



# Analisi e valutazione delle strategie di guida ecologica dei treni per la formazione del personale di condotta

## *Analysis and assessment of eco-driving strategies for train drivers training*

Dott. Ing. Claudio MIGLIORINI<sup>(\*)</sup>

Prof. Ing. Stefano RICCI<sup>(\*\*)</sup>

Dott. Ing. Eros TOMBESI<sup>(\*\*)</sup>

**Sommario** - Nell'ambito della crescente attenzione, a livello europeo, per la salvaguardia ambientale ed il risparmio energetico, ad esempio con gli obiettivi del Pacchetto 20-20-20, parte della Direttiva Europea 2009/29 [1], assume importanza lo studio dell'efficienza energetica nella condotta dei treni, nel quale confluiscono l'interesse per i temi ambientali e quello economico per l'ottimizzazione delle risorse. Il presente studio, svolto in collaborazione tra il Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale (DICEA) della Sapienza e Trenitalia, si articola in 2 macro attività: 1) analisi e valutazione dei profili di guida autonomamente adottati del personale di condotta, sulla base di cicli di guida reali e simulati; 2) analisi e valutazione dei profili di guida adottati in risposta ad un generico input di guida "energeticamente efficiente".

### 1. Introduzione

L'uso dell'energia rientra in ogni settore della vita produttiva dell'uomo: questioni ambientali, politiche ed economiche ne fanno strettamente parte. Contribuire al rispetto dell'ambiente, intervenire ad alleggerire l'impatto ambientale e contenere i consumi di energia da combustibili fossili in particolare è indiscutibilmente divenuta una priorità imprescindibile ed un obiettivo con cui si deve misurare l'economia globale [2].

Le motivazioni che spingono la ricerca di una maggiore efficienza energetica nella condotta dei treni si possono sintetizzare in due aspetti basilari: da un lato l'interesse economico verso l'ottimizzazione delle risorse utilizzate, dall'altro quello sempre crescente rispetto alle tematiche ambientali ed al problema del "Riscaldamento Globale".

È in quest'ottica che si collocano vari obiettivi europei quali il "Pacchetto 20-20-20", che prevede la riduzione del 20% delle emissioni di gas serra e l'incremento del 20%

**Summary** - In the framework of increasing attention, at European level, for environmental protection and energy saving, represented by the objectives of the 20-20-20 Package, part of the European Directive 2009/29 [1], the study of energy efficiency in trains driving increase its relevance, whereas the interest in environmental and economic issues converge with resource optimization. This study, carried out in collaboration between the Department of Civil, Building and Environmental Engineering (DICEA) of Sapienza University of Rome and Trenitalia, is divided into two macro activities: 1) analysis and assessment of the independently drivers' driving profiles based on real and simulated driving cycles; 2) analysis and assessment of driving profiles adopted in response to a generic "energy-efficient" driving input.

### 1. Introduction

The use of energy is part of every aspect of productive life: environmental, political and economic issues are an integral part of it. Contributing to environmental compliance, acting to alleviate environmental impact and contain energy consumption has undoubtedly become an indispensable priority and a goal with which the global economy has to match [2].

The motivation behind the pursuit of greater energy efficiency in the trains driving can be summarized in two basic aspects: on one hand, the economic interest in the optimization of the resources used, on the other, the ever increasing relevance of environmental issues and the problem of global warming.

It is in this sense that European objectives such as the "20-20-20 Package" are set, which includes the reduction of 20% of greenhouse gas emissions and the increase of 20% of the energy from renewable sources by 2020 and the "Climate and Energy Framework 2030", which instead sets as

<sup>(\*)</sup> Trenitalia - Direzione Tecnica.

<sup>(\*\*)</sup> Sapienza Università di Roma - DICEA.

<sup>(\*)</sup> Trenitalia - Technical Direction

<sup>(\*\*)</sup> Sapienza University of Rome - DICEA.

dell'energia proveniente da fonti rinnovabili entro il 2020 ed il "Quadro per il clima e l'energia 2030", che invece fissa come obiettivi la riduzione almeno del 40% delle emissioni di gas a effetto serra (rispetto ai livelli del 1990), una quota almeno del 27% di energia proveniente da fonti rinnovabili ed un miglioramento almeno del 27% dell'efficienza energetica da raggiungere entro il 2030. Allo scopo, la Commissione Europea ha finanziato diversi progetti, tra i quali si ricordano TRAINER [3], ECORailS [4] [5] e RAILENERGY.

L'obiettivo del progetto TRAINER è stato in particolare quello di studiare linee guida per portare i macchinisti a guidare nella maniera più efficiente, più sicura e più confortevole possibile (*Eco-driving*) e inoltre sensibilizzare gli operatori ferroviari ad avviare le misurazioni dei consumi energetici, allo scopo di ottimizzare l'efficienza energetica dal punto di vista tecnologico (materiale rotabile e infrastruttura) ed organizzativo.

