



Consumo energetico nelle ferrovie metropolitane

Energy consumption in metropolitan railways

Valter DI MARIO ^(*)
Gabriele MALAVASI ^(**)

(<https://www.medra.org/servlet/view?lang=it&doi=10.57597/IF.04.2024.ART.1>)

Sommario - Il presente lavoro analizza i consumi di energia di un sistema elettrico ferroviario, riferito soprattutto alle linee metropolitane ed indica quali sono i parametri che li caratterizzano.

Vengono considerati 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 emergono 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'energia prodotta dalla frenatura elettrodinamica 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.

1. Introduzione

La necessità di ridurre i consumi energetici dovuta alle esigenze ambientali investe anche il sistema ferroviario in cui l'energia utilizzata di tipo elettrico, rispetto ad altri tipi di energia, meglio si presta a rendere disponibile la potenza effettivamente richiesta per le esigenze del trasporto con un alto rendimento energetico.

Le utenze civili di stazione come l'illuminazione, la ventilazione, gli impianti di traslazione, contribuiscono al consumo totale di energia elettrica e potrebbero usufruire di sistemi di regolazione finalizzati ad adeguare la poten-

Summary - The present work analyzes the energy consumption of the electric railway system, referring mainly to the metropolitan lines and indicating the parameters that characterize them.

Both the consumption of civil users and that of traction are considered in order to highlight the possibilities for energy saving.

For civil users of stations and depots, no particular indications emerge, however their quantification provides useful elements for evaluating their contribution to total consumption and the possibilities of energy saving for the design and management of new lines.

The energy produced by electrodynamic braking constitutes a concrete possibility, but its exploitation depends both on the structural parameters of the line and on the operation program and its actual performance.

The experimental findings provide useful elements for the calibration of the theoretical models and highlight the effect of the distance between stops and the timing of the trains on energy saving.

1. Introduction

The need to reduce energy consumption due to environmental needs also affects the railway system in which the electrical energy used, compared to other types of energy, is better suited to making the power actually required for transport needs available with a high energy efficiency.

Civil station utilities such as lighting, ventilation, translation systems, contribute to the total consumption of electricity and could benefit from regulation systems aimed at adapting the power according to the users actually present.

The analysis of required powers and their quantification provide useful elements for defining the design and man-

^(*) Phd - Roma Metropolitane S.r.l. a r.

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

^(*) Phd - Roma Metropolitane S.r.l. Retired.

^(**) Sapienza Università di Roma Retired.

SCIENZA E TECNICA

za in funzione degli utenti effettivamente presenti.

L'analisi delle potenze richieste 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.

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 [9][12].

Le emissioni derivanti da combustibili fossili utilizzati direttamente o indirettamente per i trasporti ha riportato all'attenzione dei ricercatori lo studio dell'efficienza energetica. Specifici lavori si sono concentrati sull'analisi dei metodi e dei sistemi di misura per valutare l'effetto di parametri strutturali, gestionali sui consumi energetici dei vari modi di trasporto.

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 [22]. I risultati ottenuti hanno dimostrato come lo stile di condotta del macchinista in relazione alla velocità ed al momento di applicazione della forza frenante hanno sensibili effetti sui consumi energetici.

L'analisi quantitativa dei consumi energetici del trasporto ferroviario e del trasporto aereo è stata affrontata in [23] finalizzata a determinare i campi di utilizzo delle due modalità di trasporto più convenienti rispetto al consumo energetico.

Nel campo dei trasporti urbani di massa la frequenza dell'esercizio e la densità territoriale dell'offerta di trasporto costituiscono elementi che possono favorire il recupero di energia rispetto ad altri sistemi ferroviari di media e lunga distanza [13].

I limiti alla utilizzazione dell'energia elettrica prodotta dalla frenatura elettrodinamica derivano dal fatto che essa deve essere utilizzata nel momento in cui viene prodotta. Una soluzione è l'accumulo per un uso differito.

Vari studi si sono concentrati sull'accumulo a bordo mediante batterie e supercapacitori [6][7][8][14]. Altri studi si sono concentrati sulla possibilità di utilizzare l'energia recuperata attraverso sottostazioni reversibili evidenziando l'effetto del livello della tensione di alimentazione e del sistema di controllo della frenatura [18] ed il confronto tra sottostazioni reversibili e tradizionali [21].

Nel caso della presente ricerca sono state considerate sottostazioni tradizionali senza possibilità di reversibilità.

Altri lavori hanno analizzato le problematiche di misura dell'energia recuperabile a bordo, e proposto sistemi di misura basati su informazioni disponibili a bordo, facili da implementare di cui sono riportati anche analisi delle incertezze [19][20].

La presente ricerca è stata impostata basandosi sulla

agement criteria to be used in theoretical models aimed at maximizing technical and economic efficiency.

Energy consumption for traction and the use of electrodynamic braking have been topics of interest and constantly studied by researchers starting from the applications of electric motors in railway traction [9][12].

Emissions deriving from fossil fuels used directly or indirectly for transport have brought the study of energy efficiency back to the attention of researchers. Specific works focused on the analysis of measurement methods and systems to evaluate the effect of structural and management parameters on the energy consumption of the various modes of transport.

A methodology for analyzing the energy consumption of medium and long-distance freight and passenger trains, characterized by a few significant parameters, was proposed in [22]. The results obtained demonstrated how the driver's style of conduct in relation to the speed and the moment of application of the braking force have significant effects on energy consumption.

The quantitative analysis of the energy consumption of rail transport and air transport was addressed in [23] aimed at determining the fields of use of the two most convenient transport modes with respect to energy consumption.

In the field of mass urban transport, the frequency of operation and the territorial density of the transport offer constitute elements that can favor energy recovery compared to other medium and long-distance railway systems [13].

The limits to the use of the electrical energy produced by electrodynamic braking derive from the fact that it must be used at the moment in which it is produced. One solution is accumulation for deferred use.

Various studies have focused on on-board storage using batteries and supercapacitors [6][7][8][14]. Other studies have focused on the possibility of using the energy recovered through reversible substations, highlighting the effect of the level of the supply voltage and the braking control system [18] and the comparison between reversible and traditional substations [21].

In the case of this research, traditional substations without the possibility of reversibility were considered.

Other works have analyzed the problems of measuring recoverable energy on board, and proposed measurement systems based on information available on board, easy to implement, for which uncertainty analyzes are also reported [19][20].

This research was based on the measurement of the power and energy absorbed directly in the substations by overall measuring the energy used for traction and the losses along the line.

Many works are based on theoretical simulation models; rarer are the works that make experimental data

SCIENZA E TECNICA

misura della potenza e della energia assorbita direttamente nelle sottostazioni misurando complessivamente l'energia utilizzata per la trazione e le perdite lungo la linea.

Molti lavori si basano su modelli di simulazione teorici; più rari sono i lavori che rendono disponibili dati sperimentali che potrebbero fornire utili indicazioni per una progettazione finalizzata ad ottenere una elevata efficienza energetica.

Rilievi sperimentali sul trasferimento dell'energia prodotta da un treno ad altri treni [1][2][11] hanno fornito valori quantitativi sulla effettiva energia recuperata utili per la calibrazione dei modelli teorici

La guida automatica può contribuire alla riduzione dei consumi di energia [5]. Le aleatorietà proprie dell'esercizio, dipendenti soprattutto dai tempi di sosta, producono spostamenti temporali delle fasi di avviamento e frenatura rispetto al programma di esercizio impostato per massimizzare il recupero di energia. Con la marcia automatica gli istanti di partenza e le velocità potrebbero essere regolate sull'andamento dei treni che precedono e che seguono in modo da favorire la sovrapposizione temporale delle fasi di avviamento e frenatura.

L'utilizzazione del recupero di energia in frenatura è diventata una prestazione consolidata nelle moderne ferrovie metropolitane. Tuttavia si ritiene ancora oggetto di studio la possibilità di massimizzare il risparmio energetico analizzando l'influenza dei parametri strutturali della linea e le modalità di esercizio, che potrebbero essere considerati nelle valutazioni di efficienza tecnico-economica nei progetti di nuove linee.

Questi sono gli obiettivi della presente ricerca sviluppata nell'ambito del dottorato di ricerca [16] di cui si espongono considerazioni sui risultati ottenuti ad integrazione anche di quanto già pubblicato in precedenti lavori sui modelli teorici di esercizio [3] e [4] e sui consumi energetici [10][15][17] qui richiamati.

2. Consumo di energia per impianti civili

In una linea metropolitana, soprattutto in sotterraneo, gli impianti civili principali sono:

- impianti di illuminazione;
- impianti di ventilazione;
- impianti di traslazione, scale mobili ed ascensori.

Attraverso l'analisi e rilievi sperimentali dei parametri che li caratterizzano viene valutata la possibilità e la relativa quantificazione di risparmio energetico.

2.1. Impianti di illuminazione

Gli impianti di illuminazione debbono assicurare il normale livello di illuminamento (lux) richiesto sia dalla normativa sia dalle normali condizioni di sicurezza per gli utenti.

available which could provide useful indications for a design aimed at obtaining high energy efficiency.

Experimental findings on the transfer of energy produced by a train to other trains [1][2][11] have provided quantitative values on the actual energy recovered useful for the calibration of theoretical models

Automatic driving can contribute to reducing energy consumption [5]. The uncertainties inherent in the operation, depending above all on stop times, produce temporal shifts in the starting and braking phases with respect to the operation program set to maximize energy saving. With automatic travel, departures and speeds could be adjusted to the progress of the trains preceding and following in order to favor the temporal overlap of the starting and braking phases.

The use of braking energy recovery has become a consolidated feature in modern metropolitan railways. However, the possibility of maximizing energy savings by analyzing the influence of the structural parameters of the line and the operating methods, which could be considered in the assessments of technical-economic efficiency in new line projects, is still considered a subject of study.

These are the objectives of the present research developed as part of the research doctorate [16] of which considerations on the results obtained are presented in addition to what has already been published in previous works on theoretical exercise models [3] and [4] and on energy consumption [10][15][17] referred to here.

2. Energy consumption for civil systems

In a metro line, especially underground, the main civil systems are:

- lighting systems;
- ventilation systems;
- translation systems, escalators and elevators.

Through the analysis and experimental measurements of the parameters that characterize them, the possibility and related quantification of energy savings is evaluated.

2.1. Lighting systems

The lighting systems must ensure the normal level of illumination (lux) required both by legislation and by normal safety conditions for users.

The value of the required illuminance level E , measured in lux (lumen/m²) is given by the ratio

$$E = \Phi_u / S$$

where:

- Φ_u , luminous flux, the quantity of light emitted by a light source in the unit of time measured in lumens (lm);
- S , the surface to be illuminated in m².

SCIENZA E TECNICA

Il valore del livello di illuminamento richiesto E , misurato in lux (lumen/m²) è dato dal rapporto

$$E = \Phi_u / S$$

dove:

- Φ_u , flusso luminoso, la quantità di luce emessa da una sorgente luminosa nell'unità di tempo misurata in lumen (lm);
- S , superficie da illuminare in m².

Il livello di illuminamento E , adottato nelle zone aperte al pubblico di una stazione di una linea metropolitana, è quello richiesto dalla Normativa UNI n°8097 - 2004, "Illuminazione delle metropolitane in sotterranea ed in superficie" che prevede un valore di $E = 120$ lux.

Il valore di illuminamento E è, però, quasi sempre legato alle finiture architettoniche previste nelle stazioni che portano in genere ad ottenere un livello di illuminamento maggiore di quello previsto dalle Norme.

Il numero dei corpi illuminanti n necessari ad assicurare il livello di illuminamento previsto è dato da

$$n = \Phi_u / \Phi_i$$

dove Φ_i è il flusso luminoso del corpo illuminante.

