing in particular on underground lines, the energy consumption of the power supply system for a railway line is analysed. The consumption of both electrical services (lighting, HVAC, etc.) and the traction system is examined in order to quantify the power required and the energy-saving potential. Station and depot facilities, no particular indications are evident. However, their quantification provides elements to assess their contribution to the total consumption and the energy-saving potential useful for the design and management of new lines.

Regenerative electrodynamic braking constitutes a concrete possibility for energy saving by feeding starting trains on the same line, but its exploitation depends on parameters characterizing structure, layout and facilities of the line, as well as the operations plan and how it is actually implemented. Real-world measurements provide useful elements for the calibration of theoretical models and highlight the effect of the distance between stops and the timing of trains on the energy saving potential [11].

In this paper, the topic of energy regeneration and energy saving is firstly summarized. Secondly, the energy saving potential by other trains on a specific regional low-frequency railway line is quantified on the basis of wayside and on board measurements of the electrical and kinematic quantities in real operating conditions.

2. Theoretical Background

2.1. Kinematics and Dynamics of Motion

The ideal motion of a railway vehicle between two stations is generally composed of three phases:

- *the starting phase (acceleration phase starting from standstill): in this phase the maximum traction force is required to overcome the inertia of the vehicle;*
- *the cruising phase: the vehicle proceeds at a constant speed;*
- *the braking phase: by applying a braking force, the vehicle decreases its speed over time (decelerated motion).*

The subsequent phase is the stop in the station, during which the vehicle is at standstill to allow passengers to board and alight.

The actual motion depends on the traction and braking force control system, that determines the values over time of acceleration and deceleration. Moreover, depending on the state of the line, intermediate accelerations, slow-downs and stops are possible.

The general equation of motion is the following:

$$T(v) - R(v) = m_{eq} \cdot \frac{dv}{dt}$$

where:

- *T(v) is the traction force at the wheel rim as a function of the train speed;*

forza di trazione e di frenatura, che determina il valore e l'andamento dell'accelerazione e della decelerazione; inoltre in funzione dello stato della linea si possono avere accelerazioni, rallentamenti o arresti intermedi.

L'equazione generale del moto è la seguente:

$$T(v) - R(v) = m_{eq} \cdot \frac{dv}{dt}$$

dove:

- $T(v)$ è la forza di trazione al cerchione funzione della velocità del treno;
- $R(v)$ è la resistenza al moto complessiva agente sul veicolo, funzione della velocità del treno;
- m_{eq} è la massa equivalente del treno;
- $\frac{dv}{dt}$ è la variazione infinitesimale della velocità rispetto al tempo.

La resistenza al moto complessiva $R(v)$ agente sul veicolo è la risultante di due componenti:

- le resistenze ordinarie: resistenze all'avanzamento del treno agenti in piano e rettilineo in funzione della velocità del veicolo (somma della resistenza al rotolamento e della resistenza aerodinamica);
- le resistenze accidentali: resistenze addizionali in presenza di livelletta e/o curve.

Dai valori degli sforzi di trazione T e di velocità v , considerando tutti i rendimenti (parti elettriche e meccaniche), è possibile calcolare il valore della potenza assorbita al pantografo per ogni punto della tratta.

Determinato il rendimento:

$$\eta = \eta_{elettrico} \cdot \eta_{meccanico}$$

il valore della potenza al pantografo P è data dall'equazione:

$$P = \frac{T \cdot v}{\eta} + P_{ausiliari}$$

Una volta calcolata la potenza al pantografo del treno in ogni punto della linea e ad ogni istante del tempo di percorrenza della linea, risulta possibile determinare il valore della corrente assorbita dal treno in funzione dello spazio e del tempo mediante la formula:

$$I(t) = \frac{P(t)}{V}$$

dove:

$I(t)$ = corrente assorbita dal treno

$P(t)$ = potenza al pantografo

V = tensione di linea

A titolo di esempio si riporta nella Fig. 1 per un treno che percorre un tratto di linea ferroviaria fra due fermate, le tracce, in funzione dello spazio, del tempo, della potenza elettrica richiesta e della potenza teoricamente disponibile in frenatura, della corrente richiesta, corrispondenti alle varie fasi del moto: avviamento, velocità costante, frenatura, sosta.

- $R(v)$ is the total motion resistance acting on the vehicle, as a function of the train speed;
- m_{eq} is the equivalent mass of the train;
- $\frac{dv}{dt}$ is the infinitesimal variation of speed with respect to time.

The total motion resistance $R(v)$ acting on the vehicle may be conventionally split into two components:

- ordinary resistances: resistances to the train's movement acting on a level and straight track as a function of the vehicle speed (sum of rolling resistance and aerodynamic resistance);
- additional resistances: the additional resistances due to the presence of a gradient and/or curves.

From the values of the traction forces T and speed v , considering all the efficiencies (i.e., of the electrical and mechanical parts), it is possible to calculate the value of the power absorbed at the pantograph in every point along the track section.

Once the efficiency has been determined:

$$\eta = \eta_{electric} \cdot \eta_{mechanical}$$

the value of the power at the pantograph P is given by the equation:

$$P = \frac{T \cdot v}{\eta} + P_{auxiliary}$$

Once the power at the train's pantograph has been calculated at each point of the line and at each instant of the line's travel time, it is possible to determine the value of the current absorbed by the train as a function of space and time using the formula:

$$I(t) = \frac{P(t)}{V}$$

where:

$I(t)$ = current absorbed by the train

$P(t)$ = power at the pantograph

V = line voltage

As an example, Fig. 1 shows, for a train travelling along a section of railway line between two stops, how time, electrical power required and theoretically available when braking, as well as the current, vary as a function of the distance travelled, corresponding to the various phases of motion: starting, constant speed, braking, stop.

The curves of power, current and time are qualitative and depend on the traction and braking control system.

During the starting and cruising phases, the absorbed power is positive, i.e. supplied to the train to increase its speed and overcome motion resistances.

During the braking phase, absorbed power is negative, in the sense that it is made available by the train due to the regeneration enacted by the electrodynamic braking system

Gli andamenti riportati della potenza, della corrente e del tempo sono qualitativi e dipendono dal sistema di regolazione della forza di trazione e di frenatura.

Durante l'avviamento ed a velocità costante la potenza è positiva, cioè fornita al treno per aumentare la velocità e vincere le resistenze al moto.

Durante la frenatura la potenza è negativa nel senso che viene resa disponibile dal treno per effetto della frenatura elettrodinamica.

Considerando gli intervalli di tempo t_i in cui la corrente I_i è attiva e può considerarsi costante, i valori medi della corrente I_m e della potenza P_m richiesta da fermata a fermata sono dati da:

$$I_m = \frac{\sum_i (I_i \cdot t_i)}{\sum_i t_i}$$

$$P_m = V \cdot I_m$$

In modo analogo può essere calcolata la potenza media richiesta dal treno per percorrere una tratta con fermate intermedie (Fig. 2).

In presenza di più treni lungo la tratta, servita da una sottostazione, la somma delle potenze medie di ciascun treno P_{mj} fornisce il riferimento per la potenza della sottostazione P_{SSE} .

$$P_{SSE} = \sum_j P_{mj} = \sum_j V \cdot I_{mj}$$

La potenza media disponibile durante la frenatura dipende dall'energia iniziale posseduta dal treno, cioè l'energia cinetica corrispondente alla velocità v_f di inizio frenatura ed il tempo di frenatura t_f :

$$P = \frac{\frac{M \cdot v_f^2}{2}}{t_f}$$

con M massa del treno.

L'energia prodotta, dedotta quella corrispondente alle perdite per le resistenze al moto durante il rallentamento, e quindi la potenza elettrica recuperabile, può essere utilizzata:

- 1 direttamente dal treno per gli ausiliari di bordo;
- 2 mediante il trasferimento ad altri treni della linea che si trovano in fase di trazione;
- 3 attraverso il trasferimento alla rete

The possibility of using kinetic energy to regenerate electrical energy is enabled by the electrodynamic braking system during the braking phase. In other words, the asynchronous traction motors are used as electric generators.

Considering the time intervals t_i in which the current I_i is

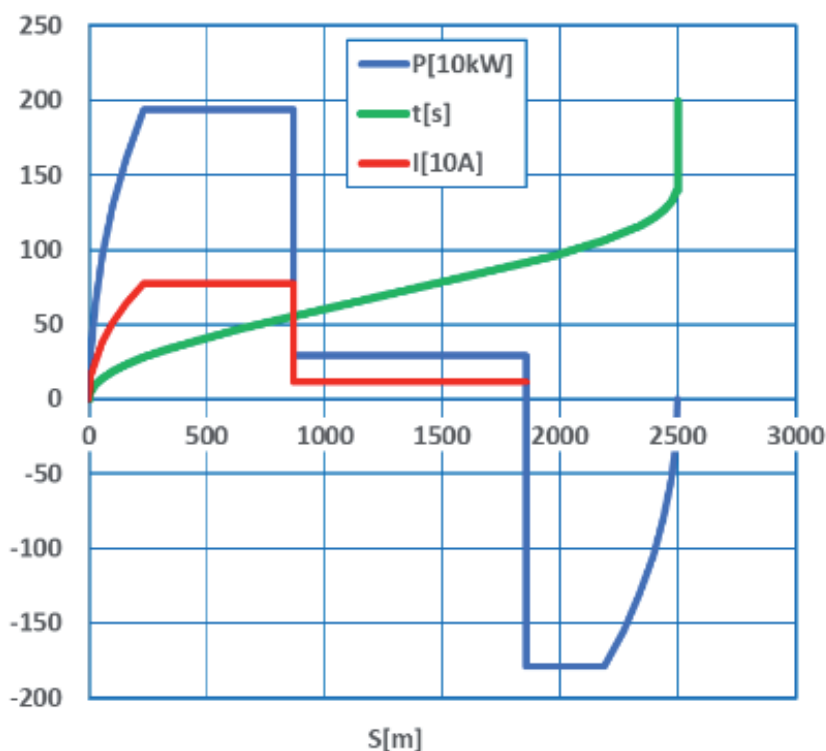


Figura 1 - Tempo t , potenza elettrica P , corrente I in funzione dello spazio s per un treno che si muove da fermata a fermata.