Il tema dell'efficienza energetica della guida è stato trattato anche durante lo svolgimento del progetto Europeo ECORailS [4], che aveva tra gli obiettivi quello del miglioramento dell'efficienza energetica e la riduzione dell'impatto ambientale della ferrovia in termini di consumi energetici. Il progetto era rivolto in primo luogo agli Enti Pubblici responsabili della programmazione e del finanziamento dei servizi ferroviari regionali.

In particolare, in [5] gli autori trattano circa l'importanza di disporre di sistemi di misurazione dei consumi energetici a bordo, allo scopo di verificare l'efficacia delle tecnologie e delle misure operative impiegate per raggiungere l'obiettivo di ottenere un sistema di trasporto ferroviario più efficiente dal punto di vista energetico; tra queste misure rientra sicuramente la marcia economica.

In [6] vengono descritti modelli per la stima del risparmio energetico potenziale riferiti ad un sistema metropolitano, il primo dei quali (un modello analitico utile in fase di pianificazione operativa del servizio) rappresenta un efficace strumento per ridurre il consumo energetico.

L'utilizzo di un simulatore di guida per il miglioramento delle prestazioni del personale di condotta in termini di consumo energetico viene trattato in [7]; il simulatore in questione prevede un accurato modello di consumo energetico, precedentemente sviluppato e testato attraverso misurazioni a bordo su differenti tipologie di servizi ferroviari. Inoltre, il fatto di essere sviluppato in un foglio di calcolo e di non essere un simulatore in tempo reale, consente da un lato di essere particolarmente facile e familiare da utilizzare per i macchinisti, dall'altro di poter simulare lunghi viaggi in pochi minuti, potendo confrontare i risultati di diversi stili di guida.

In [8] viene proposto un confronto tra un modello di calcolo analitico e misurazioni, allo scopo di quantificare le differenze di consumo tra il caso reale ed un ideale profilo di velocità, realizzato attraverso una simulazione, sfruttando al massimo le caratteristiche di trazione del veicolo. Nella seconda parte viene anche valutata l'inci-

*targets a reduction of at least 40% of greenhouse gas emissions (compared to 1990 levels), a share of at least 27% of energy from renewable energy sources and an improvement of at least 27% of energy efficiency to be achieved by 2030. For this purpose, the European Commission has funded several projects, including, in the rail field, TRAINER [3], ECORailS [4] [5] and RAILENERGY.*

*The aim of the TRAINER project was to study guidelines to teach train drivers to drive in the most efficient, safest and most comfortable way (Eco-driving) and also to alert rail operators to start measuring energy consumption, in order to optimize energy efficiency from the technological and organizational point of view (rolling stock and infrastructure).*

*The theme of energy efficiency in train driving was also considered during the ECORailS European project [4], which had the objectives of improving energy efficiency and a further reduction of the environmental impact of rail in terms of energy consumption. The project was primarily addressed to the Public Authorities responsible for programming and financing regional railway services.*

*In particular, in [5] the authors stress the importance of having on-board energy consumption measurement systems in order to verify the effectiveness of the technologies and operational measures used to achieve the goal of a more efficient, from an energetic point of view, rail transport system; the economic drive is surely among these measures.*

*In [6], models for estimating potential energy savings are reported for a metropolitan system, which represents an effective tool to reduce energy consumption.*

*The use of a driving simulator to improve the performance of the train drivers in terms of energy consumption is faced in [7]: the simulator in question provides an accurate model of energy consumption, previously developed and tested through on-board measurements on different types of rail services. In addition, being developed into a spreadsheet and not being a real-time simulator, it allows: on one hand to be particularly easy and familiar to use for the drivers, on the other hand, to simulate long trips within minutes, comparing the results of different driving styles.*

*In [8], a comparison between an analytical calculation model and measurements is proposed to quantify the differences between the real case and an ideal speed profile, obtained by simulation, using the maximum traction characteristics of the vehicle. The second part also examines the incidence of the human factor in the calculation of energy consumption of a freight train. In the work, attention is also drawn to the role that some innovative technology solutions might have.*

*As it will be considered later on, the energy consumption of a train on a generic route is influenced by a number of factors: in [9], the authors concentrate on the speed allowed by the line, the frequency of stops and the travel time.*

denza del fattore umano nel calcolo dei consumi energetici di un treno merci. Nel lavoro è inoltre posta l'attenzione sul ruolo che potrebbero ricoprire alcune soluzioni tecnologiche innovative.