La potenza elettrica P è direttamente proporzionale al livello di illuminazione ed alla potenza dei singoli corpi illuminanti.

Per valutare l'effettiva potenza assorbita è stata condotta una campagna di misure che ha interessato l'impianto di illuminazione della banchina di una stazione di metropolitana [16], che presenta una superficie di circa 360 m².

Le misure di illuminamento e di assorbimento della potenza elettrica si sono svolte durante il normale esercizio, mediamente un luxometro ed un analizzatore di rete elettrica, parzializzando l'impianto di illuminazione (Fig. 1).

In corrispondenza ai livelli di illuminamento medi si sono ottenuti i seguenti valori delle potenze assorbite:

- $E_m = 153$ lux $P = 12,8$ kW
- $E_m = 87$ lux $P = 11,3$ kW

Ad una riduzione dei livelli di illuminamento di circa il 47% corrisponde una riduzione degli assorbimenti di potenza di circa il 12%. Il livello di illuminamento medio, secondo le norme, non deve comunque mai risultare minore del 50% di quello nominale.

La potenza misurata per l'illuminamento più alto, corrisponde ad una potenza per unità di superficie

$$P_{m2} = 12,8 \text{ kW} / 360 \text{ m}^2 = 35,6 \text{ W/m}^2$$

La potenza assorbita per l'illuminazione di tutte le aree aperte al pub-

The lighting level E , adopted in the areas open to the public of a station on a metropolitan line, is that required by the UNI Regulation No. 8097 - 2004, "Lighting of underground and surface metros" which provides a value of $E = 120$ lux.

The illuminance value E is, however, almost always linked to the architectural finishes in the stations which generally lead to obtaining a higher illuminance level than that required by the standard.

The number of lighting fixtures n necessary to ensure the expected illumination level is given by

$$n = \Phi_u / \Phi_i$$

where Φ_i is the luminous flux of the lighting fixtures.

The electrical power P is directly proportional to the lighting level and the power of the individual lighting fixtures.

To evaluate the actual power absorbed, a measurement campaign was carried out which involved the lighting system of the platform of a subway station [16], which has a surface area of approximately 360 m².

The lighting and electrical power measurements were carried out during normal operation, with a lux meter and an electrical network analyzer, partializing the lighting system (Fig. 1).

In correspondence with the average illumination levels, the following values of absorbed power were obtained:

- $E_m = 153$ lux $P = 12.8$ kW
- $E_m = 87$ lux $P = 11.3$ kW

A reduction in lighting levels of approximately 47% corresponds to a reduction in power absorption of approximately 12%. The average illumination level, according to the standard, must never be less than 50% of the nominal standard.

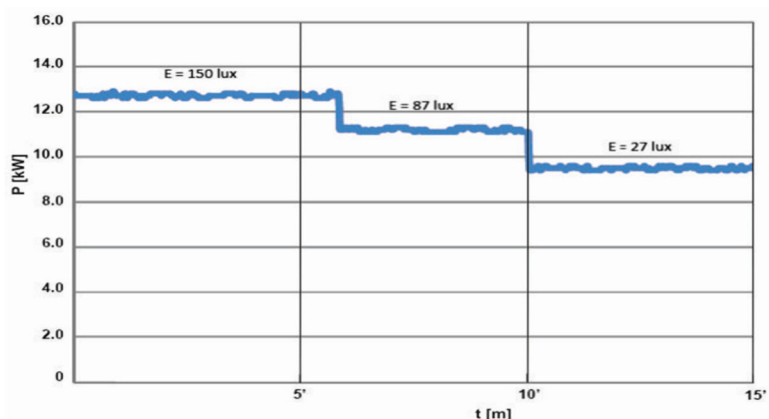


Figura 1 – Potenza elettrica assorbita in funzione del livello di illuminamento [16].

Figure 1 – Absorbed electrical power as a function of illumination level [16].

SCIENZA E TECNICA

blico, quali atrio, discenderie, banchine, per una stazione con superficie complessiva $A = 2.500 \text{ m}^2$ assume il valore

$$P = 35,6 \times 2500 = 89,0 \text{ kW}$$

I risultati ottenuti permettono di valutare il contributo dell'illuminazione alla potenza complessiva richiesta dall'impianto; tuttavia, la valutazione della possibilità di impostare sistemi di controllo richiede di considerare anche aspetti gestionali e manutentivi.

Ulteriori riduzioni di potenza si potrebbero ottenere dall'uso di tecnologie innovative di illuminazione (led) la cui convenienza va valutata nell'ambito di un'analisi tecnico economica specifica del ciclo di vita.

2.2. Impianti di ventilazione

Gli impianti di ventilazione devono assolvere alla duplice funzione di:

- fornire il ricambio d'aria necessario a mantenere le condizioni di confort ambientale, sia attraverso il mantenimento di condizioni ambientali salubri, sia attraverso l'asportazione del calore prodotto all'interno delle stazioni ed in galleria;
- prevedere in caso di incendio sia in banchina che in galleria, che le zone di uscita verso i luoghi sicuri siano sgombri dai fumi per assicurare l'evacuazione delle persone in massima sicurezza.

In esercizio normale gli impianti di ventilazione di stazione distribuiti nelle aree aperte al pubblico devono assicurare, per fornire benefiche condizioni di vivibilità ai passeggeri, un numero di ricambi/orari di circa 10 Vol/h.

Tali rinnovi dell'aria sono assicurati da impianti di ventilazione di immissione, costituiti da ventilatori che tramite un sistema di regolazione ad inverter per il comando e controllo del numero dei giri del ventilatore, provvedono a variarne la portata e la prevalenza in relazione alle condizioni richieste sia in stazione che in galleria durante l'esercizio nelle ore di morbida e di punta.

Considerando che il numero di giri n_i è legato al valore della potenza elettrica P_i assorbita, si può determinare, in relazione alle varie fasi di esercizio ed alla relativa portata d'aria V_i la relativa potenza elettrica P assorbita.

Gli impianti di ventilazione in emergenza, in stazione ed in galleria, utilizzano le stesse apparecchiature destinate all'esercizio normale e sono in grado, utilizzando la stessa regolazione ad inverter, di incrementare sia la portata sia la prevalenza, in modo da soddisfare i requisiti richiesti per le condizioni di emergenza (velocità dell'aria in galleria pari a 2 m/s).

Per analizzare quanto sopra è stata condotta una campagna di misure presso una stazione profonda di metropolitana [16] relativamente al funzionamento della centrale di ventilazione ed in particolare l'andamento de-

The power measured for the highest illuminance corresponds to a power per unit of surface area

$$P_{m2} = 12.8 \text{ kW}/360 \text{ m}^2 = 35.6 \text{ W/m}^2$$

The power absorbed for the lighting of all areas open to the public, such as atriums, stairs, platforms, for a station with a total surface area of $A = 2,500 \text{ m}^2$ takes on the value

$$P = 35.6 \times 2500 = 89.0 \text{ kW}$$

The results obtained allow us to evaluate the contribution of lighting to the overall power required by the system; however, the evaluation of the possibility of setting using control systems also requires consideration of management and maintenance aspects.

Further power reductions could be obtained from the use of innovative lighting technologies (LEDs) whose convenience must be assessed as part of a specific technical-economic analysis of the life cycle.

2.2. Ventilation systems

Ventilation systems must fulfill the dual function of:

- *provide the air exchange necessary to maintain environmental comfort conditions, both through the maintenance of healthy environmental conditions and through the removal of the heat produced inside the stations and in the tunnels;*
- *in the event of a fire on both the platform and in the tunnel, ensure that the exit areas to safe places are free of fumes to ensure the evacuation of people in maximum safety.*

In normal operation, the station ventilation systems distributed in areas open to the public must ensure, to provide beneficial living conditions for passengers, a number of changes/hours of approximately 10 Vol/h.

These air renewals are ensured by intake ventilation systems, made up of fans which, through an inverter regulation system for commanding and controlling the number of fan revolutions, vary the flow rate and prevalence in relation to the required conditions, both in the station and in the tunnel during operation during off-peak and peak hours.

Considering that the number of revolutions n_i is linked to the value of the absorbed electrical power P_i , the relative absorbed electrical power P can be determined in relation to the various operating phases and the relative air flow V_i .

The emergency ventilation systems, in the station and in the tunnel, use the same equipment intended for normal operation and are able, using the same inverter regulation, to increase both the flow rate and the head, in order to satisfy the required requirements for emergency conditions (air speed in the tunnel equal to 2 m/s).

To analyze the above, a measurement campaign was conducted at a deep subway station [16] relating to the operation of the ventilation unit and in particular the trend of the electrical power absorption of the fan as the number of

SCIENZA E TECNICA

gli assorbimenti di potenza elettrica del ventilatore al variare del numero di giri del ventilatore stesso e quindi della portata in m³/h (Fig. 2).

Con riferimento al volume atrio e discenderie della stazione (circa 5.000m³), per assicurare 10 ricambi orari cioè 50.000m³/h (Fig. 2) viene richiesta una potenza di circa 20 kW. Nelle ore di morbida si potrebbe ridurre la portata di ventilazione in funzione della effettiva presenza di utenti e ridurre conseguentemente la potenza richiesta. Ciò dipende dalla valutazione della convenienza tecnica ed economica del sistema di comando e controllo.

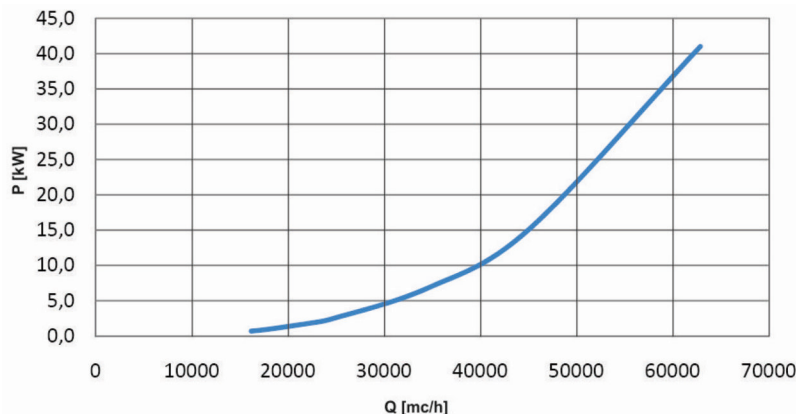


Figura 2 – Potenza elettrica in funzione della portata del ventilatore [16].

Figure 2 – Electrical power as a function of fan flow rate [16].

2.3. Impianti di traslazione

Le scale mobili e gli ascensori, sono utilizzati per la movimentazione dei passeggeri per il raggiungimento del piano banchina dalla zona atrio e viceversa.

In una linea metropolitana, data l'intensità del traffico delle persone che transitano nelle stazioni, funzione del cadenzamento dei treni, la scala mobile viene normalmente utilizzata, nelle ore di punta dell'esercizio alla velocità che permette il miglior deflusso dei passeggeri.

Le scale mobili sono dotate di opportuni sistemi di comando e controllo che permettono potenzialmente il variare della velocità in relazione alla presenza o meno di passeggeri.

La potenza richiesta da una scala mobile durante il normale esercizio è proporzionale al numero delle persone presenti sui gradini, tramite il fattore K, ed alla velocità v

$$P \propto Kv/\eta$$

con η rendimento globale.

Per ottenere una riduzione dei consumi, fermo restando il normale funzionamento alla presenza degli utenti, si adottano diverse modalità di esercizio, in assenza degli utenti, durante il periodo fra il passaggio di due treni successivi, funzione del cadenzamento dei treni.

Una prima modalità è quella di utilizzare la scala mobile a richiesta, cioè la scala mobile è ferma e si avvia automaticamente nella direzione dalla quale si avvicinano i primi passeggeri.