Figure 1 - Time t , electrical power required P , current I as a function of distance s for a train moving from stop to stop.

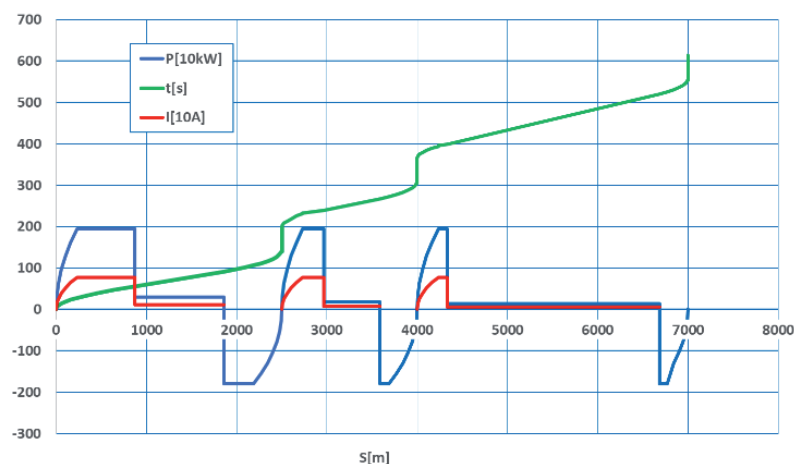


Figura 2 - Tempo t , potenza elettrica P , corrente I in funzione dello spazio s per un treno che percorre una tratta con fermate intermedie.

Figure 2 - Time t , electrical power required P , current I as a function of distance s for a train traveling a section with intermediate stops.

di alimentazione elettrica e quindi ad altre utenze ad essa collegate;

- 4 mediante l'accumulo con possibilità di riutilizzo, in momenti diversi da quelli in cui viene prodotta, sia a bordo dei treni sia negli impianti fissi.

In caso contrario essa deve essere smaltita sotto forma di calore attraverso le resistenze di bordo e ceduta all'ambiente.

Il trasferimento dell'energia prodotta durante la frenatura ad altri treni della linea che si trovano in fase di trazione, richiede che i motori funzionanti da generatori siano posti nelle condizioni di trasferire la potenza elettrica prodotta alla linea di contatto [9].

Detta E_o la tensione a vuoto della sottostazione ed E_r la tensione del treno in frenatura, gli effetti del recupero sono tanto maggiori quanto maggiore è la differenza $E_r - E_o$, con E_r al limite uguale alla massima tensione E_m della linea di contatto.

Consideriamo ad esempio la condizione di una sola Sottostazione Elettrica (SSE) con due treni nella tratta da essa alimentata (Fig. 3).

La relazione che regola la possibilità di recupero di energia e quindi l'eventuale utilizzo da parte di altri treni è data da:

$$E_r \geq E_o + r \cdot X_{rs} \cdot I'$$

con

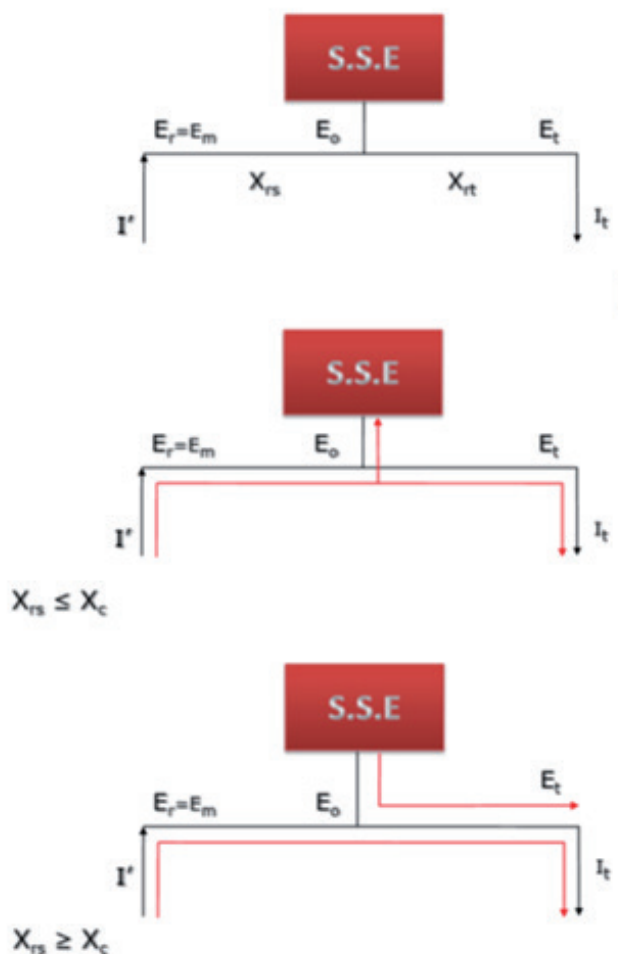
- E_r tensione al pantografo del treno in frenatura;
- E_t tensione al pantografo del treno in trazione;
- E_o tensione a vuoto della SSE;
- E_m tensione massima ammessa in linea;
- I_t corrente del treno in trazione;
- I' corrente del treno in frenatura;
- X_{rs} distanza dalla SSE del treno in frenatura;
- X_{rt} distanza dalla SSE del treno in trazione;
- r resistenza elettrica per unità di lunghezza della linea.

Esiste pertanto una distanza (resistenza) critica X_c tale che:

- se X_{rs} è inferiore alla distanza critica, si ha $E_r > E_o$ (caso al centro in Fig. 3);
- se X_{rs} è maggiore della distanza critica si ha più o meno recupero di energia ed il treno in trazione potrà ricevere più o meno energia sia dal treno in recupero che dalla SSE (caso in basso in Fig. 3).

Per aumentare questa distanza critica (diminuire nel complesso la resistenza elettrica), si agisce, normalmente, sulla linea di contatto aumentando la sezione.

Il valore della potenza recuperata può essere superiore a quella richiesta dal treno in trazione e quindi il surplus di energia deve essere dissipato o, come detto, recuperato



(Fonte – Source: [9])

Figura 3 - Distanza critica per il recupero di energia
Figure 3 - Critical distance for energy saving.

active and can be considered constant, the average values of the current I_m and the power P_m required from stop to stop are given by:

$$I_m = \frac{\sum_i (I_i \cdot t_i)}{\sum_i t_i}$$

$$P_m = V \cdot I_m$$

Similarly, the average power required by the train to travel a section with intermediate stops can be calculated (Fig. 2).

In the presence of several trains along the section, served by a single substation, the sum of the average powers of each train P_{mj} provides the reference for the substation power P_{SSE} :

$$P_{SSE} = \sum_j P_{mj} = \sum_j V \cdot I_{mj}$$

The average power available during braking depends on the initial energy possessed by the train, i.e. the kinetic en-

in altro modo ad esempio rinviato in rete tramite SSE reversibile o accumulata nella stessa SSE.

2.2. Fabbisogno di energia da fermata a fermata

L'energia necessaria per il movimento di un treno da fermata a fermata, in prima approssimazione, può essere calcolata considerando l'energia cinetica corrispondente alla velocità massima raggiunta e l'energia necessaria per vincere le resistenze al moto.

Essa può essere espressa dalla seguente equazione:

$$E = \frac{M}{2} \cdot v_{max}^2 + \int_{s_1}^{s_2} Mg \cdot r(s) \cdot ds$$

dove

- M = massa del convoglio;
- g = accelerazione di gravità;
- v_{max} = velocità massima raggiunta;
- $r(s)$ resistenza specifica al moto in piano e rettilineo;
- s_2-s_1 = distanza tra fermata e fermata.

La resistenza specifica al moto in piano e rettilineo può essere calcolata nell'ipotesi di un diagramma di marcia tipo con accelerazione a e decelerazione d costanti e uguali (figura 4). Il calcolo della quota di energia dovuta alle resistenze al moto, considerando le velocità esaminate pari a 60, 80 e 100 km/h, è stato effettuato nella fase di avviamento con riferimento alla velocità media.

Nella Fig. 5 sono riportate le energie teoriche calcolate in funzione della lunghezza della tratta assumendo

- $M = 166t$;
- $r = 2,4 + 0,0004v^2$ con v in km/h;

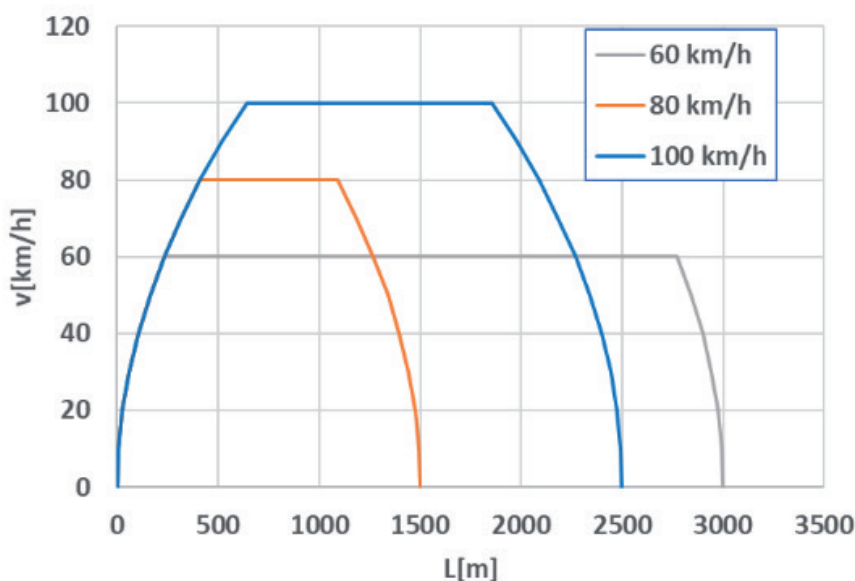


Figura 4 - Diagramma di marcia tipo.
Figure 4 - Reference speed profile.

energy corresponding to the speed v_f at the start of the braking phase, and the braking time t_f :

$$P = \frac{\frac{M \cdot v_f^2}{2}}{t_f}$$

with M being the mass of the train.