Come si vedrà in seguito, il consumo energetico di un treno su una generica tratta è influenzato da numerosi fattori: in [9] gli autori si concentrano sulla velocità ammessa dalla linea, la frequenza delle fermate ed il tempo di percorrenza.

Lo studio presentato in [10] è basato su di un algoritmo di ottimizzazione evolutiva che considera la lunghezza della tratta, i consumi energetici ed i ritardi come funzioni da minimizzare allo scopo di definire diversi profili di velocità potenziali che possano soddisfare differenti requisiti di orario. I risultati ottenuti si riferiscono a tre diversi casi, in ognuno dei quali viene introdotto un requisito da soddisfare, partendo dal minore tempo di percorrenza, aggiungendo nel secondo caso anche la minimizzazione dei consumi e nel terzo la minimizzazione dei ritardi.

Gli autori di [11] hanno proposto invece un modello basato sulla logica di controllo *fuzzy*. L'aleatorietà dei ritardi rispetto alla tabella di marcia è espressa attraverso valori numerici *fuzzy*, mentre l'ottimizzazione dell'orario è ottenuta tramite un modello di programmazione lineare *fuzzy*, nel quale la funzione obiettivo include sia i consumi degli scenari ipotizzati sia lo stile di condotta del macchinista.

In [12] gli autori presentano un modello matematico utile a programmare gli orari associati utilizzando un modello euristico in grado di ridurre i picchi di richiesta di energia dovuti alla trazione.

Lo studio riportato in [13] propone un metodo per definire le modalità di marcia energeticamente sostenibili per linee ad alta velocità implementato su di un simulatore, oltre ad un modello di ottimizzazione delle tabelle di marcia in cui il consumo energetico è minimizzato, pur non tenendo conto del vincolo di puntualità d'orario delle singole corse.

Il tema del consumo energetico si trova anche in [14] dove, in un primo momento vengono descritti ed applicati i principali metodi teorici per il calcolo della capacità di trasporto alla connessione Torino-Modane, lungo la linea Torino-Lione. L'operazione viene poi ripetuta, attraverso una ricostruzione affidabile della linea, tramite il software di simulazione Open Track, assumendo vari scenari di traffico. In un secondo momento, invece, l'attenzione si concentra sul confronto del consumo energetico tra due diverse linee, vale a dire quella storica e l'ipotetico nuovo tracciato.

Infine, in [15], viene riportata un'analisi comparativa tra i consumi energetici relativi al trasporto aereo e ferroviario. I consumi dei due modi vengono quantificati e comparati, allo scopo di determinare gli intervalli nei quali, in alcuni casi investendo, sarebbe più utile, da un punto di vista energetico, utilizzare un modo piuttosto

*The study presented in [10] is based on an evolutionary optimization algorithm that considers the length of the route, energy consumption, and delays as functions to minimize in order to define different potential velocity profiles that can meet different time requirements. The obtained results relate to three different cases introducing a requirement to be met, starting from the shortest travel time, adding progressively the minimization of consumption and delays.*

*The authors of [11], instead, proposed a model based on fuzzy control logic. The randomness of delays compared to the driving table is expressed through fuzzy numerical values, while the time optimization is obtained by means of a fuzzy linear programming model, in which the objective function includes both the consumption of the hypothesized scenarios and the driving style of drivers.*

*In [12], authors present a mathematical model for scheduling associated times using a heuristic approach that can reduce peak demand for energy due to traction.*

*The study in [13] suggests a method to define energy-efficient modes for high-speed lines implemented on a simulator, as well as a model for optimizing driving tables, where energy consumption is minimized while not taking account of the timing constraints of individual races.*

*The topic of energy consumption is also found in [14], where the main theoretical methods for calculating transport capacity are described and applied to Torino-Modane connection, along the Turin-Lyon line. The operation is then repeated through a reliable line reconstruction, using the Open Track simulation software, assuming various traffic scenarios. At a later time, however, attention is focused on the comparison of energy consumption between two different line profiles.*

*Finally, in [15], a comparative analysis of the energy consumption of air and rail transport is reported. The consumption of the two modes is quantified and compared to determine the intervals in which it would be more useful from an energetic point of view to use one mode or the other one. The focus is also on the identification of the field where the competition between these two modes of transport is more open.*

*In this context, the consolidated European trends are the liberalization and interoperability of the rail market. In such a liberalized market, there will still be the possibility, as already applied in some countries, to offer bonuses and discounts to the more virtuous operators. Adopting an energy-efficient operation can, thus, turn from good practice to real contractual requirement.*

*In addition, it is important to emphasize that efficient driving mainly means cost savings: not only lower traction energy costs, if this was paid on the basis of actual use, but also lower maintenance costs, for example lower wear of brakes and lower costs, in a free market, directly result in*



che l'altro. Inoltre viene posto l'accento anche sull'individuazione del campo dove può esserci ancora concorrenza tra questi due modi di trasporto.