Una seconda modalità è quella di riposo, cioè la scala mobile in condizione di assenza passeggeri funziona a velocità ridotta salvo portarsi alla velocità normale con l'avvicinarsi dei primi passeggeri.

Per analizzare gli assorbimenti di potenza durante il normale esercizio è stata condotta una campagna di misure presso una stazione di metropolitana [16] durante il

revolutions of the fan itself varies and therefore the flow rate in m³/h (Fig. 2).

With reference to the volume of the station's atrium and descents (approximately 5,000m³), to ensure 10 changes per hour, i.e. 50,000m³/h (Fig. 2), a power of approximately 20 kW is required. In not rush hour, the ventilation flow rate could be reduced based on the actual presence of users and consequently reduce the power required. This depends on the evaluation of the technical and economic convenience of the command and control system.

2.3. Translation systems

The escalators and elevators are used to move passengers to reach the platform level from the atrium area and vice versa.

On a metropolitan line, given the intensity of the traffic of people passing through the stations, a function of the timing of the trains, the escalator is normally used, during peak operating hours, at the speed that allows the best flow of passengers.

The escalators are equipped with appropriate command and control systems that potentially allow the speed to vary in relation to the presence or absence of passengers.

The power required by an escalator during normal operation is proportional to the number of people present on the steps, via the K factor, and to the speed v.

$$P \propto Kv/\eta$$

with η overall efficiency.

To obtain a reduction in consumption, without prejudice to normal operation in the presence of users, different operating methods are adopted, in the absence of users, during the period between the passage of two successive trains, depending on the timing of the trains.

SCIENZA E TECNICA

normale esercizio della linea su una scala in salita con potenza installata $P = 2 \times 15 \text{ kW}$.

Le misure sono state condotte sia vuoto sia a carico.

I valori della potenza assorbita sono (Fig. 3)

- $v = 0,20 \text{ m/s}$ $P = 1,1 \text{ kW}$
- $v = 0,50 \text{ m/s}$ $P = 1,7 \text{ kW}$
- $v = 0,65 \text{ m/s}$ $P = 1,9 \text{ kW}$

L'assorbimento durante il normale esercizio a diverse velocità e condizioni di carico è riportato nella Fig. 4: punti (1) del grafico, $v=0,5 \text{ m/s}$, a carico; punti (2) $v=0,5 \text{ m/s}$, a vuoto; punti (3), $v=0,2 \text{ m/s}$, a vuoto.

Per il periodo di misura pari a 46min si ottiene un valore medio della potenza assorbita pari a $P = 2,6 \text{ kW}$.

L'andamento della potenza assorbita adottando, a vuoto, velocità di $0,2 \text{ m/s}$ e velocità nulla è riportato nelle Fig. 5 e Fig. 6. La potenza media in un periodo di tempo di 46 minuti, nei due casi, vale rispettivamente $2,5 \text{ kW}$ e $2,2 \text{ kW}$ corrispondente ad una differenza del 12%.

Il numero delle scale mobili in una stazione profonda può arrivare ad alcune decine di unità in funzione della profondità. Assumendo un valore medio di 10 scale mobile per stazione si avrebbe un assorbimento di potenza pari mediamente a 25 kW con $v=0,2 \text{ m/s}$.

La potenza richiesta dagli impianti civili raggiunge valori medi dell'ordine di 134 kW per stazione profonda, cioè $1,34 \text{ MW}$ per una linea di 10 stazioni.

I risultati ottenuti forniscono valori della potenza assorbita relativi alla illuminazione, ventilazione e traslazione. Essi possono guidare l'adozione dei diversi tipi di regolazione per ottimizzare il consumo di energia sulla base delle analisi di efficienza tecnica ed economica.

3. Energia per la trazione

Il diagramma di marcia tipico di un veicolo fra due stazioni di una linea metropolitana comprende le seguenti fasi (Fig. 7) [16]:

- avviamento;
- coasting inerziale e velocità costante;

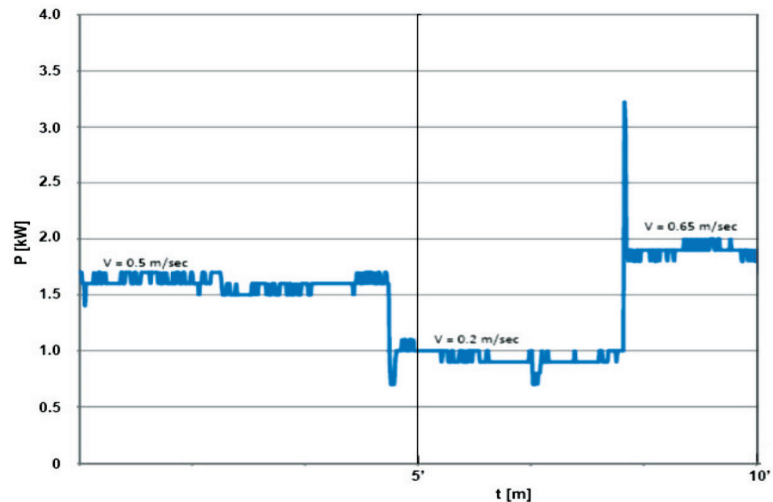


Figura 3 – Potenza elettrica assorbita a vuoto in funzione del tempo a diverse velocità [16].

Figure 3 – Electrical power absorbed at no load as a function of time at different speeds [16].

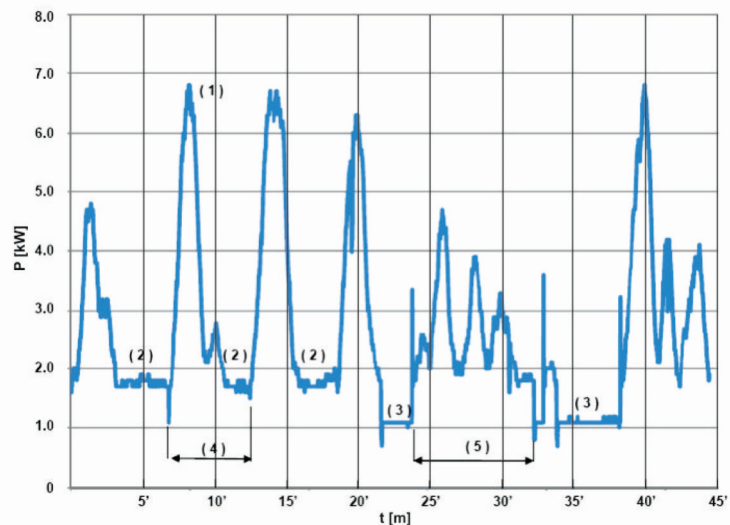


Figura 4 – Potenza elettrica assorbita in condizioni normali [16].

Figure 4 – Electrical power absorbed in normal conditions [16].

A first method is to use the escalator on request, i.e. the escalator is stopped and starts automatically in the direction from which the first passenger approach.

A second mode is the rest mode, i.e. the escalator operates at a reduced speed when there are no passengers, only to reach normal speed as the first passenger approach.

To analyze power absorption during normal operation, a measurement campaign was conducted at an underground station [16] during normal operation of the line on

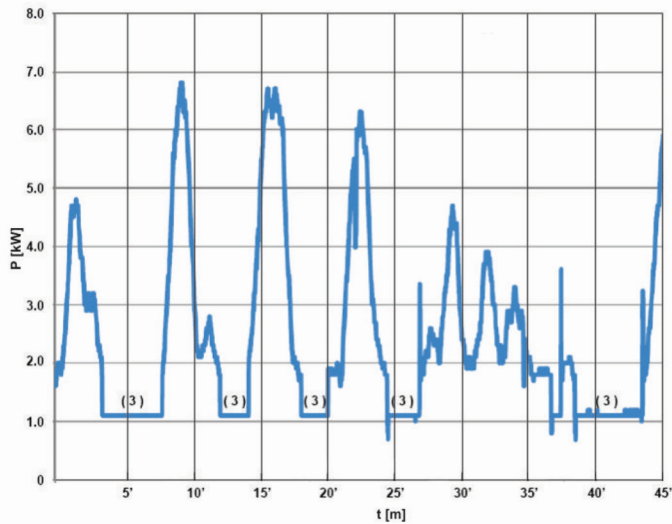


Figura 5 – Potenza elettrica assorbita con velocità $v = 0,2$ m/s a vuoto [16].

Figure 5 – Electrical power absorbed with speed $v = 0.2$ m/s at no load [16].

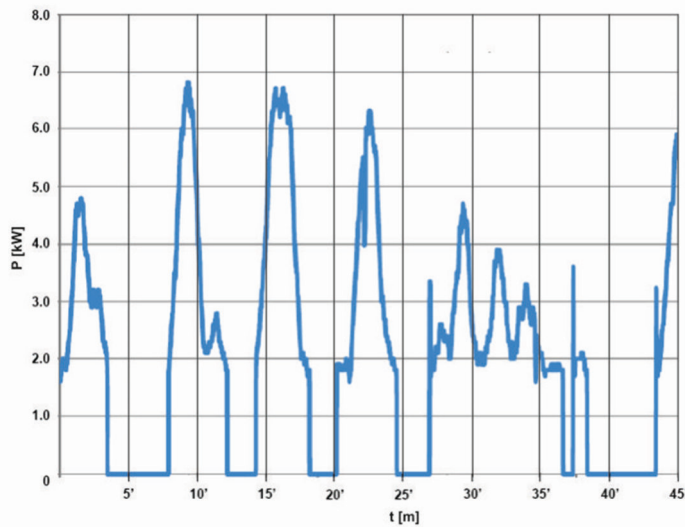


Figura 6 – Potenza elettrica assorbita con velocità nulla a vuoto [16].

Figure 6 – Electrical power absorbed with zero no-load speed [16].

- frenatura.

La fase di avviamento richiede la forza trazione necessaria per aumentare la velocità, raggiungere la massima velocità e vincere le resistenze al moto.

La fase di *coasting* non richiede forza di trazione, il veicolo avanza per inerzia.

La fase a velocità costante richiede una forza di trazione per bilanciare le resistenze al moto.

La fase di frenatura richiede una forza che si oppone al moto per arrestare il treno nello spazio previsto.

an ascending escalator with installed power $P = 2 \times 15$ kW.

The measurements were conducted both empty and loaded. The values of the absorbed power are (Fig. 3)

- $v = 0.20$ m/s $P = 1.1$ kW
- $v = 0.50$ m/s $P = 1.7$ kW
- $v = 0.65$ m/s $P = 1.9$ kW

The absorption during normal operation at different speeds and load conditions is shown in Fig. 4: points (1) of the graph, $v=0.5$ m/s, at load; points (2) $v=0.5$ m/s, no load; points (3), $v=0.2$ m/s, no load.

For the measurement period of 46 min, an average value of the absorbed power equal to $P = 2.6$ kW is obtained.

The trend of the power absorbed by adopting, at no load, a speed of 0.2 m/s and zero speed is shown in Fig. 5 and Fig. 6. The average power in a period of time of 46 minutes, in the two cases, is respectively 2.5 kW and 2.2 kW corresponding to a difference of 12%.

The number of escalators in a deep station can reach a few dozen units depending on the depth. Assuming an average value of 10 escalators per station, there would be a power absorption equal to 25 kW on average with $v=0.2$ m/s.

The power required by civil systems reaches average values of the order of 134 kW per deep station, i.e. 1.34 MW for a line of 10 stations.

The results obtained provide values of the absorbed power relating to lighting, ventilation and translation. They can guide the adoption of different types of regulation to optimize energy consumption based on technical and economic efficiency analyses.

3. Energy for traction

The typical running diagram of a vehicle between two stations of a metro line includes the following phases (Fig. 7) [16]:

- starting;
- inertial coasting and constant velocity;
- braking.