The net energy produced, i.e., subtracting that due to losses and motion resistances during the deceleration, and therefore the regenerated electrical power, can be used:

1. directly by the train for on-board auxiliary electrical systems;
2. by transferring it to other trains on the line that are in the traction phase;
3. through the transfer to the electrical power supply network and therefore to other users connected to it;
4. through storage with the possibility of reuse, at different times from those in which it is produced, both on board trains and in fixed installations.

If the above uses are not possible, then the energy must be dissipated as heat by means of the on-board resistors and released into the environment.

The transfer of energy produced during braking to other trains on the line that are in the traction phase, requires that the motors operating as generators are placed in conditions to transfer the electrical power produced to the contact line [9].

Let E_o be the no-load voltage of the substation and E_r the maximum voltage allowed for the train in regenerative braking. The greater the difference $E_r - E_o$, with E_r at the limit equal to the maximum contact line voltage E_m - the greater are effects of the regenerative braking.

Consider, for example, the condition of a single Electrical Substation (SSE) feeding two trains (Fig. 3).

The relationship that governs the regeneration potential and therefore its possible use by other trains is given by:

$$E_r \geq E_o + r \cdot X_{rs} \cdot I'$$

with

- E_r pantograph voltage of the regenerating train;
- E_t pantograph voltage of the traction train;
- E_o no-load voltage at the Electrical Substation;
- E_m maximum contact line voltage;
- I_t traction current;
- I' regenerated current;

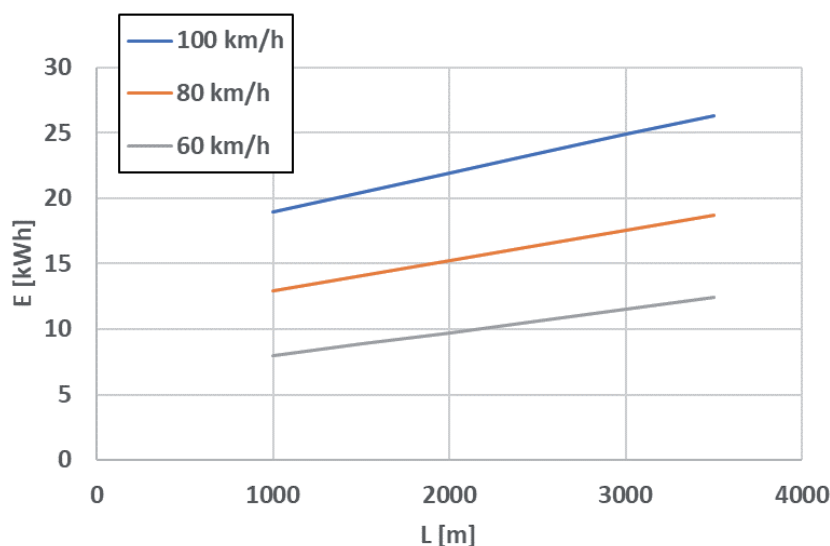


Figura 5 - Energia teorica in funzione della lunghezza della tratta per velocità massime pari a 60, 80, 100 km/h.

Figure 5 - Theoretical energy as a function of section length for maximum speeds of 60, 80, 100 km/h.

- accelerazione = 0,6 m/s²;
- decelerazione = 0,6 m/s².

In prima approssimazione sono state trascurate le resistenze dovute alla gravità sia per il valore ridotto delle pendenze sia per la presenza di pendenze positive e negative che si invertono nei due sensi di marcia.

Il modello, pur con le semplificazioni adottate, è stato utilizzato per ottenere valori di riferimento con cui confrontare i risultati sperimentali.

3. Rilievi sperimentali

3.1. Caratteristiche tecniche linea Casalecchio Garibaldi – Vignola

Lo studio dei consumi energetici è stato sviluppato analizzando i rilievi sperimentali svolti sulla linea Bologna – Vignola, limitatamente alla tratta di pertinenza delle Ferrovie Emilia Romagna (FER), tra Casalecchio Garibaldi e Vignola con uno sviluppo complessivo di circa 23,5 km (Tab. 1).

La maggior parte delle pendenze è contenuta nella fascia +25‰, - 15‰ (Fig. 6). Nella tratta Crespellano – Savignano, oggetto di analisi, in un verso sono leggermente preponderanti le pendenze positive che diventano negative nel verso opposto (±11‰).

a) Sistema di alimentazione

L'alimentazione della trazione elettrica della linea Casalecchio Garibaldi – Vignola, a binario unico è fornita dalle seguenti sottostazioni (SSE) posizionate lungo la linea:

- SSE RFI, presso la stazione di Casalecchio Garibaldi gestita da RFI;

- X_{rs} distance of the regenerating train from the Electrical Substation;
- X_{rs} distance of the traction train from the Electrical Substation;
- r electrical resistance per unit line length.

Therefore, there is a critical distance (resistance) X_c such that:

- if X_{rs} is less than the critical distance, there is recuperation $E_r > E_o$ (Fig. 3 in the centre);
- if X_{rs} is greater than the critical distance, there is more or less energy recuperation and the traction train may receive more or less energy from both the braking train and the power station (Fig. 3 below).

To increase this critical distance (i.e., decrease the overall electrical resistance), it is usual practice to increase the contact line's cross-section.

The value of the power recuperated may be greater than that required by the starting train and therefore the surplus energy must be dissipated or, as mentioned, used in different way, for example sent back to the grid via a reversible power station or accumulated in the same power station.

2.2. Energy Requirements from Stop to Stop

The energy required for the movement of a train from stop to stop, as a first approximation, can be calculated by considering the kinetic energy corresponding to the maximum speed reached and the energy required to overcome the motion resistances.

It can be expressed by the following equation:

$$E = \frac{M}{2} \cdot v_{max}^2 + \int_{s_1}^{s_2} Mg \cdot r(s) \cdot ds$$

where:

- M = mass of the train;
- g = gravitational acceleration;
- v_{max} = maximum speed reached;
- $r(s)$ specific motion resistance on a flat and straight track;
- $s_2 - s_1$ = distance between stops.

The specific motion resistance on a flat and straight track can be calculated under the assumption of a reference speed profile with constant acceleration a and deceleration d of equal value (Fig. 4). The calculation of the energy attributable to the motion resistances to motion was carried out

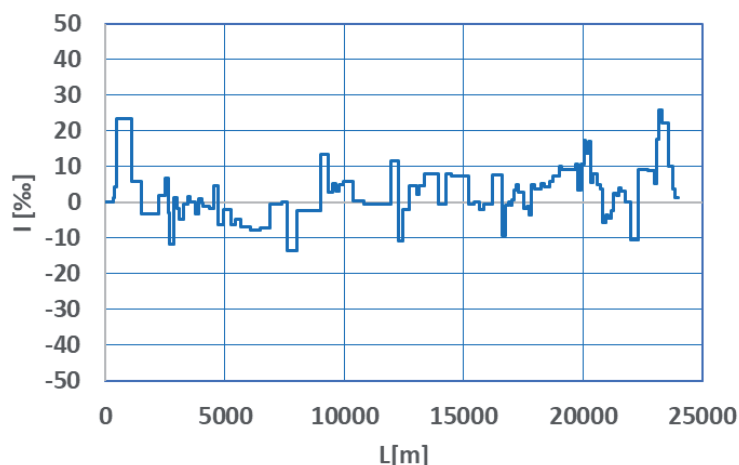


Figura 6 - Distribuzione delle livellette lungo la linea.
Figure 6 - Distribution of gradients along the line.

- SSE FER, presso la stazione di Crespellano, Via Lunga, gestita da FER;
- SSE FER, presso la stazione di Savignano gestita da FER.

Le SSE gestite da FER sono costituite dalle seguenti sezioni di media tensione MTca - MTcc:

- sezione di media tensione MT, 15 kV ca, resa ENEL;
- sezione di conversione composta da 1 trasformatore di

Tabella 1 – Table 1

Linea ferroviaria Casalecchio Garibaldi – Vignola: progressive delle fermate
Casalecchio Garibaldi – Vignola railway line: stations and their distances

“Stazione di fermata - Stations”	“Progressiva [m] - Track distance [m]”
Casalecchio Garibaldi	300
Casalecchio Ceretolo	1186
Casalecchio Palasport	2443
Riale	2929
Pilastrino	3968
Zola Pedrosa Centro	5006
Zola Pedrosa Chiesa	5734
Ponte Ronca	7486
Via Lunga	9399
Crespellano	12613
Muffa	14223
Bazzano	16867
Savignano Mulino	19921
Savignano Centro	21571
Vignola	23973

for the starting phase using its average speed, and considering three values of maximum speed: 60, 80 and 100 km/h.

Fig. 5 shows the theoretical energies calculated as a function of the section length assuming:

- $M = 166 \text{ t}$;
- $r = 2.4 + 0.0004v^2$ with v in km/h;
- acceleration = 0.6 m/s^2 ;
- deceleration = 0.6 m/s^2 .

As a first approximation, the resistances due to gravity have been neglected both due to the low value of the gradients in the case-study line, and due to the presence of positive and negative gradients which are reversed in the two directions of travel.

The model, even with the simplifications adopted, was used to obtain reference values with which to compare the experimental results.

3. Experimental Surveys

3.1. Technical characteristics of the Casalecchio Garibaldi – Vignola regional railway line

The energy consumption study was developed by analysing the measurements carried out on the Bologna – Vignola line, limited to the FER (Ferrovie Emilia Romagna) section, between Casalecchio Garibaldi and Vignola with a total length of about 23.5 km (Tab. 1).