In questo quadro, le tendenze europee consolidate sono la liberalizzazione e l'interoperabilità del mercato ferroviario. In tale mercato liberalizzato, ci sarà comunque la possibilità, come già oggi accade in alcuni Paesi, di prevedere bonus e sconti agli operatori energeticamente più virtuosi.

Adottare una condotta energeticamente efficiente può quindi trasformarsi da "buona pratica" a vero e proprio requisito o vincolo contrattuale.

Inoltre, si vuole sottolineare che una guida efficiente si traduce soprattutto in una riduzione dei costi: non solo minori spese legate all'energia di trazione, qualora questa fosse pagata in base all'effettivo utilizzo, ma anche una diminuzione delle spese di manutenzione, ad esempio per la minor usura dei freni, e minori costi, in un mercato libero, si traducono direttamente in vantaggi concorrenziali. La DB Cargo stima, ad esempio, in 300÷400 Euro il costo complessivo dell'arresto dalla piena velocità di un treno merci di media composizione.

L'attenzione crescente all'ambiente inoltre fa sì che oggi sia prassi diffusa quella di pubblicizzare le aziende sensibili a questo aspetto; per questo motivo, l'adozione di accorgimenti che vanno in tal senso può anche avere riflessi positivi sull'immagine dell'azienda.

## 2. Fattori che influenzano il consumo energetico

Il consumo energetico di un convoglio ferroviario dipende da numerosi fattori. Ad esempio, nel caso di un servizio regionale metropolitano, la maggior parte dell'energia sfruttata è necessaria al moto (circa il 95%), mentre la restante è utilizzata da apparecchiature ausiliarie e da altri dispositivi legati ai sistemi di bordo per l'esercizio e il comfort di marcia.

L'entità di tali consumi è variabile e dipende dalle modalità di utilizzo e dal grado di usura delle componenti, che si lega strettamente alle modalità di manutenzione di quest'ultime.

La morfologia del territorio sul quale si sviluppa la linea è un aspetto sicuramente non secondario, così come incidono in una certa misura la tipologia del servizio che si intende esercire e la gestione della rete, intesa come pianificazione degli orari di servizio e dell'impiego del materiale rotabile.

Su tali basi, i principali fattori che concorrono in modo diretto a definire il consumo energetico possono essere classificati in tipologie, fra le quali, i parametri più importanti che riguardano il treno sono:

- lunghezza e peso;
- velocità massima;
- valori massimi di accelerazione e decelerazione;

*competitive advantages. DB Cargo estimates, for example, in 300÷400 Euro the total cost of a stop from the full speed of a medium freight train.*

*Increasing attention to the environment also makes widespread practice to advertise companies that are sensitive to this aspect; for this reason, the adoption of such arrangements may also have positive effects on the company's public image.*

## 2. Factors affecting energy consumption

*The energy consumption of a train depends on many factors. For example, in the case of a metropolitan regional service, most of the energy used is required by motion (about 95%), while the remaining 5% used by auxiliary equipment and other onboard devices for operation and ride comfort.*

*The magnitude of these consumptions is variable and depends on how the components are used and the degree of wear, which is strictly related to the maintenance of the components themselves.*

*The morphology of the territory is certainly not a secondary aspect, as well as to some extent the type of service that is going to be run and the management of the network, as the schedule of services and the use of the rolling stock.*

*On this basis, the main factors contributing directly to the definition of energy consumption can be categorized into typologies, among which the most important parameters relating to the train are:*

- *length and weight;*
- *full speed;*
- *full acceleration and deceleration;*
- *traction effort and electric braking effort as a function of speed;*
- *motion resistances according to speed;*
- *additional resistances (e.g. for slopes and curves);*
- *ability to recover braking energy and its actual use for trains simultaneously accelerating or accumulation;*
- *total traction and braking efficiency.*

*On the other hand, the most relevant parameters depending on the line morphology, which influence energy consumption, are:*

- *longitudinal profile (total length, stations altitude, specifically start and end points);*
- *speed profile (permanent speed limits and temporary speed limitations);*
- *position, section and length of tunnels;*
- *curve radius;*
- *number of stops;*



- sforzo di trazione e sforzo di frenatura elettrica in funzione della velocità;
- resistenze al moto in funzione della velocità;
- resistenze aggiuntive (ad esempio per pendenze e curve);
- capacità di recupero dell'energia di frenata e suo possibile impiego effettivo per treni contestualmente in accelerazione o per l'accumulo;
- rendimento complessivo in trazione e frenatura.