The start-up phase requires the necessary traction force to increase speed, reach maximum speed and overcome resistance to motion.

SCIENZA E TECNICA

Dal punto di vista cinematico le fasi di un diagramma di marcia tipico corrispondono a:

- moto uniformemente accelerato nella prima parte e ad accelerazione decrescente nella seconda fase di avviamento;
- moto a velocità costante o moto ritardato con piccole decelerazioni nella fase di *coasting*;
- moto uniformemente ritardato nella fase di frenatura.

Per comprendere come variano le grandezze elettriche e meccaniche che entrano in gioco durante le fasi di avviamento, *coasting* e frenatura, vengono analizzati gli andamenti in funzione del tempo rilevati durante le corse prove di un veicolo di metropolitana (Fig. 8) [16].

All'avviamento viene applicata la forza di trazione F_m (1), che produce con l'accelerazione a (4) un progressivo aumento della velocità v (5).

Nella seconda fase dell'avviamento la forza di trazione F_m (1) e l'accelerazione a (4) diminuiscono e la velocità v (5) continua ad aumentare più lentamente.

La corrente di motore I_m (6) è praticamente proporzionale alla forza di trazione F_m , mentre le grandezze di linea, corrente I (3) e tensione V (2) risultano funzioni del moto del treno.

All'aumentare della corrente di linea I assorbita dal treno si ha una caduta di tensione, dovuta alla resistenza elettrica della linea di contatto, che porta ad una diminuzione della tensione di linea V .

La potenza elettrica P (7) aumenta linearmente fino al valore massimo della prima fase di avviamento per poi mantenersi costante, nella seconda fase.

La potenza P comprende anche quella necessaria all'alimentazione dei servizi ausiliari del treno.

La figura si riferisce all'andamento delle grandezze elettriche per un treno isolato.

Durante la fase di *coasting* (Fig. 9) il veicolo avanza per inerzia. La velocità v (5) diminuisce molto lentamente, la forza motrice F_m (1) è praticamente nulla così come l'accelerazione a (4).

La tensione di linea V (2) è costante, la corrente di motore I_m (6) è nulla, mentre la corrente di linea I (3) e la potenza P (7) sono minime e dovute solo all'assorbimento degli impianti ausiliari del treno.

Dopo la fase di *coasting*, inizia la fase di frenatura, durante la quale viene sviluppata una azione frenante, attraverso la forza F_f (1) che si mantiene costante fino a poco prima dell'arresto del treno e viene sostituita dalla frenatura meccanica.

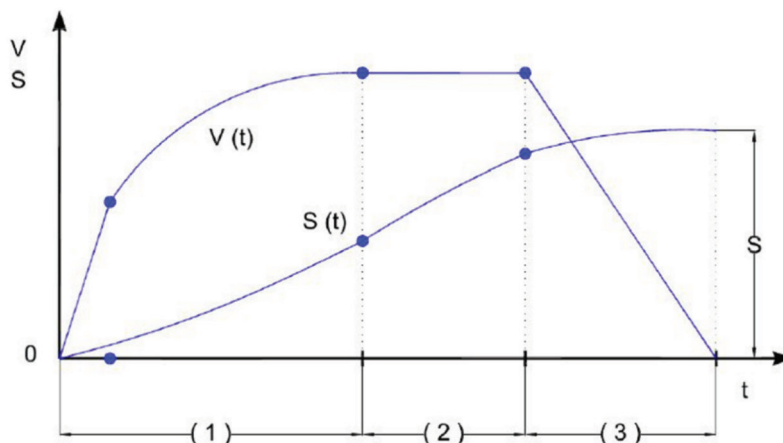


Figura 7 - Diagramma di marcia [16]. (1) avviamento; (2) *coasting*; (3) frenatura.

Figure 7 - Running diagram [16]. (1) starting; (2) *coasting*; (3) braking.

The coasting phase does not require traction force, the vehicle advances by inertia;

The constant speed phase requires a traction force to balance the resistance to motion.

The braking phase requires a force that opposes the motion to stop the train in the intended space.

From a kinematic point of view, the phases of a typical running diagram correspond to:

- *motion uniformly accelerated in the first part and with decreasing acceleration in the second starting phase;*
- *constant speed motion or delayed motion with small decelerations in the coasting phase;*
- *motion uniformly delayed in the braking phase.*

To understand how the electrical and mechanical quantities that come into play during the starting, coasting and braking phases vary, the trends as a function of time detected during the test runs of a subway vehicle are analyzed (Fig. 8) [16].

When starting, the traction force F_m (1) is applied, which produces a progressive increase in speed v (5) with acceleration a (4).

In the second starting phase, the traction force F_m (1) and the acceleration a (4) decrease and the speed v (5) continues to increase more slowly.

The motor current I_m (6) is practically proportional to the traction force F_m , while the line quantities, current I (3) and voltage V (2) are functions of the motion of the train.

As the line current I absorbed by the train increases, there is a voltage drop, due to the electrical resistance of the contact line, which leads to a decrease in the line voltage V .

SCIENZA E TECNICA

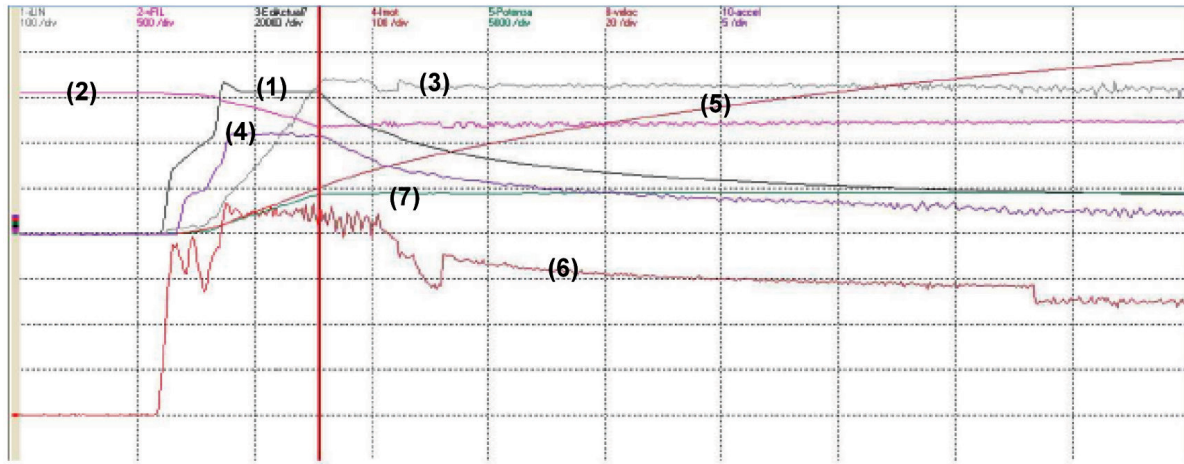


Figura 8 - Fase di avviamento: Forza di trazione (1); Tensione di linea (2); Corrente di linea (3); Accelerazione (4); Velocità (5); Corrente di motore (6); Potenza elettrica (7) [16].

Figure 8 - Starting phase: Traction force (1); Line voltage (2); Line current (3); Acceleration (4); Speed (5); Motor current (6); Electrical power (7) [16].

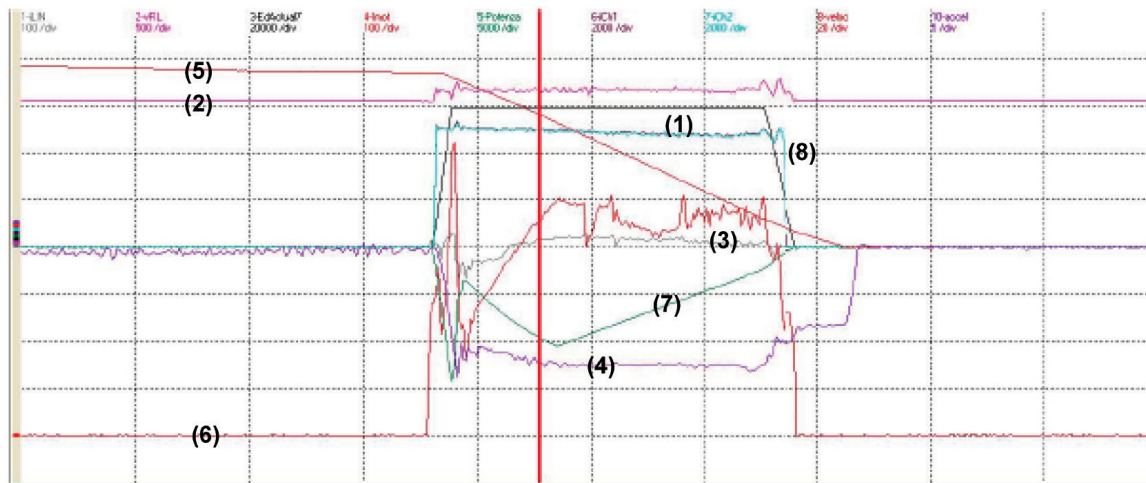


Figura 9 - Fase di *coasting* e frenatura. Forza di trazione, Forza di frenatura (1); Tensione di linea (2); Corrente di linea (3); Accelerazione (4); Velocità (5); Corrente di motore (6); Potenza elettrica (7); Corrente chopper (8) [16].

Figure 9 - Coasting and braking phase. Traction force, Braking force (1); Line voltage (2); Line current (3); Acceleration (4); Speed (5); Motor current (6); Electrical power (7); Chopper current (8) [16].

L'accelerazione negativa a (4) aumenta fino al valore massimo, si mantiene quindi costante per annullarsi all'arresto del treno; la velocità v (5) dal valore iniziale diminuisce costantemente fino a portarsi al valore zero a treno fermo.

Durante la frenatura elettrodinamica i motori di trazione vengono utilizzati come generatori di energia elettrica. L'energia resa disponibile dalla trasformazione della energia cinetica in energia elettrica può essere utilizzata

The electric power P (7) increases linearly up to the maximum value of the first starting phase and then remains constant in the second phase.

The power P also includes that necessary to power the train's auxiliary services.

The figure refers to the trend of electrical quantities for an isolated train.

SCIENZA E TECNICA

se sono disponibili utilizzatori in grado di riceverla, nel momento in cui viene prodotta, altrimenti deve essere accumulata per usi successivi oppure dissipata in calore.

Quanto sopra si individua nella Fig. 9, dove si evidenzia l'aumento della potenza elettrica, (7), e quindi della corrente motore, (6), che non potendo fluire sulla linea viene immessa nel reostato per essere dissipata e da qui l'aumento delle correnti, (8), nei rami del chopper.

4. Recupero dell'energia con la frenatura elettrodinamica

L'architettura elettrica tipica di un azionamento elettrico ad Alta Tensione (AT 1500 Vcc), con riferimento ad una unità di trazione costituito da due motrici (M-S) ed una rimorchiata (R), comprende principalmente i seguenti elementi (Fig. 10) [16]:

- 1Q1 pantografo;
- 1Q2 interruttore extrarapido;
- 1A1 1A2 convertitore di trazione;
- M motore di trazione;
- 1R4 - 8 reostato di frenatura;
- CA convertitore ausiliario.

Il convertitore di trazione è alimentato direttamente dalla linea di contatto, protetto da un interruttore extrarapido ed è costituito da:

- Inverter trifase.

During the coasting phase (Fig. 9) the vehicle advances by inertia. The speed v (5) decreases very slowly, the driving force F_m (1) is practically zero as is the acceleration a (4).

The line voltage V (2) is constant, the motor current I_m (6) is zero, while the line current I (3) and the power P (7) are minimal and due only to the absorption of the auxiliary systems of the train.

After the coasting phase, the braking phase begins, during which a braking action is developed through the force F_r (1) which remains constant until shortly before the train stops and is replaced by mechanical braking.