Most of the gradients are within the $\pm 25\%$ - $\pm 15\%$ range (Fig. 6). In the analysed Crespellano – Savignano section, in one direction the positive gradients are slightly predominant. They become, of course, negative in the opposite direction ($\pm 11\%$).

a) Power supply system

The power for the Casalecchio Garibaldi – Vignola single-track line is supplied by the following power stations (SSE) positioned along the line:

- RFI SSE, at the Casalecchio Garibaldi station managed by infrastructure manager RFI;
- FER SSE, at the Crespellano- Via Lunga stations, managed by infrastructure manager FER;
- FER SSE, at the Savignano station managed by infrastructure manager FER.

The power stations managed by FER are made up of the following medium voltage sections MVAC – MVDC:

- MV section, 15 kV AC, supplied by ENEL;
- conversion section consisting of 1 dry-type transformer 3600 kW and 2 1800 kW 12-phase reaction rectifiers;

tipo a secco 3600 kW e 2 raddrizzatori a reazione do-decafase da 1800 kW;

- tensione di alimentazione lato corrente continua 3600 V;
- sezione in corrente continua composta dal complesso dei sezionatori e degli interruttori extrarapidi con i relativi pannelli di comando e controllo, per l'alimentazione della linea di contatto.

b) Linea di contatto

La linea di contatto della tratta Casalecchio Garibaldi - Bazzano è costituita da 1 corda portante di sezione $S = 120 \text{ mm}^2$ con ormeggio fisso e 2 fili di contatto da 100 mm^2 regolati automaticamente con sezione complessiva di 320 mm^2 .

Nella tratta Bazzano - Vignola la linea di contatto, è costituita da 2 corde portanti di sezione $S = 120 \text{ mm}^2$ e 2 fili di contatto da 100 mm^2 regolati automaticamente con sezione complessiva di 440 mm^2 .

c) Segnalamento

L'impianto di segnalamento è costituito, nella tratta Casalecchio Garibaldi - Bazzano dal sistema di blocco elettrico conta assi; nella tratta fra Bazzano e Vignola, gestita a spola da un sistema a blocco telefonico e blocco contassi.

Gli impianti non presenziati, vengono gestiti dal Controllo del Traffico Centralizzato presso il Dirigente Centrale Operativo della Stazione Casalecchio Garibaldi.

d) Armamento

L'armamento è di tipo 50 UNI (50 E5), bi-blocco su tutta la tratta; nella Stazione di Vignola è di tipo UNI 60 (60 E1) monoblocco.

e) Materiale rotabile

L'elettrotreno in esercizio è il FLIRT ETR350 (*Flinker Leichter Innovativer Regional-Triebzug*), treno regionale veloce, leggero ed innovativo realizzato dalla Stadler e AnsaldoBreda. Il FLIRT è un elettrotreno articolato a piano ribassato concepito per il traffico ferroviario regionale e urbano con le seguenti caratteristiche principali:

- massa del veicolo a pieno carico 189 t;
- potenza massima 2600 kW;
- potenza continuativa 2000 kW;
- sforzo di trazione all'avviamento 200 kN;
- sistema di frenatura elettrodinamica con recupero di energia.

3.2. Campagna misure

Per rilevare i consumi energetici sono stati installati due analizzatori di rete FLUKE 435 II, uno nella SSE di Savignano ed uno nella SSE di Crespellano.

Unitamente ai segnali di energia e potenza rilevati nelle SSE di Crespellano e Savignano, sono state analizzate le

- DC supply voltage 3600 V;
- DC section comprising switches and high-speed circuit-breakers with their command and control panels, supplying power to the contact line.

b) Contact line

The overhead contact line of the Casalecchio Garibaldi - Bazzano section is equipped with one messenger wire, cross-section $S = 120 \text{ mm}^2$, anchored to masts, and 2 contact wires, cross-section $S = 100 \text{ mm}^2$, automatically adjusted with a total cross-section of 320 mm^2 . In the Bazzano - Vignola section, the contact line, in the two sections, consists of 2 messenger wires, cross-section $S = 120 \text{ mm}^2$, and 2 contact wires, cross-section $S = 100 \text{ mm}^2$, automatically adjusted, with a total cross-section of 440 mm^2 .

c) Signalling

The Casalecchio Garibaldi - Bazzano section is equipped with an electric axle-counter block system. The Bazzano - Vignola section is managed as a shuttle service, with both telephone block and axle counters. Most stations are unmanned and managed by a dispatcher at Casalecchio Garibaldi station through the legacy centralized traffic control system CTC.

d) Superstructure

The rail is of the 50 UNI type (50 E5), with concrete bi-block sleepers over the entire line, except for Vignola Station which is equipped with UNI 60 (60 E1) rails and concrete monoblock sleepers.

e) Rolling stock

The Electric Multiple Unit in service is the FLIRT ETR350 (*Flinker Leichter Innovativer Regional-Triebzug*), a fast, light and innovative regional train built by Stadler and AnsaldoBreda. The FLIRT is an articulated low-floor EMU designed for regional and urban rail traffic with the following main features:

- vehicle mass at full load 189 t;
- maximum power 2600 kW;
- continuous power 2000 kW;
- starting tractive effort 200 kN;
- regenerative electrodynamic braking system.

3.2. Measurement Campaign

For the energy consumption measurements, Two FLUKE 435 II network analysers were installed, one in the Savignano SSE and one in the Crespellano SSE.

Together with the energy and power signals detected in the Crespellano and Savignano substations, the different vehicle motion phases were analysed using the time, running distance and speed data from the on-board DIS diagnostic systems.

a) Measuring equipment

varie fasi del moto dei veicoli attraverso i dati del sistema di diagnostica DIS installato sui veicoli in esercizio in termini di tempo, spazio percorso e velocità.

a) Strumentazione di misura

Gli analizzatori di rete trifase sono stati inseriti, sul quadro di MT, 15 kV, di alimentazione del gruppo trasformatore – raddrizzatore, attraverso (vedi Fig. 7):

- prese amperometriche sul cavo di alimentazione del quadro MT, 15 kVca (dotazione Fluke in rosso)
- prese voltmetriche derivate dai morsetti Tv, trasformatori voltmetrici del Quadro MT, 15 kVca.

L'analizzatore di rete ha permesso di analizzare le seguenti grandezze elettriche:

- tensione (V);
- corrente (A);
- potenza (W);
- energia (Wh);
- armoniche di tensione e corrente;
- fattore di potenza.

La combinazione delle misure di terra e di bordo ha permesso di correlare gli andamenti delle potenze e delle energie erogate dalle sottostazioni con la marcia del treno registrata a bordo.

4. Risultati

4.1. Potenza totale assorbita dai treni

La tratta su cui sono state rilevate le potenze erogate dalle sottostazioni elettriche è la tratta Crespellano – Muffa- Bazzano – Savignano M. Nel periodo dei rilievi hanno circolato 4 treni: i treni Q ed R sono andati da Crespellano a Savignano M. ed hanno effettuato fermate a Muffa e Bazzano; i treni S e T hanno percorso la stessa tratta in senso inverso ed effettuato le stesse fermate (vedi Fig. 8).

La tratta è alimentata dalle due sottostazioni elettriche

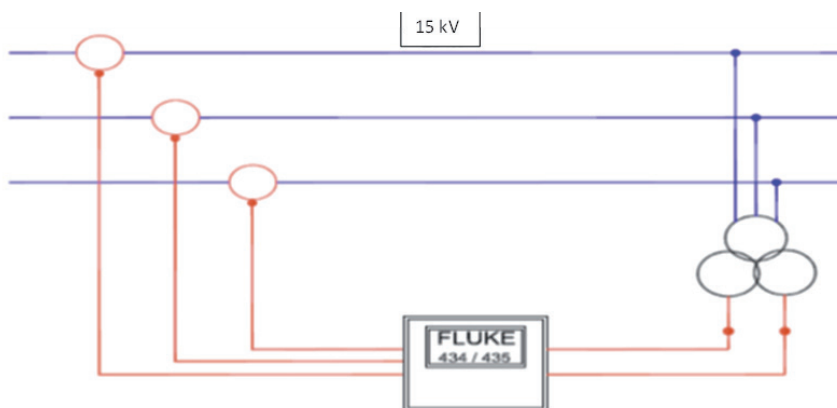


Figura 7 - Posizione degli analizzatori di rete.
Figure 7 - Position of network analyzers.

The three-phase network analysers were inserted, on the 15 kV MV panel feeding the transformer-rectifier unit, by means of (see Fig. 7):

- *current clamps on the power supply cable of the 15 kV AC MV panel (Fluke equipment in red)*
- *voltage measurements on the Tv terminals, i.e., at the voltage transformers of the 15 kV AC MV panel.*

The network analyser allowed the analysis of the following electrical quantities:

- *voltage (V);*
- *current (A);*
- *power (W);*
- *energy (Wh);*
- *voltage and current harmonics;*
- *power factor.*

The combination of the wayside and on-board measurements was exploited to correlate the power and energy signals measured at the substations with the train's kinematics as recorded on board.

4. Results

4.1. Total power absorbed by the trains

The substation's power supply was measured on the Crespellano – Muffa- Bazzano – Savignano M. line section. During the measurements, 4 trains were observed: trains Q and R travelled from Crespellano to Savignano M. and stopped in Muffa and Bazzano. Trains S and T travelled the same route in the opposite direction and made the same stops (see Fig. 8).

The section is powered by the two electrical substations of Crespellano (Pc) and Savignano (Ps). The trains made all the stops.

Fig. 9 shows, as a function of time, the sum of the powers supplied by the two substations in the observation period.

Trains Q and T travelled the line section in two successive periods of time. In the period in which train Q was running, only the Crespellano substation was active. In the period in which train T was running, both substations were active.

Trains R and S circulated simultaneously in opposite directions in an intermediate period between those of trains Q and T. During this time, the line section was powered by the two substations.

The rise and fall of observed power as a function of time closely matches the power absorption by the trains, corresponding to the motion phases: the

di Crespellano (Potenza Pc) e di Savignano (Potenza Ps).

Nella Fig. 9 è riportata, in funzione del tempo, la somma delle potenze erogate dalle due sottostazioni nel periodo in cui hanno circolato i 4 treni.