D'altro canto, i parametri più rilevanti dipendenti dal tracciato, che influenzano il consumo di energia sono:

- profilo longitudinale (lunghezza totale, altitudine delle stazioni, punti di inizio e fine sezione aventi caratteristiche diverse);
- profilo di velocità (limiti di velocità permanenti e restrizioni temporanee);
- posizione, sezione e lunghezza delle gallerie;
- raggi di curva;
- numero di fermate;
- caratteristiche nominali dei sistemi di elettrificazione (corrente, tensione, frequenza);
- tensione media al pantografo.

Sono inoltre rilevanti le caratteristiche dei servizi (urbano, regionale, intercity), in particolare per la velocità d'impostazione e la frequenza delle fermate.

A tutto ciò si aggiunge il fattore umano, rappresentato dal personale di condotta. I macchinisti, infatti, controllano in modo diretto i principali parametri che possono determinare il consumo finale e consentire strategie di guida mirate al risparmio energetico (*Eco-driving*), fra le quali:

- riduzione della velocità massima;
- ottimizzazione dello sforzo di trazione, per raggiungere la velocità di regime con un'accelerazione minore;
- percorrenza in *coasting*, per limitare il numero e l'entità delle frenature sfruttando la marcia per inerzia del convoglio;
- sfruttamento delle caratteristiche infrastrutturali della linea, utilizzando i tratti in discesa per le accelerazioni e quelli in salita per le decelerazioni.

Anche la pianificazione degli orari e l'assegnazione delle tracce può influire notevolmente sulla possibilità di perseguire l'*Eco-driving*. Evidentemente, maggiore è il tempo a disposizione per la percorrenza, minori possono essere le accelerazioni e le velocità di punta da raggiungere e, in questo modo, il consumo risulta nel complesso più basso.

## 3. Obiettivi dello studio

Sulla base del quadro fattuale finora descritto, lo studio descritto in questo articolo si pone come obiettivi principali:

- *nominal characteristics of the electrification systems (current, voltage, frequency);*
- *average voltage to the pantograph.*

*The characteristics of the services (urban, regional and intercity) are also significant, in particular for setting speed and frequency of stops.*

*In addition to this, the human factor, represented by the driving staff, plays a relevant role. Drivers, in fact, directly control the main parameters that can determine the final consumption and allow for driving strategies for energy saving (Eco-driving), including:*

- *reduction of maximum speed;*
- *traction effort optimization, to achieve regime speed with less acceleration;*
- *coasting, to limit number and magnitude of the braking by utilizing the inertia of the train;*
- *exploiting the infrastructure features of the line, using downhill sections for accelerations and upward slopes for decelerations.*

*Scheduling and track assignment can also greatly influence the ability to pursue eco-driving. Obviously, the longer the travel time is, the lower the accelerations to reach peak speeds, therefore, the consumption is generally lower.*

## 3. Aims of the study

*Basing on the factual framework described above, the study this article has as main objectives:*

- 1) *analysis and assessment of the present driving profiles based on the comparison between real and simulated driving cycles from an energetic point of view;*
- 2) *analysis of driving profiles adopted in response to a generic instruction to adopt an "energy-efficient" drive, entrusting into sensibility and ability of drivers to put this instruction into practice.*

## 4. Methodological approach

*For this study, we chose to use the Dynamic Training Simulator (SIDAC) by Trenitalia [16], located in the locomotives' ex-depot Firenze Romito, able to reproduce the physical and sensory experience of the drivers while driving a Trenitalia regional transport E464 locomotive.*

*Initially a database was created for a sample of rail sections, with simulation reports of various train drivers on these sections. This provides a statistically valid value of the net energy consumption ( $E_n$ ) [kWh] indicator, which represents the performance of the average train driver in operation.*

*The goal was to reach a level of confidence of 95%. The allowed error ( $r$ ) on the net energy value was set to 5% of the estimated net energy ( $r \leq 0.05 E_n$ ). The number of simulations required ( $n$ ) to reach this threshold is basing on the*

- 1) l'analisi e la valutazione dal punto di vista energetico dei profili di guida autonomamente adottati del personale di condotta, sulla base del confronto fra cicli di guida reali e simulati;
- 2) la medesima analisi riferita a profili di guida adottati in risposta ad una generica istruzione di adottare una guida "energeticamente efficiente", rimettendosi alla sensibilità ed alla abilità dei macchinisti per la messa in pratica di detta istruzione.

#### 4. Approccio metodologico

Per il presente studio si è scelto di utilizzare il Simulatore Dinamico di Addestramento alla Condotta (SIDAC) [16] presente nell'ex deposito locomotive di Firenze Romito. Tale simulatore è in grado di riproporre l'esperienza fisica e sensoriale dei macchinisti durante la guida di una locomotiva E464 del trasporto regionale di Trenitalia.