The negative acceleration a (4) increases up to the maximum value, then remains constant to vanish when the train stops; the speed v (5) decreases constantly from the initial value until it reaches zero with the train stopped.

During electrodynamic braking, traction motors are used as electrical energy generators. The energy made available by the transformation of kinetic energy into electrical energy can be used if users capable of receiving it are available at the moment it is produced, otherwise it must be accumulated for subsequent uses or dissipated as heat.

The above is identified in Fig. 9, where the increase in the electrical power, (7), and therefore in the motor current, (6), is highlighted, which, not being able to flow on the line, is introduced into the rheostat to be dissipated and from here the increase in currents, (8), in the chopper branches.

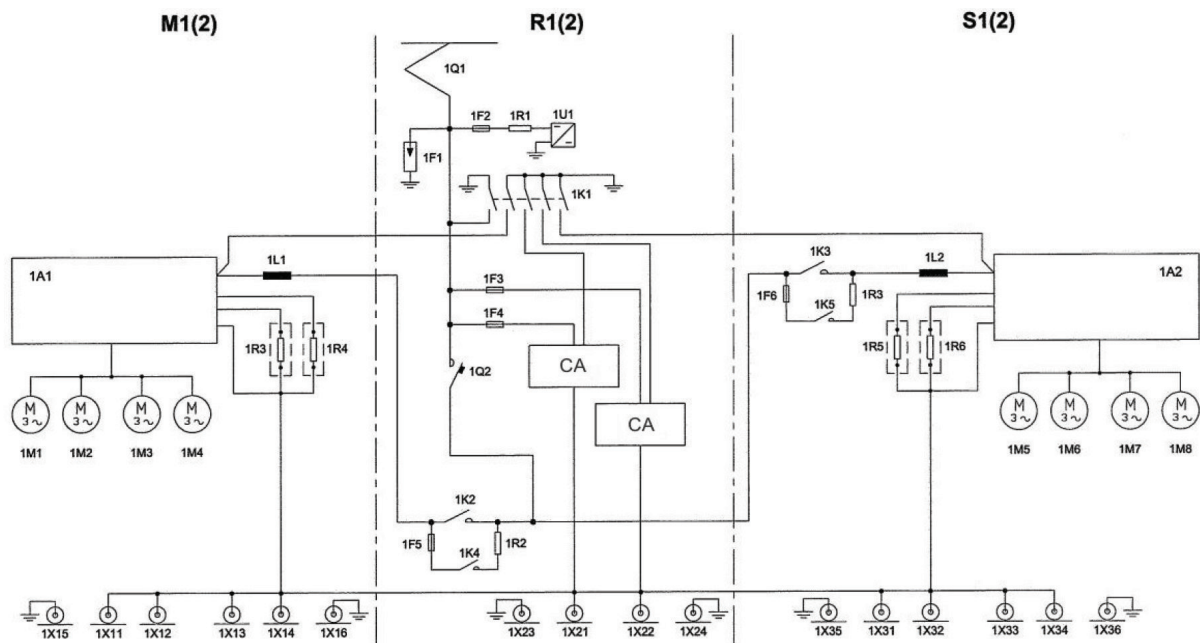


Figura 10 - Schema principale sistema AT di trazione [16].
Figure 10 - Main diagram of the AT traction system [16].

SCIENZA E TECNICA

- Chopper di frenatura.

L'inverter, di tipo a tensione impressa, è alimentato direttamente dalla linea di contatto, con uscita a tensione e frequenza variabile ed alimenta quattro motori connessi in parallelo.

Il chopper di frenatura è costituito da due rami distinti che permettono di dissipare in tutto o in parte l'energia di frenatura su due sezioni separate del reostato di frenatura.

Il sistema di controllo della trazione avviene tramite l'unità di controllo della trazione ed agisce sul convertitore e quindi sull'alimentazione dei motori sulla base dei comandi e controlli che vengono impartiti per la marcia del treno sia in trazione che in frenatura.

Il treno è equipaggiato con due tipi di impianti frenanti: freno elettrodinamico e freno elettropneumatico.

I convertitori, sfruttando i motori come generatori, consentono la frenatura elettrodinamica con le seguenti modalità di utilizzazione della energia elettrica prodotta:

- recupero in linea: tutta l'energia viene restituita alla linea di alimentazione;
- mista: l'energia viene in parte restituita alla linea di alimentazione ed in parte viene dissipata sul reostato di frenatura;
- reostatica: tutta l'energia viene dissipata sul reostato di frenatura.

La ripartizione della frenatura elettrodinamica tra recupero in linea, mista e reostatica è legata alla recettività della linea aerea e dipende essenzialmente dalla tensione di linea a cui avviene la frenatura.

Per valori della tensione superiore a quello ammesso dalla linea, l'energia viene totalmente dissipata sui reostati di frenatura oppure esclusa totalmente con l'inserimento completo della frenatura pneumatica.

La ripartizione tra recupero, mista e reostatica viene operata tramite il controllo dello sforzo frenante elettrico; durante la frenatura, il reostato dissipa tutta o parte dell'energia erogata dai motori di trazione in relazione alla capacità recettiva della linea. Per tale ragione il dimensionamento termico del reostato di frenatura viene eseguito considerando che debba essere dissipata tutta l'energia di frenatura.

Nell'esempio riportato nella Fig. 9 la fase di frenatura avviene senza recupero in linea, l'energia viene totalmente dissipata nel reostato.

La Potenza elettrica generata durante la fase di frenatura è funzione della forza F_f , della velocità v di marcia e del rendimento meccanico ed elettrico.

La corrente nel motore I_m (6) aumenta, si mantiene praticamente costante e, non potendo essere recepita dalla linea viene immessa nel reostato per essere dissipata, da cui l'aumento delle correnti I_c (8) nei rami del chopper. La corrente di linea I (3) è praticamente nulla, mentre la tensione V (2) aumenta oltre il valore nominale.

La possibilità di utilizzazione dell'energia elettrica

4. Energy recovery with electrodynamic braking

The typical electrical architecture of a High Voltage electric drive (AT 1500 V_{dc}), with reference to a traction unit consisting of two tractor units (M-S) and a towed one (R), mainly includes the following elements (Fig. 10) [16]:

- 1Q1 pantograph;
- 1Q2 extra-rapid switch;
- 1A1 1A2 traction converter;
- M traction motor;
- 1R4 - 8 braking rheostat;
- AC auxiliary converter.

The traction converter is powered directly by the contact line, protected by an extra-fast switch and is made up of:

- Three-phase inverter.
- Braking chopper.

The inverter, impressed voltage type, is powered directly by the contact line, with variable voltage and frequency output and powers four motors connected in parallel.

The braking chopper is made up of two distinct branches which allow the braking energy to be dissipated in whole or in part on two separate sections of the braking rheostat.

The traction control system occurs via the traction control unit and acts on the converter and therefore on the power supply to the motors on the basis of the commands and controls that are given for running the train in both traction and braking.

The train is equipped with two types of braking systems: electrodynamic brake and electropneumatic brake.

The converters, using the motors as generators, allow electrodynamic braking with the following methods of using the electrical energy produced:

- on line recovery: all the energy is returned to the power supply line;
- mixed: the energy is partly returned to the power supply line and partly dissipated on the braking rheostat;
- rheostatic: all the energy is dissipated on the braking rheostat.

The distribution of electrodynamic braking between in-line, mixed and rheostatic recovery is linked to the receptivity of the overhead line and essentially depends on the line voltage at which braking occurs.

For voltage values higher than that permitted by the line, the energy is totally dissipated on the braking rheostats or totally excluded with the complete activation of the pneumatic braking.

The distribution between recovery, mixed and rheostatic is carried out by controlling the electric braking effort; during braking, the rheostat dissipates all or part of the energy supplied by the traction motors in relation to the receptive capacity of the line. For this reason, the thermal sizing of the braking rheostat is carried out considering that all the braking energy must be dissipated.

SCIENZA E TECNICA

prodotta durante la fase di frenatura elettrodinamica dipende dalla ricettività della linea di contatto.

L'analisi dei diagrammi di marcia dei treni nel piano spazio – tempo permette di formulare alcune considerazioni.

In ambito metropolitano l'elevata frequenza del servizio e la lunghezza delle tratte favoriscono le situazioni di sincronismo tra la frenatura di un treno e l'avviamento di un altro treno.

Ad esempio nel caso della Fig. 11 si verificano parziali sovrapposizioni temporali tra la frenatura del treno B in arrivo alla stazione S2 e l'avviamento del treno A dalla stazione S3.

Si tratta di un caso ideale in cui i due treni hanno identico diagramma di marcia, identico tempo di sosta alle fermate ed hanno un distanziamento temporale costante.

Nella realtà le variazioni del tempo di sosta da treno a treno e da fermata a fermata, le differenze tra i diagrammi di marcia hanno un effetto determinante sul recupero dell'energia di frenatura.

Nel caso in cui non vi sia la possibilità di trasferire l'energia recuperata ai treni in linea o alla rete esterna o accumularla nella sottostazione o a bordo del rotabile si deve dissiparla nelle resistenze elettriche.

Anche senza recupero permangono i vantaggi della frenatura elettrodinamica che elimina la produzione di polveri e l'usura dei dispositivi della frenatura meccanica.

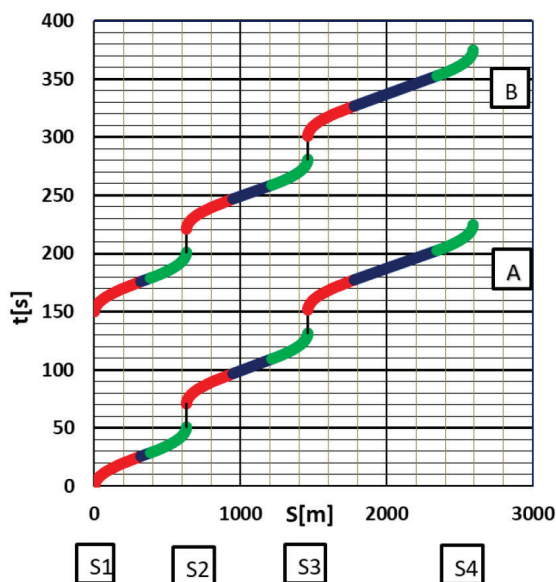


Figura 11 – Esempio di diagrammi di marcia, spazio-tempo, di due treni con distanziamento temporale costante.

Figure 11 – Example of travel diagrams, space-time, of two trains with constant temporal spacing.

In the example shown in Fig. 9 the braking phase occurs without online recovery; the energy is totally dissipated in the rheostat.

The electrical power generated during the braking phase is a function of the force F_p , the travel speed v and the mechanical and electrical efficiency.

The current in the motor I_m (6) increases, remains practically constant and, as it cannot be received by the line, it is fed into the rheostat to be dissipated, hence the increase in the currents I_c (8) in the chopper branches. The line current I (3) is practically zero, while the voltage V (2) increases beyond the nominal value.

The possibility of using the electrical energy produced during the electrodynamic braking phase depends on the receptivity of the contact line.

The analysis of the train running diagrams in the space-time plane allows us to formulate some considerations.

In the metropolitan area, the high frequency of the service and the length of the routes favor situations of synchronism between the braking of a train and the starting of another train.

For example, in the case of Fig. 11, partial temporal overlaps occur between the braking of train B arriving at station S2 and the starting of train A from station S3.

This is an ideal case in which the two trains have the same running diagram, identical stopping time at the stops and have a constant temporal spacing.

In reality, the variations in dwell time from train to train and from stop to stop, the differences between the running diagrams have a decisive effect on the recovery of braking energy.

If there is no possibility of transferring the recovered energy to the online trains or to the external network or accumulating it in the substation or on board the rolling stock, it must be dissipated in the electrical resistors.