I treni Q e T hanno circolato nella tratta in due periodi di tempo successivi: nel periodo in cui ha circolato il treno Q era attiva solo la sottostazione di Crespellano; nel periodo in cui ha circolato il treno T erano attive entrambe le sottostazioni.

I treni R ed S hanno circolato contemporaneamente in versi opposti in un periodo di tempo intermedio tra quelli dei treni Q e T, in cui la tratta era alimentata dalle due sottostazioni.

L'andamento della potenza in funzione del tempo evidenzia gli assorbimenti di potenza da parte dei treni durante le fasi del moto: i picchi sono relativi alle fasi di avviamento, i valori bassi o quasi nulli sono relativi alle fasi di velocità costante o sosta.

Sono evidenti tre periodi di assorbimento di potenza, da attribuire alla circolazione dei treni sulla tratta, intervallate da periodi di assorbimento quasi nullo, da attribuire ad assenza di treni.

La potenza erogata dalle sottostazioni è stata utilizzata nel primo periodo dal solo treno Q, nel periodo intermedio contemporaneamente dai treni R ed S e nell'ultimo periodo dal solo treno T.

Le potenze relative ai due treni che hanno circolato singolarmente, primo e terzo periodo, sono molto simili tra loro e sono inferiori a 2.000 kW: i due treni hanno percorso la stessa tratta con fermate intermedie, in senso opposto ed in periodi differenti. Le differenze tra i due treni possono dipendere dall'andamento plano-altimetrico dei due versi di percorrenza e dal servizio svolto: presenza dei viaggiatori, tempi di sosta alle fermate, ecc.



Figura 8 - Diagramma di marcia dei treni analizzati.
Figure 8 - Space-time diagrams for the observed trains.

peaks are related to the starting phases, the low or almost zero values are related to the cruising or stop phases.

Three periods of power absorption are evident, attributable to the presence of trains running along the line. In between, the periods with almost zero absorption are attributable to the absence of trains.

The power supplied by the substations was used in the first period by train Q alone, in the intermediate period simultaneously by trains R and S, and in the last period by train T alone.

The power signals corresponding to the two trains running alone, i.e., the first and third period, are very similar and lie below 2000 kW: the two trains travelled the same route with intermediate stops, in the opposite direction and at different times. The observable differences between the two trains may depend on the different track alignment features in the two travel directions and on the service performed: presence of passengers, stopping times, etc.

In the central period, the peaks become more frequent and, in a few cases, attain values much higher than the rest (about 3000 kW). This depends on starting and braking phases of the two trains overlapping or not, i.e. occurring at the same time or not. In the case of an overlap, the exchange

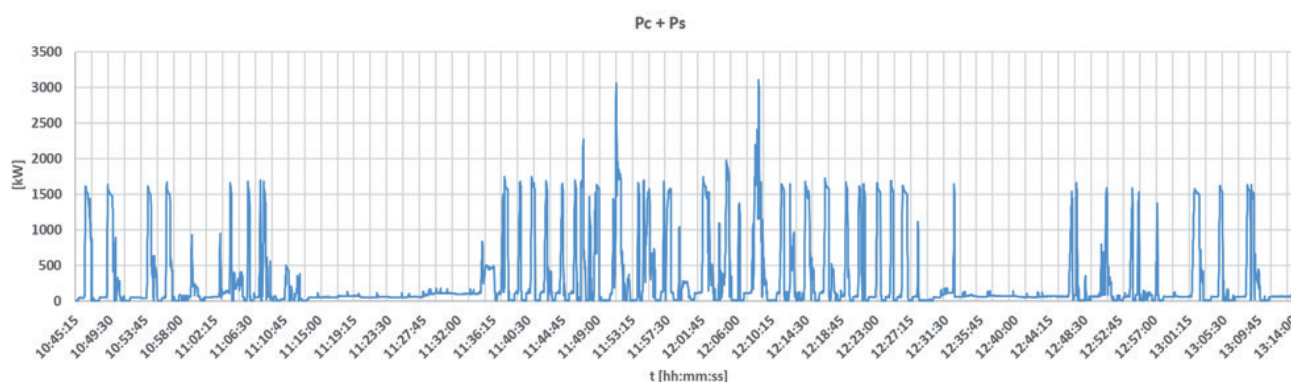


Figura 9 - Potenza totale assorbita dalle due sottostazioni, Pc + Ps, in funzione del tempo.
Figure 9 - Total power absorbed by the two substations, Pc + Ps, as a function of time.

Nel periodo centrale i picchi diventano più frequenti e in pochi casi molto alti (intorno a 3.000kW): ciò dipende dallo sfasamento o dalla contemporaneità delle fasi di avviamento dei due treni e dall'eventuale scambio di potenza da parte di un treno in frenatura verso un treno in avviamento.

Al fine di analizzare i consumi di energia e gli eventuali recuperi dovuti a trasferimento di energia tra treni è stato ricavato dai rilievi il consumo di energia su una stessa tratta nel caso di treno circolante senza la presenza di altri treni, treno isolato, e nel caso di treno circolante insieme ad un altro treno, treni contemporanei.

I casi esaminati sono i seguenti:

- treno Q da Crespellano a Savignano M. senza altri treni;
- treno R da Crespellano a Savignano M. nello stesso periodo del treno S;
- treno S da Savignano M. a Crespellano nello stesso periodo del treno R;
- treno T da Savignano M. a Crespellano senza altri treni.

Le potenze erogate dalle sottostazioni corrispondono a quelle assorbite dal singolo treno solo se sulla tratta circola un solo treno (caso dei treni Q e T). In presenza di più treni (caso dei treni R ed S) le potenze erogate corrispondono a quelle totali assorbite dai due treni.

Per analizzare i consumi di energia e gli eventuali recuperi si sono confrontati i consumi complessivi dei due treni circolanti singolarmente (treni Q e T) con quelli complessivi dei due treni circolanti contemporaneamente (treni R ed S).

4.2. Treni isolati

Il treno Q ha percorso la tratta Crespellano – Savignano M. di lunghezza L pari a 7.309m, senza la presenza di altri treni. Gli andamenti in funzione del tempo, della velocità e della potenza assorbita dal treno, registrata nella sottostazione sono riportati nelle Fig. 10 e Fig. 11. In tale periodo era attiva solo la sottostazione di Crespellano che ha erogato la potenza P_c . Il treno sosta nelle due stazioni intermedie e compie un ulteriore rallentamento intermedio fino all'arresto e poi riparte.

La potenza registrata dalla sottostazione dipende dalle fasi di moto e di sosta del treno; nel confronto va osservato che:

- i due sistemi di registrazione di terra e di bordo fanno riferimento a basi dei tempi indipendenti e con diversi livelli di dettaglio;
- l'assorbimento di potenza può essere sfasato rispetto al moto del treno per effetto delle inerzie meccaniche ed elettriche;
- la potenza registrata dalle sottostazioni è quella complessiva per la trazione e per i servizi di bordo.

of electrical power between starting and braking trains is possible.

In order to analyse the energy consumption and any recuperation due to energy transfer between trains, the energy consumption measurements on the observed line section were analysed separately for the two cases of a train running alone (isolated train) and two trains running simultaneously (simultaneous trains).

The cases examined are the following:

- *train Q from Crespellano to Savignano M. running alone;*
- *train R from Crespellano to Savignano M. at the same time as train S;*
- *train S from Savignano M. to Crespellano at the same time as train R;*
- *train T from Savignano M. to Crespellano running alone.*

The power supplied by the substations corresponds to that absorbed by the single train only for isolated trains (case of trains Q and T). With simultaneous trains (case of trains R and S) the power supplied by the substations corresponds to the total power absorbed by the two trains.

To investigate the energy saving potential, the overall consumption of the two trains running in isolation (trains Q and T) was compared with that of the two trains running simultaneously (trains R and S).

4.2. Isolated trains

Train Q travelled the Crespellano – Savignano M. section of length $L = 7309\text{m}$, in isolation. Fig. 10 and Fig. 11 show the on-board speed measurements and the wayside power measurements as a function of time. In this period, only the Crespellano substation was active and supplying power P_c . The train stops in the two intermediate stations, and also performs a third intermediate slow-down and stop before starting again.

The power recorded at the substation depends on the train's motion and stop phases. When comparing the two plots it should be noted that:

- *the two wayside and on-board recording systems refer to independent time bases and with different levels of detail;*
- *power absorption may be out of phase with respect to the train's motion due to mechanical and electrical inertia;*
- *the power recorded at the substations is the overall power for traction and for on-board auxiliary services;*
- *the speed profile and the consequent absorbed power on any given line section may vary from train to train on account of driving style, state of traffic and line, stop durations, etc.*

During the braking phase, line voltage increases due to electrodynamic braking. The train could provide usable energy if the contact line were receptive due to other trains requiring energy. Otherwise, the energy is dissipated in the

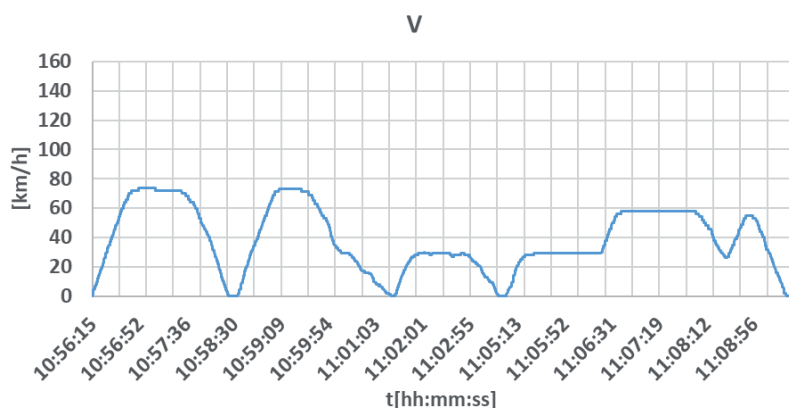


Figura 10 - Velocità registrata a bordo del treno Q nella tratta Crespellano – Savignano M.

Figure 10 - Speed recorded on board train Q in the Crespellano – Savignano M. section.