Inizialmente è stata creata una banca dati, relativa ad un campione di tratte, con i report delle simulazioni di vari macchinisti su dette tratte. Ciò consente di stabilire un valore statisticamente valido dell'indicatore consumo di energia netta ( $E_n$ ) [kWh], che rappresenti le prestazioni del macchinista medio in esercizio.

L'obiettivo è stato quello di raggiungere un livello di fiducia pari al 95%. L'errore ammesso ( $r$ ) sul valore di energia netta è stato fissato al 5% dell'energia netta stimata ( $r \leq 0,05 E_n$ ). Il numero di simulazioni necessarie ( $n$ ) a raggiungere tale soglia, è stato calcolato in base al valore limite assunto dalla Gaussiana nel percentile 95%, con condizione di arresto<sup>(1)</sup>:

$$\frac{\sigma_n Z_{95\%}}{\sqrt{n}} \leq r^{(2)}$$

In pratica per  $n$  simulazioni si ottengono  $n$  valori di energia netta  $E_{n1}, E_{n2}, \dots, E_{nm}$ . Detta  $E_n$  la media dei valori  $E_{n1}, E_{n2}, \dots, E_{nm}$  e  $\sigma_n$  la deviazione standard sulle  $n$  simulazioni, queste possono arrestarsi se:

$$(E_n \pm r) \geq (E_n \pm \frac{\sigma_n Z_{95\%}}{\sqrt{n}})$$

allora  $E_n$  è il valore di energia netta stimato ed il suo valore ha un intervallo di confidenza  $E_n \pm r$  con una fiducia del 95%.

Questa prima fase del lavoro è stata replicata, oltre che al simulatore, utilizzando i dati rilevati dalla diagno-

limit value assumed by Gaussian in the 95% percentile, with stop condition<sup>(1)</sup>:

$$\frac{\sigma_n Z_{95\%}}{\sqrt{n}} \leq r^{(2)}$$

For  $n$  simulations,  $n$  net energy values are obtained  $E_{n1}, E_{n2}, \dots, E_{nm}$ . Defined the  $E_n$  mean of values  $E_{n1}, E_{n2}, \dots, E_{nm}$  and  $\sigma_n$  the standard deviation on  $n$  simulations, these may stop as soon as:

$$(E_n \pm r) \geq (E_n \pm \frac{\sigma_n Z_{95\%}}{\sqrt{n}})$$

then  $E_n$  is the estimated net energy value and its value has an  $E_n \pm r$  confidence interval of 95%.

This first phase of the work has been replicated, in addition to the simulator, using the data from the remote diagnostics of locomotives (RegEnergy file) manufactured by Bombardier, frequently operated on the sections under consideration, using the information systems of Trenitalia; these provide, among the many data, with information about the locomotive and the composition of the train.

The purpose of this activity was to compare the data from the simulator with those of the real operation in order to verify the reliability of the data from the simulator, validate its operation and check any discrepancy in the behavior of the drivers in the two cases.

The second phase of work was evaluating the performance of driving staff because of a more energy-efficient driving request, always with the respect of the service timetable. This is to identify the most naturally behaviors applied by the drivers without the help of any instrument or particular indication to contain energy consumption. Behavior and performance of the staff in the two early stages of work were then compared to highlight the differences.

Among the possible future developments of this research, it is the possibility of using the database created during the first two macro-activities to identify the performance of the most virtuous drivers from the point of view of energy consumption and respect for time. With these, it is possible to highlight the "Train Speed" column of the Train Card, a tool currently digitized and made available to the driving staff by means of a personal tablet, drawing a chart showing the driving speed of the most virtuous driver at each physical point of the line identified on the Train Card.

<sup>(1)</sup> Test atto a determinare la bontà di un risultato statistico ottenuto, utilizzato nel presente studio allo scopo di determinare il valore medio e l'intervallo di confidenza entro cui si suppone possa variare il valore di un indicatore caratteristico con un errore massimo ammesso pari al 5%.

<sup>(2)</sup>  $Z_{95\%}$  è il valore empirico attribuito alla statistica test, in questo caso con errore massimo ammesso pari al 5%.

<sup>(1)</sup> A test to determine the goodness of a statistical result obtained in the present study in order to determine the mean value and confidence interval within which it is assumed to vary the value of a characteristic indicator with a maximum permissible error of 5%.