Even without recovery, the advantages of electrodynamic braking remain, which eliminates the production of dust and wear of the mechanical braking devices.

5. Experimental findings

A specific measurement campaign carried out on line B of the Rome Metro, as part of the research [16], made it possible to evaluate energy consumption during normal operation of the line and, through electrodynamic braking, the possibility of energy saving.

5.1. Electrical power supply system of the line

The line power system includes (Fig. 12):

- two energy delivery points of the Municipal Energy (ACEA), at the Electrical Substations (SSE) terminals of the line;

SCIENZA E TECNICA

5. Rilievi sperimentali.

Una specifica campagna misure condotta sulla linea B della Metropolitana di Roma, nell'ambito della ricerca [16], ha permesso di valutare i consumi energetici durante il normale esercizio della linea e, attraverso la frenatura elettrodinamica, la possibilità di risparmio energetico.

5.1. Sistema elettrico di alimentazione della linea

Il sistema di alimentazione della linea comprende (Fig. 12):

- due punti di consegna dell'energia dell'Azienda Comunale Energia e Ambiente (ACEA), presso le Sottostazioni Elettriche (SSE) terminali della linea;
- rete di distribuzione a 20 kV, esercita radialmente che alimenta in "entra - esce".

Dalle sbarre di attestazione della resa ACEA della SSE Laurentina, a 20kV, sono derivate:

- due linee di alimentazione verso le SSE Magliana, Mercati generali e Circo Massimo, inclusa l'area del Deposito Officina della linea;
- linea di alimentazione delle utenze di stazione (cabine MT/BT) verso la stazione Colosseo (vedi 1, Fig. 12).

Dalle sbarre di attestazione della resa ACEA della SSE Rebibbia, a 20 kV, sono derivate:

- le due linee di alimentazione verso le SSE Monti Tiburtini, Bologna e Termini;
- la linea di alimentazione delle utenze di stazione (cabine MT/BT) verso la stazione Termini (vedi 2, Fig. 12).

In caso di fuori servizio di uno dei centri ACEA presso le SSE terminali, subentra una resa ACEA baricentrica della linea B, mantenendo lo stesso livello di fornitura elettrica.

Le utenze delle stazioni sono alimentate da cabine di trasformazione collegate normalmente in "entra - esce" da due linee a 20 kV con origine nelle due SSE terminali sopra citate; tali cabine sono provviste di due trasformatori (20.000/400 V), uno dei quali è di riserva, di taglia variabile tra 160 kVA e 800 kVA. In alcuni casi le utenze di stazione sono alimentate direttamente dalle cabine MT/BT dei servizi ausiliari delle SSE.

- 20 kV distribution network, operates radially and feeds "in - out".

From the ACEA electricity yield of the SSE Laurentina, at 20kV, the following are derived:

- two supply lines towards the SSE Magliana, Mercati generali and Circo Massimo, including the line's Workshop Depot area;
- power line for station users (MV/LV cabins) towards the Colosseum station (see 1, Fig. 12).

From the ACEA electricity yield of the SSE Rebibbia, at 20 kV, the following are derived:

- the two supply lines towards the SSE Monti Tiburtini, Bologna and Termini;
- the power line of the station users (MV/LV cabins) towards Termini station (see 2, Fig. 12).

In the event of one of the ACEA centers at the SSE terminals going out of service, a central ACEA output of line B takes over, maintaining the same level of electricity supply.

The users of the stations are powered by transformation cabins normally connected "in - out" by two 20 kV lines originating in the two SSE terminals mentioned above; these substations are equipped with two transformers (20,000/400 V), one of which is a reserve, of variable size between 160 kVA and 800 kVA. In some cases the station users are powered directly by the MV/LV substations of the SSE auxiliary services.

5.2. Electrical power substations

The SSE electrical substations are equipped with AC/DC conversion units; each conversion group is made up of a transformer with a power of 3800 kVA, with double secondary, with a ratio of 20kV/0.590-0.590 kV (D/DY), and two static diode bridge rectifier groups with twelve-phase reaction. The total power of 3,500 kW (nominal rectified current of 2333 A). The conversion group is completed by the complex of direct current cells containing the auxiliary equipment (group cells) and the extra-rapid switches (power supply cells) intended to supply the 1,500 VDC power supply. to the contact line.

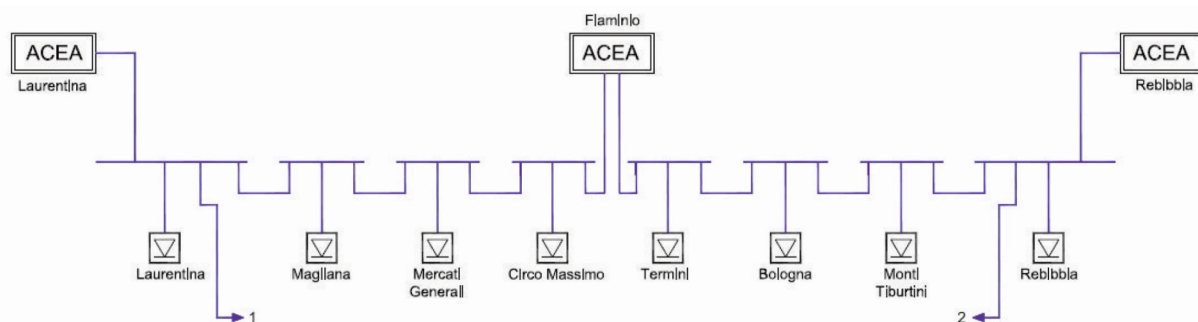


Figura 12 - Sistema di alimentazione di massima della Metropolitana di Roma [16].

Figure 12 - General power supply system of the Rome Metro [16].

SCIENZA E TECNICA

5.2. Sottostazioni elettriche di alimentazione

Le Sottostazioni elettriche SSE sono dotate di gruppi di conversione c.a/c.c.; ogni gruppo di conversione è costituito da un trasformatore della potenza di 3800 kVA, a doppio secondario, con rapporto 20kV/0,590-0,590 kV (D/DY), e da due gruppi raddrizzatori statici a ponte di diodi con reazione dodecafase. La potenza complessiva di 3.500 kW (corrente nominale raddrizzata di 2333 A). Completano il gruppo di conversione il complesso di celle in corrente continua contenenti le apparecchiature ausiliarie (celle di gruppo) e gli interruttori extrarapidi (celle alimentatori) destinati a fornire l'alimentazione a 1.500 Vc.c. alla linea di contatto.

Tutti gli alimentatori che collegano i gruppi di conversione della SSE alla linea di contatto hanno medesima sezione $2 \times (1 \times 500 \text{ mm}^2)$.

La linea di contatto è costituita da 2 fili di contatto da 100 mm^2 , 2 funi portanti da 120 mm^2 , 2 alimentatori di 120 mm^2 ed ha una sezione complessiva di 680 mm^2 .

5.3. Strumentazione di base

La strumentazione di base per le misure è stata individuata nello strumento analizzatore di rete Fluke 434/435, (Fig. 13). L'analizzatore di rete viene inserito sia sui circuiti amperometrici che voltmetrici per analizzare le seguenti grandezze elettriche: tensione, corrente, potenza, energia, armoniche di tensione e corrente, fattore di potenza.

5.4. Esecuzione delle misure.

Le misure sono state effettuate contemporaneamente presso la SSE Laurentina e presso la SSE Rebibbia nelle ore di punta mattutine nel mese di febbraio 2010 durante l'esercizio con il minimo cadenzamento fra i treni pari a 240 sec, con numero dei treni in linea 21, di cui n° 11 nella tratta Rebibbia – Cavour (Tronco A) e n° 10 nella tratta Laurentina – Colosseo (Tronco B) [16].

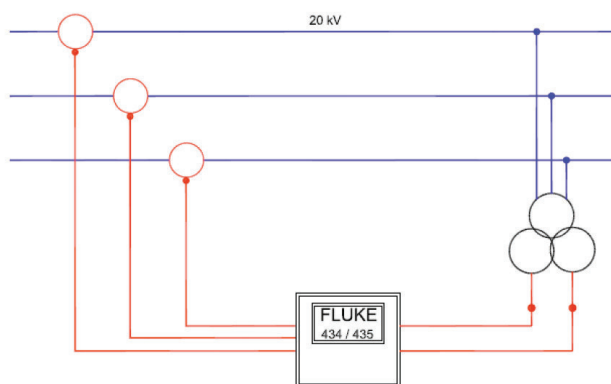


Figura 13 - Strumentazione di base [16].
Figure 13 - Basic instrumentation [16].

All the power supplies that connect the SSE conversion groups to the contact line have the same $2 \times (1 \times 500 \text{ mm}^2)$ section.

The contact line is made up of 2 contact wires of 100 mm^2 , 2 load-bearing cables of 120 mm^2 , 2 feeders of 120 mm^2 and has a total section of 680 mm^2 .

5.3. Basic instrumentation

The basic instrumentation for the measurements was identified in the Fluke 434/435 network analyzer instrument, (Fig. 13). The network analyzer is inserted on both amperometric and voltmetric circuits to analyze the following electrical quantities: voltage, current, power, energy, voltage and current harmonics, power factor.

5.4. Carrying out measurements.

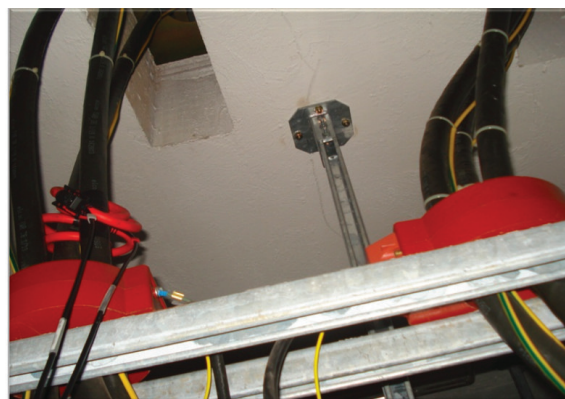
The measurements were carried out simultaneously at the SSE Laurentina and at the SSE Rebibbia during the morning rush hours in February 2010 during operation with the minimum timing between trains equal to 240 sec, with number of trains on line 21, of which 11 in the Rebibbia – Cavour section (Section A) and 10 in the Laurentina – Colosseum section (Section B) [16].

During the tests, the energy absorptions with and without recovery taken from the bars of the SSE Laurentina and the SSE Rebibbia were measured (Fig. 14).

The measurement recording interval was one second; the values of the measured power P_a represent the overall power of both the traction systems and the civil systems.

5.5. Processing of results. Analysis of consumption and energy savings

An example of the measurements carried out [16] is shown in Fig. 15 in which the trend of the powers is com-



SCIENZA E TECNICA

Durante le prove sono stati misurati gli assorbimenti di energia con e senza recupero prelevati dalle sbarre della SSE Laurentina e della SSE Rebibbia (Fig. 14).

L'intervallo della registrazione della misura è stato di un secondo; i valori delle potenze misurate P_a rappresentano la potenza complessiva sia degli impianti di trazione che degli impianti civili.

5.5. Elaborazione dei risultati. Analisi dei consumi e risparmi energetici

Un esempio delle misure effettuate [16] è riportato nella Fig. 15 in cui vengono confrontati per i due tronchi A e B l'andamento delle potenze, in funzione del tempo, della durata di 5min. Le prove 1 e 2 sono effettuate in giorni diversi pertanto, il confronto viene riferito ai valori medi della potenza.

La potenza misurata corrisponde alla somma delle potenze richieste per la trazione, delle utenze di stazione e del deposito.

Tenuto conto che gli assorbimenti di stazione e di deposito sono praticamente costanti durante l'esercizio, le differenze tra le misure dipendono dalle differenze di assorbimento per la trazione.