- L'andamento della velocità ed i conseguenti assorbimenti di potenza sulla stessa tratta possono variare da treno a treno in funzione delle modalità di guida, stato della circolazione e della linea, durata delle soste, ecc.

Nella fase di frenatura la tensione di linea aumenta per effetto della frenatura elettrodinamica: il treno potrebbe fornire energia utilizzabile se la linea di contatto fosse ricettiva per effetto di altri treni che richiedono energia altrimenti viene dissipata nelle resistenze di bordo. Nella Fig. 12 la tensione rilevata aumenta nella frenatura rispetto alle fasi di avviamento e velocità costante.

Il treno T ha percorso la tratta Savignano M. - Crespellano di lunghezza L pari a 7.309m, senza la presenza di altri treni. Gli andamenti in funzione del tempo, della velocità e della potenza complessiva registrata nelle due sottostazioni, Pc+Ps, sono riportati nelle Fig. 13 e Fig. 14.

Nel confronto tra l'andamento della velocità e la potenza totale assorbita si può evidenziare anche il contributo di potenza fornito dalle due sottostazioni in funzione del tempo in cui il treno si allontana da una sottostazione e si avvicina all'altra.

La potenza fornita dalle due sottostazioni è riportata nella Fig. 15.

Il rapporto tra la potenza fornita da ciascuna sottostazione e la potenza totale, in funzione del tempo, cioè della posizione del treno T lungo la tratta, calcolata solo per i picchi di cui alla Fig. 15, è riportato nella Fig. 16.

I rapporti evidenziano correttamente la distribuzione di potenza tra le due sottostazioni e gli effetti delle cadute di tensione lungo la linea aerea e delle conseguenti perdite di energia.

on-board resistances. In figure 12 the measured voltage increases during train braking, compared with the starting and cruising phases.

Train T travelled the Savignano M. - Crespellano section of length $L = 7309m$ also in isolation.

Fig. 13 and Fig. 14 show on-board speed measurements and the wayside overall power ($P_c + P_s$) measurements as a function of time.

In the comparison between the speed and power plots, the contribution of the power supplied by the two substations must also be considered as a function of the time in which the train moves away from one substation and approaches the other.

The power supplied by the substations is shown in Fig. 15.

Fig. 16 shows the ratio between the power supplied by each substation and the total power, as a function of time, i.e. of the position of the train T along the line, calculated only for the peaks referred to in Fig. 15.

The ratios correctly reflect the power distribution between the two substations and the effects of the voltage drops along the overhead line and the consequent energy losses.

The integral of the power over time provides the value of the energies E_c and E_s supplied by the two substations:

$$E_c = \int_{t_1}^{t_2} P_c(t) \cdot dt \quad E_s = \int_{t_1}^{t_2} P_s(t) \cdot dt$$

with

- t_1 instant of departure from the initial station of the section;
- t_2 instant of departure from the final station of the section;

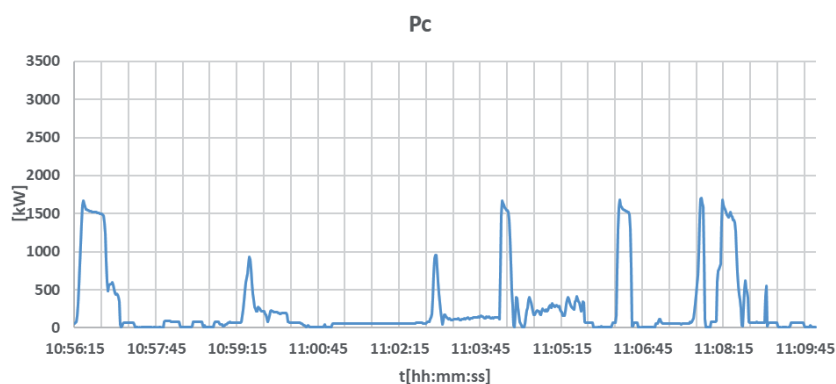


Figura 11 - Potenza registrata nella sottostazione nel periodo di percorrenza del treno Q della tratta Crespellano – Savignano M.

Figure 11 - Power recorded in the substation with train Q travelling along the Crespellano – Savignano M. section.

L'integrale della potenza in funzione del tempo fornisce il valore delle energie E_c ed E_s erogate dalle due sottostazioni:

$$E_c = \int_{t_1}^{t_2} P_c(t) \cdot dt \qquad E_s = \int_{t_1}^{t_2} P_s(t) \cdot dt$$

Essendo

- t_1 istante di partenza dalla stazione iniziale della tratta;
- t_2 istante di partenza dalla stazione finale della tratta.

Nella Tab. 2 sono riportati i dati ricavati per i due treni con:

- $\Delta t = t_2 - t_1$;
- P_{mc} = Potenza media della sottostazione Crespellano;
- P_{ms} = Potenza media della sottostazione Savignano;
- E_{tot} = Energia totale erogata dalle due sottostazioni;
- E_{km} = Energia totale erogata per chilometro di linea.

Il valore teorico del consumo di energia per chilometro, ricavato applicando il modello sopra definito, è pari a 6,62 kWh/km (Tab. 3).

La differenza rispetto al valore misurato è attribuita oltre che alle ipotesi semplificative del modello teorico anche ai consumi di energia per gli ausiliari di bordo, alle perdite meccaniche ed elettriche del sistema di alimentazione.

Ciò tuttavia costituisce un valore di riferimento, utile come ordine di grandezza per validare i risultati sperimentali ottenuti, poiché calcola l'energia richiesta dal treno nell'ipotesi semplificativa di una tratta in piano e rettilinea, di una massa intermedia tra la massima e la minima e di una velocità massima pari a quella ammessa dalla linea.

4.3. Treni contemporanei

Al fine di verificare recuperi di energia tra un treno in avviamento ed un treno in frenatura è stato esaminato il caso dei treni R ed S che percorrono contemporaneamente la tratta Crespellano – Savignano M in direzione opposta.

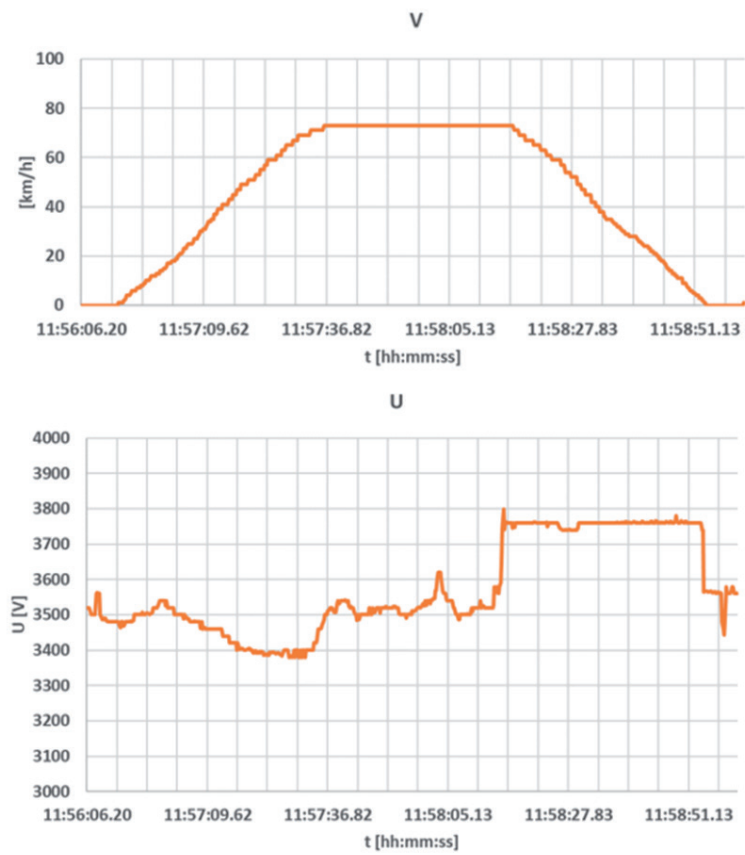


Figura 12 - Velocità V e tensione di linea U durante il moto da fermata a fermata per il treno Q.

Figure 12 - Speed V and line voltage U due train Q running between two stops.

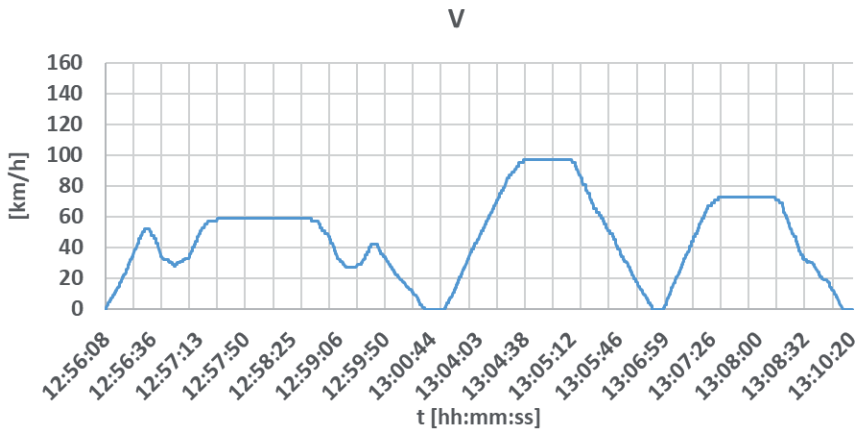


Figura 13 - Velocità registrata a bordo del treno T nella tratta Savignano M. – Crespellano.

Figure 13 - Speed recorded on board train T in the Savignano M. - Crespellano section.