<sup>(2)</sup>  $Z_{95\%}$  is the empirical value attributed to the test statistic, in this case with a maximum permissible error of 5%.

stica remota di Bombardier (file "RegEnergy") relativi alle locomotive in esercizio nei vari giorni sulle tratte in esame, note mediante l'utilizzo dei sistemi informativi di Trenitalia; questi forniscono, tra i numerosi dati, informazioni circa la locomotiva e la composizione del convoglio.

Lo scopo di questa attività è stato quello di confrontare i dati provenienti dal simulatore con quelli dell'esercizio, al fine di verificare l'attendibilità dei dati provenienti dal simulatore, validarne il funzionamento e verificare eventuali discrepanze nel comportamento dei macchinisti nei due casi.

La seconda fase di lavoro è servita per valutare le prestazioni del personale di condotta a seguito di una richiesta di guida più efficiente dal punto di vista energetico, sempre con il vincolo del rispetto dell'orario di servizio. Ciò al fine di individuare i comportamenti più naturalmente applicati dai macchinisti senza l'ausilio di alcuno strumento o indicazione particolare per il contenimento del consumo energetico. Il comportamento e le prestazioni del personale di condotta nelle due fasi di lavoro sono state poi confrontate per evidenziarne le difformità.

Tra i possibili sviluppi futuri di questa ricerca c'è l'eventualità di utilizzare la banca dati creata durante lo svolgimento delle prime due macro-attività per individuare, per ciascuna delle tratte in esame, le prestazioni dei macchinisti più virtuosi dal punto di vista del consumo energetico e del rispetto dell'orario. Con queste è possibile valorizzare la colonna "Velocità di Marcia" della Scheda Treno, strumento attualmente digitalizzato e reso fruibile al personale di condotta tramite un *tablet* personale, tracciando un grafico riportante in ordinata la velocità di marcia tenuta dal (o dai) macchinista più virtuoso in corrispondenza di ciascun punto fisico della linea individuata sulla Scheda Treno.

Al fine di raggiungere un maggior livello di dettaglio nell'analisi dei dati, le tratte in esame potrebbero essere a loro volta suddivise in sotto-tratte, corrispondenti ciascuna all'intervallo spaziale tra due successive stazioni/fermate.

## 5. Dati disponibili

Il SIDAC è in grado di fornire, al termine di ogni sessione di guida, un report contenente i valori istantanei e finali di alcune delle principali grandezze in gioco (fig. 1).

L'intervallo di campionamento è di circa 1 secondo, ma viene valorizzata progressivamente una riga ogni volta che una delle grandezze cambia valore.

Le grandezze utilizzate in questo studio per valutare lo stile di guida del macchinista sono state:

- **timbro tempo** [hh:mm:ss]: tempo trascorso dall'avvio della simulazione. Non necessariamente coincide con il tempo di guida. Ai fini della valutazione della prestazione del macchinista è stato individuato l'istante  $t_0 = 0$  corrispondente all'avviamento del treno ( $v > 0$ );

*In order to achieve a greater level of detail in data analysis, the sections under consideration could be subdivided into sub-sections, each corresponding to the spatial section between two successive stations/stops.*

## 5. Available data

*SIDAC is able to provide, after each driving session, a report containing the instantaneous and final values of some of the major parameters involved (fig. 1).*

*The sampling interval is about 1 second: the system produces a new control row as soon as the value of one of the concerned parameters is changing.*

*The dimensions used in this study to evaluate the driver's driving style were:*

- **time stamp** (timbro tempo) [hh:mm:ss]: time elapsed since the start of the simulation. It does not necessarily coincide with driving time. For the evaluation of the performance of the driver, the instant  $t_0 = 0$  corresponds to the train start ( $v > 0$ );
- **space travelled** (km) [km];
- **instantaneous speed** (velocità attuale) [km/h];
- **voltage** (tensione) [V]: instantaneous value of the line voltage;
- **current** (corrente) [A]: instantaneous value of the current absorbed by the train for its operation;
- **traction efforts** (trazione) [kN]: instantaneous traction ( $> 0$ ) and braking ( $< 0$ ) effort;
- **pressure in the brake cylinders** (pressione CF1, pressione CF2) [bar]: instantaneous pressure value in the brake cylinders. Values other than 0 indicate that the train is performing pneumatic service braking;
- **energy** (energia) [kWh]: cumulative net instantaneous energy value used during service. It is the result of the difference between the energy absorbed and the energy rendered during braking. For the purposes of evaluating the performance of the driver, it was set  $E_0 = 0$  at the start of the train.