La potenza media misurata per il tronco A vale 11,8MW senza recupero e 7,8MW con recupero. La potenza media misurata per il tronco B vale 7,2MW senza recupero e 7,4MW con recupero.

La potenza misurata con recupero corrisponde a quella richiesta alla SSE dai treni in avviamento decurtata di quella fornita dai treni in frenatura elettrodinamica.

I valori ottenuti mostrano l'efficacia del recupero di energia con la frenatura elettrodinamica.

L'andamento irregolare della potenza in funzione del tempo dipende dalla sovrapposizione temporale delle fasi di avviamento e frenatura di treni diversi.

La differenza tra la potenza assorbita senza recupero e con recupero si vede soprattutto nel tronco A in cui la distanza tra le fermate è più corta rispetto a quella del tron-

co B, come funzione di tempo, lasting 5min. Tests 1 and 2 are carried out on different days therefore the comparison refers to the average power values.

The measured power corresponds to total power required for traction, station users and depot.

The station and depot power required are practically constant during operation, the differences between the measurements depend on the differences in traction power required.

The average power measured for section A is 11.8MW without recovery and 7.8MW with recovery. The average power measured for section B is 7.2MW without recovery and 7.4MW with recovery.

The power measured with recovery corresponds to that required from the SSE by the starting trains minus that provided by the electrodynamic braking trains.

The values obtained show the effectiveness of energy recovery with electrodynamic braking.

The irregular trend of power as a function of time depends on the temporal overlap of the starting and braking phases of different trains.

The difference between the power absorbed without recovery and with recovery is seen above all in section A where the distance between stops is shorter than that of section B. The distribution of the lengths of the sections is shown in Fig. 16 and Fig. 17.

In short distance between stops, the constant speed driving phase is reduced or almost non-existent, the starting and braking phases are consecutive and more frequent than in long distance between stops.

In section A, in addition to the shorter average length, there is also a greater concentration of values around the average which could favor the possibility of synchronization of the braking phases of a train with the starting phases of another train.

The power trend also depends on the running speed: the irregularities in the operation of the trains on the line influence the overlaps of the motion phases and therefore the overall power required from the SSE.

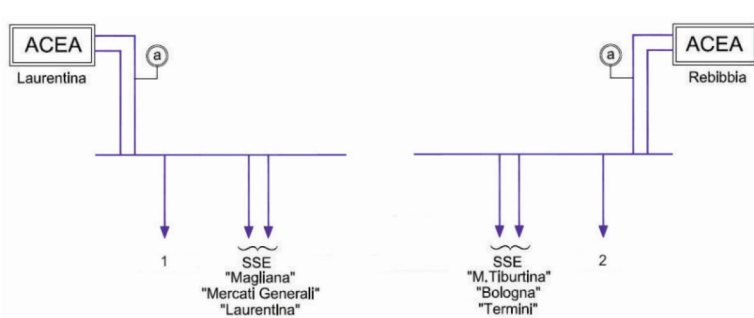


Figura 14 - Punti di misura presso le SSE Laurentina e Rebibbia della linea B [16].
Figure 14 - Measurement points at the Laurentina and Rebibbia SSEs of line B [16].

SCIENZA E TECNICA

co B. La distribuzione delle lunghezze delle tratte è riportata nelle Fig. 16 e Fig. 17.

Nelle tratte corte la fase di marcia a velocità costante è ridotta o quasi nulla, le fasi di avviamento e di frenatura sono consecutive e più frequenti rispetto alle tratte lunghe.

Nel tronco A oltre alla minore lunghezza media si ha anche una maggiore concentrazione dei valori intorno alla media che potrebbe favorire la possibilità di sincronismo delle fasi di frenatura di un treno con le fasi di avviamento di un altro treno.

L'andamento della potenza dipende inoltre dall'andamento della marcia: le irregolarità dell'esercizio dei treni sulla linea influenzano le sovrapposizioni delle fasi del moto e quindi la potenza complessiva richiesta alla SSE.

La linea metropolitana caratterizzata da alta frequenza e tratte percorse per la maggior parte in trazione e frenatura si presta ad un recupero di energia particolarmente efficace.

A titolo di esempio si riporta nella Fig. 18 il diagramma spazio-tempo dell'andamento teorico di treni di una linea ipotetica percorsa nei due versi con distanziamento temporale costante.

Le linee tratteggiate verticali sono in corrispondenza di fermate; le linee orizzontali consentono di verificare istante per istante la contemporaneità delle fasi del moto dei vari treni. Come si può osservare vi sono istanti in cui si sovrappongono fasi di avviamento e fasi frenatura e istanti in cui sono sfalsate.

Nel caso reale intervengono fattori aleatori che influenzano il diagramma di marcia: tipiche sono le soste alle fermate che possono variare da treno a treno e da fermata a fermata in funzione della quantità di passeggeri presenti.

Le simulazioni sviluppate nella ricerca, riportate in precedenti lavori [3][4][10][15] hanno evidenziato per una linea ipotetica l'effetto del distanziamento temporale e della distanza tra le fermate sul recupero di energia misurato dal rapporto tra la differenza di energia senza e con recupero.

I coefficienti di recupero teorici per linee esercite con diversi valori del distanziamento temporale costante per tutti i treni, compreso tra 90s e 240s, variano, in funzione della distanza tra le fermate supposta uniforme per tutta la linea, tra 0 e poco meno del 50% (Fig. 19): I valori teorici minimi

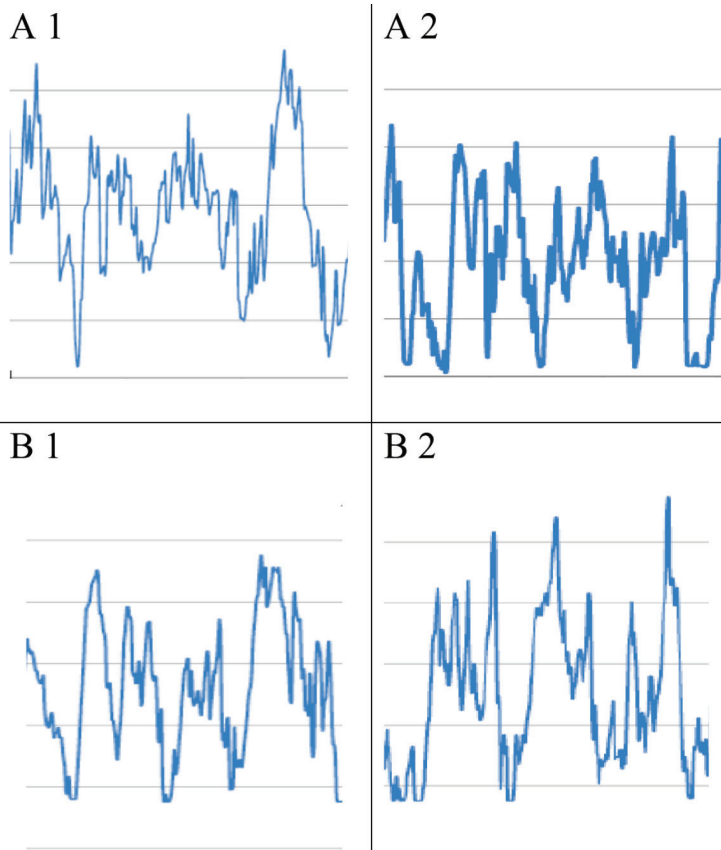


Figura 15 - Esempio di potenza misurata in funzione del tempo. Durata 5min (Elaborazione da [16]). A1: Tronco A senza recupero; A2: Tronco A con recupero; B1: Tronco B senza recupero; B2: Tronco B con recupero.

Figure 15 - Example of power measured as a function of time. Duration 5min (Elaboration from [16]). A1: Section A without recovery; A2: Section A with recovery; B1: Section B without recovery; B2: Section B with recovery.

The metropolitan line characterized by high frequency and sections traveled mostly in traction and braking lends itself to particularly effective energy recovery.

As an example, Fig. 18 shows the space-time diagram of the theoretical progress of trains of a hypothetical line traveled in both directions with constant temporal spacing.

The vertical dotted lines correspond to stops; the horizontal lines allow to verify the simultaneity of the motion phases of the various trains. As can be seen, there are times in which the starting phases and braking phases overlap and times in which they are staggered.

In the real case, random factors intervene which influence the running diagram: typical are the stops times which can vary from train to train and from stop to stop depending on the quantity of passengers.

The simulations developed in the research, reported in

SCIENZA E TECNICA

si hanno per piccoli valori del distanziamento temporale (90 s) e distanza media tra le fermate intorno a 1.000m.

L'ampia variazione dei risultati conferma il significativo effetto del distanziamento teorico sulla possibilità di recupero energetico.

6. Conclusioni

Lo studio ha evidenziato i contributi al consumo di energia sia degli impianti civili sia degli impianti di trazione. Le relazioni tra la potenza e le prestazioni degli impianti di illuminazione, ventilazione e traslazione consentono di definire le potenze corrispondenti alle effettive esigenze.

Le utenze civili di stazione usufruiscono di sistemi di regolazione finalizzati ad adeguare la potenza in funzione della effettiva presenza degli utenti legata alla presenza del treno.

La struttura della linea ed il programma di esercizio influenzano il recupero di energia mediante il trasferimento della energia prodotta dalla frenatura elettrodinamica ad altri treni che si trovano in fase di avviamento nel tratto di linea alimentati dalla stessa SSE, in assenza di sistemi di accumulo a bordo e di SSE reversibili.

Nei casi esaminati i vantaggi del recupero per distanze medie tra le fermate intorno a 800 m sono superiori rispetto a quelli per distanze medie tra le fermate intorno a 1.000 m.

Il distanziamento temporale e la variazione delle distanze determinano la possibilità di scambio di energia tra treni. Sistemi di comando e controllo che agiscono automaticamente sulle partenze dalle fermate e sulle velocità basate sull'andamento reale della circolazione potrebbero fornire contributi positivi al recupero di energia.

L'adozione di specifiche soluzioni tecnologiche e gestionali, pur comportando maggiori complessità impiantistiche, può contribuire al risparmio energetico e deve risultare da una analisi dell'efficienza tecnico economica in fase progettuale. I risultati ottenuti mostrano in particolare i vantaggi conseguiti, in termini di risparmio energetico con l'adozione della frenatura elettrodinamica.

La ricerca sviluppata e la possibilità di misure su sistemi reali hanno fornito preziose indicazioni tecnico scientifiche utili per gli studi e le applicazioni ulteriori [24].

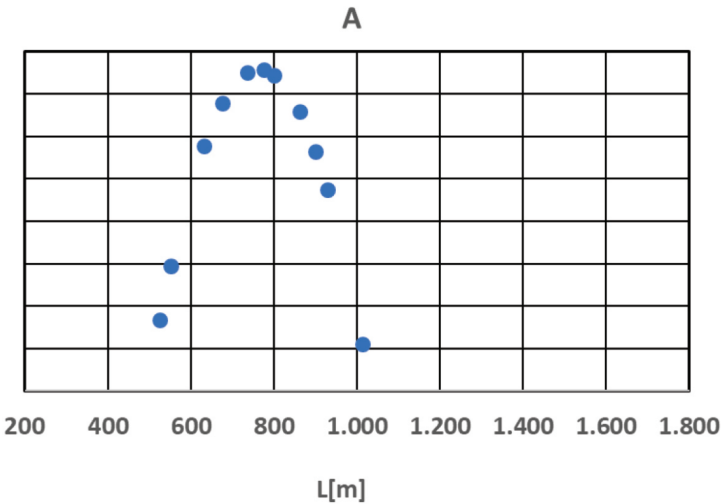


Figura 16 - Distribuzione delle lunghezze L delle tratte nel tronco A.
Figure 16 - Distribution of distance L between stops in section A.

previous works [3][4][10][15], have highlighted for a hypothetical line the effect of the temporal spacing and the distance between the stops on the energy recovery measured by the ratio between the difference in energy without and with recovery.