Tab. 2 shows the data obtained for the two trains with:

- $\Delta t = t_2 - t_1$;
- P_{mc} = Average power of the Crespellano substation;

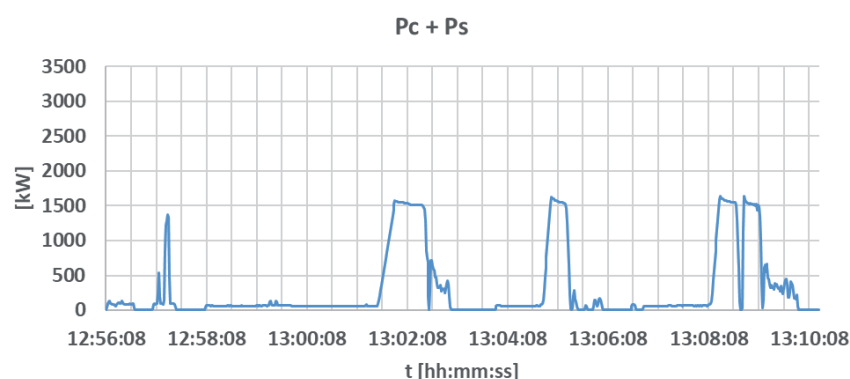


Figura 14 - Potenza complessiva registrata nelle due sottostazioni nel periodo di percorrenza del treno T della tratta Savignano M. - Crespellano.

Figure 14 - Overall power recorded at the two substations with train T travelling along the Savignano M. - Crespellano section.

I treni effettuano avviamenti e frenature, che in parte si sovrappongono con possibilità di trasferimento dell'energia prodotta dalla frenatura di un treno all'altro treno in avviamento. La potenza totale erogata dalle due sottostazioni è riportata nella Fig. 17.

Dalla potenza erogata in funzione del tempo si ottiene, in modo analogo a quanto fatto per i treni isolati, l'energia totale consumata dai due treni riportata nella Tab. 4.

Confrontando i due casi esaminati si rileva che il consumo chilometrico medio nel caso di treni contemporanei è pari a 7,65 kWh/km, inferiore a quello medio ricavato per i treni isolati e pari a 8,92 kWh/km.

Il transito del treno R insieme all'altro treno sulla tratta alimentata dalle due sottostazioni porta ad un risparmio di energia di circa 14,2%. Ciò è attribuito al trasferimento della energia prodotta dal treno in frenatura elettrodinamica all'altro treno in avviamento reso possibile dalla contemporaneità delle due fasi del moto.

- P_{ms} = Average power of the Savignano substation;
- E_{tot} = total energy supplied by the two substations;
- E_{km} = total energy supplied per line km.

The theoretical value of energy consumption per kilometre, obtained by applying the model defined above, is equal to 6.62 kWh/km (Tab. 3).

In addition to the simplifying assumptions of the theoretical model, the difference between theoretical and measured value may be explained by the energy consumption for the on-board auxiliary systems, as well as by the mechanical and electrical losses of the power supply system.

The theoretical value is, however, a useful reference value. It is valid to assess the order of magnitude and validate

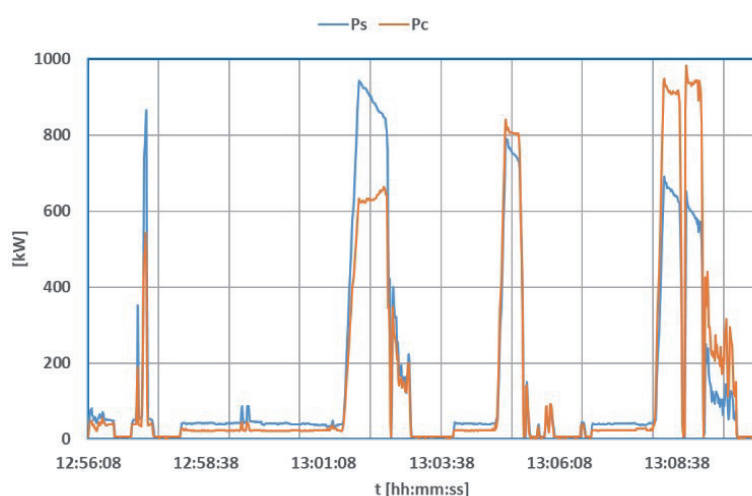


Figura 15 - Potenza di ciascuna sottostazione nel periodo di tempo del treno T da Savignano M. a Crespellano.

Figure 15 - Power of each substation in the time period of train T from Savignano M. to Crespellano.

Tabella 2 – Table 2

Potenze ed energie rilevate
Measured power and energy

Tratta Section	Treno Train	Δt [s]	P_{mc} [kW]	P_{ms} [kW]	E_c [kWh]	E_s [kWh]	E_{tot} [kWh]	L [m]	E_{km} [kWh/km]
Crespellano Savignano M.	Q	822 (822)	259,5 (259.5)	0 (0)	59,3 (59.3)	0 (0)	59,3 (59.3)	7309 (7309)	8,11 (8.11)
Savignano M. Crespellano	T	852 (852)	150,0 (150.0)	150,3 (150.3)	35,5 (35.5)	35,6 (35.6)	71,1 (71.1)	7309 (7309)	9,73 (9.73)
MEDIA AVERAGE									8,92 (8.92)

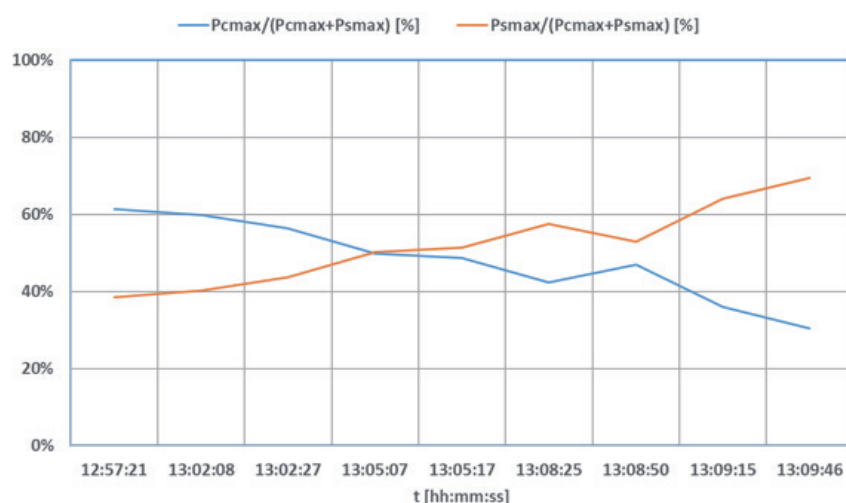


Figura 16 - Rapporto tra la potenza di ciascuna sottostazione rispetto alla potenza totale calcolata nei picchi di potenza del treno T da Savignano M. a Crespellano.

Figure 16 - Ratio between the power of each substation to the total power calculated during the power-peaks of train T running from Savignano M. to Crespellano.

Tabella 3 – Table 3

Consumo chilometrico teorico
Theoretical kilometric consumption

"Sezione di Linea - Track Sections"	Ekm [kWh/km]
Crespellano – Muffa	8,02 (8.02)
Muffa – Bazzano	9,01 (9.01)
Bazzano – Savignano M.	3,81 (3.81)
Crespellano – Savignano M.	6,62 (6.62)

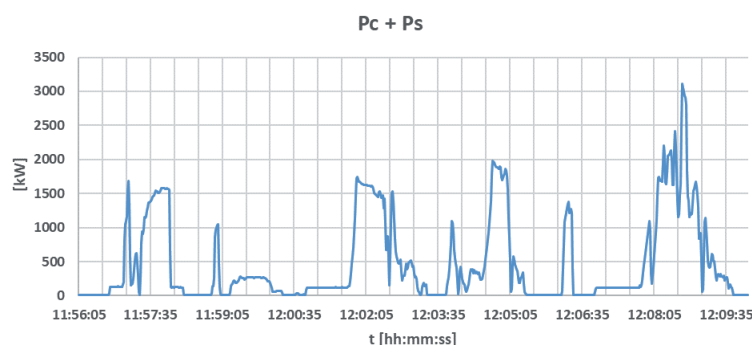


Figura 17 - Potenza totale erogata nelle due sottostazioni nell'intervallo di tempo corrispondente al transito dei treni R ed S sulla stessa tratta, Crespellano – Savignano M. in direzione opposta: Crespellano – Savignano M., treno R; Savignano M. – Crespellano, treno S.

Figure 17 - Total power delivered by the two substations in the time interval corresponding to the simultaneous transit of trains R and S on the Crespellano – Savignano M. section in opposite directions: Crespellano – Savignano M., train R; Savignano M. – Crespellano, train S.

the experimental results obtained, since it calculates the energy required by the train under the simplifying assumptions of a flat and straight line, of an intermediate train mass between the maximum and the minimum, and of a maximum speed equal to that allowed by the line.

4.3. Simultaneous trains

In order to assess the energy recuperation potential in the case of simultaneous trains, one starting and one braking, the case of trains R and S traveling simultaneously on the Crespellano – Savignano M section in opposite directions was examined.

The trains each perform starting and braking phases with partial overlaps. This leads to the possibility of transferring the energy produced by the braking train to the starting train. The total power delivered by the two substations in the period of simultaneous trains running is shown in Fig. 17.

From the power delivered as a function of time, the total energy consumed by the two trains is obtained, in a similar way to what was done for isolated trains, as shown in Tab. 4.

Comparing the average kilometric consumption in the two cases examined, a value of 7.65 kWh/km is obtained for simultaneous trains, lower than the average obtained for isolated trains of 8.92 kWh/km.

The simultaneous running of train R together with trains S on the section powered by the two substations leads to an energy saving of about 14.2%. This is attributed to the transfer of energy produced by the train in electrodynamic braking phase to the other train in the starting phase, made possible by the overlap of the two phases of motion. The kilometric consumption in the case of complete braking-energy recuperation may be evaluated by means of on-board measurements of the energy transferred to the overhead contact line and of the energy dissipated in the braking resistors.

To confirm the measured energy saving, the motion phases of the trains were compared (Fig. 18). Trains R and S travel in the same time the same section in opposite directions, make two intermediate stops, cross at the intermediate stop where both trains are simultaneously stationary.

Tabella 4 – Table 4

Energia relativa al transito di due treni sulla stessa tratta percorsa in senso opposto
Energy related to the transit of two trains on the same section travelled in opposite directions (english)

Tratta (Section)	Treno (Train)	Δt [s]	P_{mc} [kW]	P_{ms} [kW]	E_c [kWh]	E_s [kWh]	E_{tot} [kWh]	L [m]	E_{km} [kWh/km]
Crespellano - Savignano M. Savignano M. - Crespellano	R+S	837 (837)	216,2 (216.2)	264,0 (264.0)	50,3 (50.3)	61,5 (61.5)	111,8 (111.8)	14618 (14618)	7,65 (7.65)

Il consumo chilometrico nel caso di totale recupero dell'energia di frenatura potrebbe essere valutato mediante le misure, a bordo, della energia immessa sulla linea e di quella dissipata sulle resistenze.

A conferma del risparmio energetico misurato sono state confrontate le fasi del moto dei treni (Fig. 18). I treni R ed S percorrono nello stesso tempo la stessa tratta in direzione opposta, effettuano due soste intermedie, si incrociano nella fermata intermedia in cui entrambi i treni sono in sosta.

Come si vede sono evidenziati due casi in cui un treno è in avviamento (in rosso) e l'altro in frenatura (in verde). In tali periodi di tempo è possibile trasferire l'energia prodotta dalla frenatura elettrodinamica da un treno all'altro. Vi sono inoltre altri casi in cui la frenatura di un treno può contribuire alla richiesta di energia dell'altro treno.

La quantità di energia trasferita dipende dal confronto tra la potenza resa disponibile e la potenza richiesta: in caso di potenza resa disponibile dal treno in frenatura, insufficiente rispetto a quella richiesta dal treno in avviamento subentra la sottostazione. In caso contrario la potenza resa disponibile a bordo detratta la quota utilizzata direttamente per i servizi ausiliari del treno e per le resistenze al moto, se esuberante rispetto a quella richiesta e la sottostazione non è reversibile, viene dissipata sulle resistenze di frenatura di bordo.

La coincidenza delle fasi di avviamento e frenatura dipende dall'orario di servizio e dalla distanza tra le fermate.

Nella linea a binario unico, rispetto al caso del doppio binario, subentra un ulteriore vincolo all'esercizio dovuto alla necessità dei treni, che viaggiano in versi opposti, di incontrarsi nella stazione di incrocio. Ciò condiziona la marcia e potrebbe favorire il recupero di energia se le distanze tra le fermate prima e dopo la stazione di incrocio sono differenti. Infatti in caso di simmetria delle distanze, a meno delle irregolarità nella marcia, entrambi i treni si troverebbero nello stesso tempo in fase di avviamento e in fase di frenatura.

Ovviamente la distanza tra le fermate è determinata, tuttavia i contributi alla riduzione potrebbero derivare

There are two cases in Fig. 18 in which one train is starting (red) and the other is braking (green). In these periods of time it is possible to transfer the energy produced by the electrodynamic braking from one train to the other. Other cases were also observed in which a braking train could contribute to the energy requirements of the other train.

The amount of energy transferred depends on the comparison between the power made available and the power required. In the case of insufficient power generated by the braking train to fully supply the starting train, the substation intervenes. Otherwise, the power made available by the braking train on board, minus the share needed for the latter's auxiliary services and motion resistances, could exceed that required for traction and, if the substation is not reversible, the excess is dissipated by means of the on-board braking resistors.

The coincidence of the starting and braking phases depends on the service schedule and the distance between the stops. In the single-track line, compared to a double-track case, an additional constraint on operations arises due to the need for trains traveling in opposite directions to simultaneously stop at the crossing station. This constrains the train kinematics, and could favour energy recuperation if the distances between the stops before and after the crossing station are different. In fact, in case of symmetric adjacent stations, apart from perturbed scenarios with one or both trains experiencing delays, both trains' starting phases would approximately overlap, with same to be said for the braking phases.

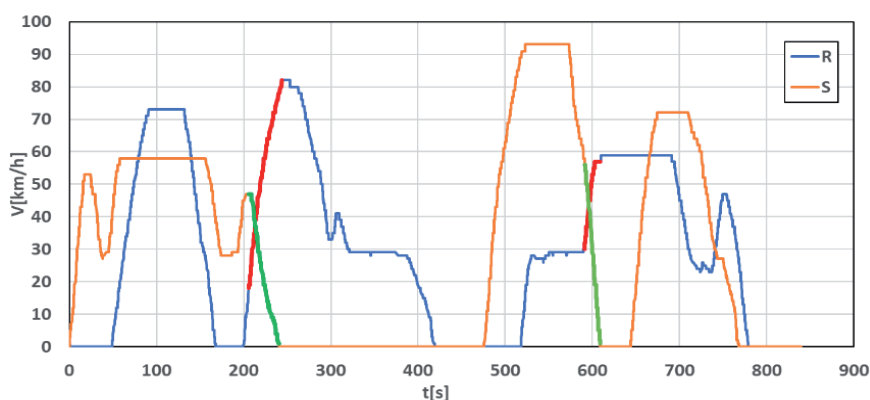


Figura 18 - Diagramma delle velocità in funzione del tempo. In rosso ed in verde sono evidenziati fasi contemporanee di avviamento e frenatura dei treni R ed S.

Figure 18 - Speed diagram as a function of time. The simultaneous starting and braking phases of trains R and S are highlighted in red and green.

dal progetto dell'orario e dal monitoraggio e regolazione in tempo reale della circolazione dei treni.

5. Conclusioni

La disponibilità di misure sperimentali sulla linea ferroviaria regionale a binario unico ha permesso di verificare e quantificare il recupero di energia tra treni che si trovano sulla tratta alimentata dalla stessa sottostazione.

Nel caso specifico si tratta di una linea a frequenza ridotta, in cui la marcia condizionata dalla necessità dei treni di incontrarsi nella stazione di incrocio e dalla asimmetria delle distanze tra le fermate prima e dopo la stazione di incrocio porta ad un non trascurabile risparmio di energia rispetto al caso di treno singolo che percorre la stessa tratta.

La disponibilità in tempo reale di dati derivanti dai sistemi di comando e controllo di terra e di bordo costituisce un elemento utile per regolare il segnalamento di terra e la marcia a bordo, istanti di partenza e velocità, in modo da facilitare la sovrapposizione di fasi di avviamento e di frenatura.

Considerando l'entità dei consumi di energia dei sistemi di trasporto ed il loro peso sul fabbisogno di energia globale si sottolinea l'importanza di procedere con tutte le possibilità di risparmio energetico nella gestione dei trasporti. I risultati ottenuti con il presente lavoro dimostrano che anche linee a scarso traffico possono dare un contributo all'ambiente ed ai costi di esercizio.

Obviously, the distance between the stops is predetermined and fixed. However, contributions to energy saving could derive from the timetable design and from the real-time monitoring of train traffic.

5. Conclusions

The availability of experimental measurements on a single-track regional railway line has allowed the verification and quantification of energy recuperation between trains that are on the line section powered by the same substation.

In this specific case it is a line with low train frequency, in which operations are constrained by the need for trains to meet at the crossing station. The asymmetry of the distances between the stops before and after the crossing station leads to a non-negligible energy saving compared with the case of a single train travelling along the same section.

The real time availability of data deriving from the wayside and on-board command and control systems constitutes a useful element to adjust the wayside signalling and consequently train kinematics - starting times and speeds - in order to facilitate the overlapping of starting and braking phases.

Considering the amount of energy consumption of transport systems and their loss on the global energy requirement, it is emphasized the importance of proceeding with all the possibilities of energy saving in transport management. The results obtained with this work demonstrate that even low-traffic lines can give a contribution to the environment and operating costs.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] ACCATTATIS F. (1980), "Confronto fra i sistemi di trazione per ferrovie metropolitane nei riguardi del consumo di energia". Ingegneria Ferroviaria, marzo, pp. 521-532.
- [2] BRUNO F., COVIELLO N., DALLA CHIARA B., DI PAOLA A. (2015), "The energy consumption of trains in operation: simulation, a methodology for the analysis and influence of the driving style". Ingegneria Ferroviaria, aprile, pp. 327-357.
- [3] SCIRE C., CUCALA P., FERNANDEZ A., JIMENEZ J. A., RIBERA I., SERRANO A. (2010). "A method to optimise train energy consumption combining manual energy efficient driving and scheduling". WIT Transactions on The Built Environment, Vol 114, © 2010 WIT Press. Computers in Railways XII 549 doi:10.2495/CR100511. Pp 549-560.
- [4] DI MARIO V., MALAVASI G. (2008). "Electrical regenerative braking in metropolitan railways". In: Eurnex – Zel. Towards more competitive European rail system. Zilina (Repubblica Slovacca), 4-5 giugno, ZILINA: EDIS ZILINA, vol. 1, pp. 102-110.
- [5] GODBERSEN C., GUNSELMANN W., OMASSI G. (2002), "Accumulatori di energia e trasporti urbani di massa". Ingegneria Ferroviaria, luglio-agosto.
- [6] RADU P., LEWANDOWSKI M., SZELAG A. (2020), "On-Board and Wayside Energy Storage Devices Applications in Urban Transport Systems" – Case Study Analysis for Power Applications. Energies.
- [7] CANOVA A., CAMPANELLI F., QUERCIO M. (2022), "Flywheel Energy Storage System in Italian Regional Transport Railways: A Case Study". Energies.
- [8] DI MARIO V., MALAVASI G. (2024), "Energy consumption in metropolitan railways". Ingegneria Ferroviaria, aprile.
- [9] DI MARIO V. (2010), "Risparmio energetico nelle ferrovie metropolitane". Sapienza Università di Roma. Tesi di Dottorato 13-12-2010.

- [10] MALAVASI G., RICCI S., PALLESCHI P. (2011), "*Driving and operation strategies for traction energy saving in mass rapid transit system*". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F, Journal of Rail and Rapid Transit. August 2011 225: 475-482.
 - [11] DI MARIO V., MALAVASI G., PALLESCHI P. (2011), "*Consumo energetico per trazione nelle ferrovie metropolitane*". 2° Convegno Nazionale Sicurezza ed Esercizio Ferroviario: Innovazione e nuove sfide nei sistemi ferroviari. Roma SEF. Febbraio.
-