The theoretical recovery coefficients for lines operated with different values of constant temporal spacing for all trains, between 90s and 240s, vary, depending on the distance between stops which is assumed to be uniform for the entire line, between 0 and just under 50% (Fig. 19): The minimum theoretical values occur for small values of tem-

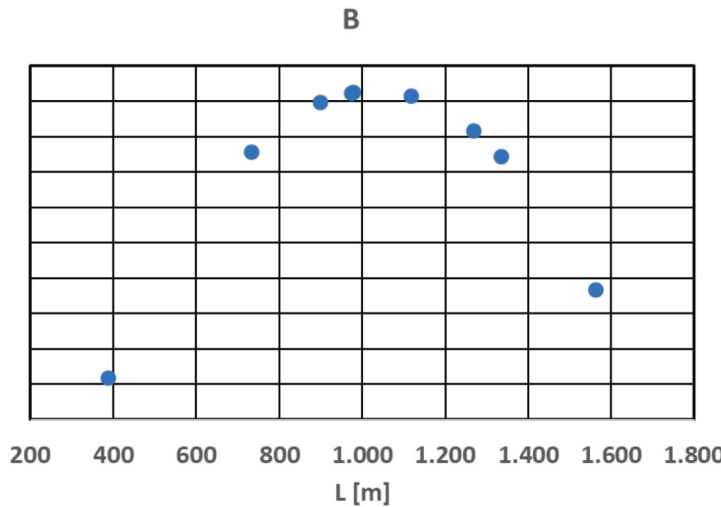


Figura 17 - Distribuzione delle lunghezze L delle tratte nel tronco B.
Figure 17 - Distribution of distance L between stops in section B.

SCIENZA E TECNICA

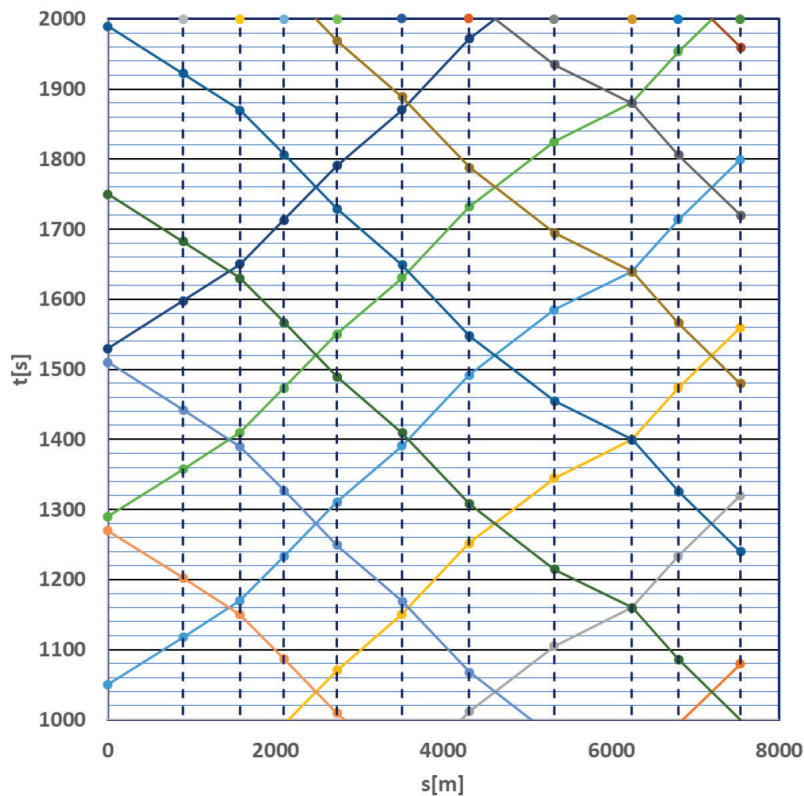


Figura 18 – Esempio di digramma tempo-spazio teorico per una linea percorsa nei due versi.

Figure 18 – Example of a theoretical time-space diagram for a line traveled in two directions.

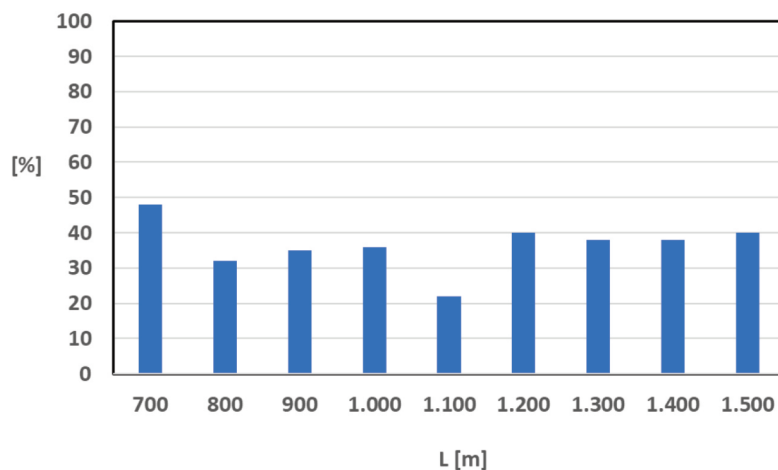


Figura 19 – Intervallo di variazione del coefficiente di recupero per distanziamento tra 90s e 240s in funzione della distanza tra le fermate (Elaborazione da [15]).

Figure 19 – Range of variation of the recovery coefficient for spacing between 90s and 240s as a function of the distance between stops (Elaboration from [15]).

poral spacing (90 s) and average distance between stops of around 1,000m.

The wide variation in results confirms the significant effect of theoretical distancing on the energy recovery.

6. Conclusions

The study highlighted the contributions to energy consumption of both civil systems and traction systems. The relationships between the power and the performance of the lighting, ventilation and translation systems allow defining the powers corresponding to the actual needs.

Civil station users benefit from regulation systems aimed at adapting power based on the actual presence of users linked to the presence of the train.

The structure of the line and the operating program influence energy recovery through the transfer of the energy produced by electrodynamic braking to other trains that are in the starting phase in the section of the line powered by the same SSE, in the absence of on-board storage systems and reversible SSEs.

In the cases examined, the recovery benefits for average distances between stops around 800m are greater than those for average distances between stops around 1,000m.

Temporal spacing and variation in distances determine the possibility of energy exchange between trains. Command and control systems that automatically act on departures from stops and speeds based on real traffic trends could provide positive contributions to energy recovery.

The adoption of specific technological and management solutions, although involving greater system complexity, can contribute to energy saving and must result from an analysis of the technical-economic efficiency in the design phase. The results obtained show in particular the advantages achieved in terms of energy savings with the adoption of electrodynamic braking.

The research developed and the possibility of measurements on real systems have provided valuable technical-scientific indications useful for further [24] studies and applications.

SCIENZA E TECNICA

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] ADINOLFI A., DI MARIO V., LAMEDICA R., PRUDENZI A. (1997), "La linea B della metropolitana di Roma, una campagna di misura per la valutazione del recupero dell'energia di frenatura", *Ingegneria Ferroviaria*, n° 3, pp. 85-93.
- [2] ADINOLFI A., LAMEDICA R., MODESTO C., PRUDENZI A., VIMERCATI S. (1998), "Experimental assessment of energy saving due to trains regenerative braking in an electrified subway line", *IEEE Trans. Power Deliv.*, n° 13, Vol. 4, pp. 1536-1542.
- [3] 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*. September, 225: 475-482.
- [4] MALAVASI G. (1998), "Analysis of rail rapid transit systems by means of simulation models *Urban Transport and the environment for the 21 th Century*". Lisboa 9.1998 Computational Mechanics Publications/WIT Press, Southampton, UK.
- [5] DOMÍNGUEZ M., FERNÁNDEZ A., CUCALA A.P., CAYUELA L.P. (2008), "Computer- aided design of ATO speed commands according to Energy consumption criteria". *Computers in Railways XI* (WIT Press 2008), pp. 183-192.
- [6] FIOCCARDELLI F., ROSCIA M., ZANINELLI D. (2006), "Optimizzazione di storage devices for regenerative braking Energy in subway system". *IEEE*.
- [7] FIOCCARDELLI F., ROSCIA M., ZANINELLI D. (2007), "Ultracapacitors application for energy saving subway system". *IEEE*.
- [8] STEINER M., SCHOLTEN J. (2004), "Energy storage on board of DC fed railway vehicles". *IEEE*.
- [9] LIU H., MAO B., DING Y., JIA W., LAI S. (2007), "Train energy saving with evaluation urban mass transit system. *Journal of transportation System Engineering and Information Technology*".
- [10] PALLESCHI P. (2008-2009), "Simulazione di marcia dei treni metropolitani per lo studio dei consumi energetici". Sapienza Università di Roma. Tesi di laurea.
- [11] GADDI F., GALIMBERTI P., ROSASCO M. (1992), "Recupero integrale dell'energia di frenatura dei veicoli sulla linea 1 della metropolitana di Napoli: primi risultati". Sviluppo e prospettive dei trasporti elettrificati: ricerca ed innovazione, Genova.
- [12] ACCATTATIS F. (1980), "Confronto fra i sistemi di trazione per ferrovie metropolitane nei riguardi del consumo di energia". *Ingegneria Ferroviaria* – Giugno.
- [13] SCARPONI P., MALAVASI G., "Approccio sistemistico allo studio dei veicoli per ferrovie metropolitane". *Trasporti e trazione* – 1/90.
- [14] GODBERSEN C., GUNSELMANN W., OMASSI G. (2002), "Accumulatori di energia e trasporti urbani di massa". *Ingegneria ferroviaria*, n° 7-8.
- [15] 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 2011. Febbraio.
- [16] DI MARIO V. (2010), "Risparmio energetico nelle ferrovie metropolitane. Sapienza Università di Roma". Tesi di Dottorato. 13-12-2010.
- [17] DI MARIO V., MALAVASI G. (2008), "Electrical regenerative braking in metropolitan railways". In: Eurnex – Zel 2008 "Towards more competitive European rail system". Zilina (Repubblica Slovacca), 4-5 giugno, ZILINA: EDIS ZILINA, vol. 1, p. 102-110.
- [18] MARISCOTTI A., GIORDANO G., SIGNORINO D. (2023), "Energy efficiency Improvement with Reversible Substations for Electrified Transportation System", *Open Transportation Journal*, 17.
- [19] DELLE FEMINE A., GALLO D., GIORDANO D., SIGNORINO D. (2022), "Easy-to-implement measurement method for the energy dissipated on board train with uncertainty estimation". *Measurement* Volume 198, July, 111401.
- [20] DELLE FEMINE A., SIGNORINO D., GALLO D., GIORDANO D. (2022), "A New Approach to Measure the Energy On-Board Train during Braking", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71.
- [21] CASCETTA F., CIPOLLETTA G., DELLE FEMINE A., QUINTANA FERNÁNDEZ J., GALLO D., GIORDANO D., SIGNORINO D. (2021), "Impact of a reversible substation on energy recovery experienced on-board a train" *Measurement* Volume 183, October, 109793.
- [22] 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*, n° 4, 70(4):327-357.
- [23] DALLA CHIARA B., DE FRANCO D., COVIELLO N., PASTRONE D. (2017), "Comparative specific energy consumption between air transport and high-speed rail transport: A practical assessment". *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 52, Part A, May, Pages 227-243.
- [24] MALAVASI G., OTTAVIANI F. (2017), "Recupero di energia durante la frenatura di veicoli ferroviari. Linea Metro A. Convegno CIFI su L'Efficienza Energetica nel Trasporto Ferroviario". Roma, 4 luglio 2017