*Bombardier's remote diagnostics produces the RegEnergy files and, among others, the dynamic trend of the major concerned parameters. For the purpose of this study, the data examined were:*

- **sample time** [dd/mm/yyyy hh:mm:ss:nnn]: date and time of the service being examined at roughly one thousandth of a second;
- **speedAct-loco** [km/h]: instantaneous train speed;
- **ZB-XFTB-MGr1** [kN]: instantaneous traction ( $> 0$ ) and braking ( $< 0$ ) effort;
- **MN-XI-Ln** [A]: instantaneous value of the current absorbed by the train for its operation;



1	Tempo	Timbro tempo	Km	Velocità attuale	Velocità impostata	Tensione	Corrente	Trazione	Antislittante	Tensione batteria	Pressione CG	Pressione CP	Pressione CF1	Pressione CF2	Energia
2027	10.05.2016 14:25:38	00:15:38	0.14	25.00	0.00	3581.00	203.00	54.00	0.00	32.00	5.00	9.55	0.00	0.00	100.53
2028	10.05.2016 14:25:39	00:15:39	0.14	26.00	0.00	3591.00	171.00	48.00	0.00	32.00	5.00	9.56	0.00	0.00	100.63
2029	10.05.2016 14:25:40	00:15:39	0.14	26.00	0.00	3593.00	173.00	44.00	0.00	32.00	5.00	9.57	0.00	0.00	100.72
2030	10.05.2016 14:25:40	00:15:40	0.15	26.00	0.00	3612.00	185.00	42.00	0.00	32.00	5.00	9.58	0.00	0.00	100.81
2031	10.05.2016 14:25:41	00:15:40	0.15	26.00	0.00	3601.00	186.00	41.00	0.00	32.00	5.00	9.59	0.00	0.00	100.92
2032	10.05.2016 14:25:41	00:15:41	0.16	26.00	0.00	3604.00	185.00	40.00	0.00	32.00	5.00	9.60	0.00	0.00	101.03
2033	10.05.2016 14:25:42	00:15:42	0.16	26.00	0.00	3597.00	186.00	40.00	0.00	32.00	5.00	9.61	0.00	0.00	101.14
2034	10.05.2016 14:25:42	00:15:42	0.17	26.00	0.00	3604.00	185.00	40.00	0.00	32.00	5.00	9.62	0.00	0.00	101.26
2035	10.05.2016 14:25:43	00:15:43	0.17	26.00	0.00	3607.00	185.00	40.00	0.00	32.00	5.00	9.63	0.00	0.00	101.37
2036	10.05.2016 14:25:44	00:15:43	0.17	26.00	0.00	3603.00	185.00	40.00	0.00	32.00	5.00	9.64	0.00	0.00	101.48
2037	10.05.2016 14:25:44	00:15:44	0.18	27.00	0.00	3587.00	142.00	36.00	0.00	32.00	5.00	9.65	0.00	0.00	101.55
2038	10.05.2016 14:25:45	00:15:44	0.18	27.00	0.00	3593.00	141.00	29.00	0.00	32.00	5.00	9.66	0.00	0.00	101.63
2039	10.05.2016 14:25:45	00:15:45	0.19	27.00	0.00	3602.00	141.00	25.00	0.00	32.00	5.00	9.67	0.00	0.00	101.72
2040	10.05.2016 14:25:46	00:15:46	0.19	27.00	0.00	3592.00	141.00	22.00	0.00	32.00	5.00	9.68	0.00	0.00	101.80
2041	10.05.2016 14:25:47	00:15:46	0.19	27.00	0.00	3585.00	144.00	21.00	0.00	32.00	5.00	9.69	0.00	0.00	101.89
2042	10.05.2016 14:25:47	00:15:47	0.20	27.00	0.00	3601.00	143.00	21.00	0.00	32.00	5.00	9.70	0.00	0.00	101.96
2043	10.05.2016 14:25:48	00:15:47	0.20	27.00	0.00	3611.00	145.00	21.00	0.00	32.00	5.00	9.71	0.00	0.00	102.05
2044	10.05.2016 14:25:48	00:15:48	0.21	27.00	0.00	3611.00	145.00	21.00	0.00	32.00	5.00	9.72	0.00	0.00	102.12
2045	10.05.2016 14:25:49	00:15:48	0.21	27.00	0.00	3612.00	145.00	21.00	0.00	32.00	5.00	9.73	0.00	0.00	102.21
2046	10.05.2016 14:25:49	00:15:49	0.21	27.00	0.00	3598.00	146.00	21.00	0.00	32.00	5.00	9.74	0.00	0.00	102.28
2047	10.05.2016 14:25:50	00:15:50	0.22	27.00	0.00	3597.00	146.00	21.00	0.00	32.00	5.00	9.75	0.00	0.00	102.37
2048	10.05.2016 14:25:50	00:15:50	0.22	27.00	0.00	3593.00	146.00	22.00	0.00	32.00	5.00	9.76	0.00	0.00	102.46

Fig. 1 - Esempio di report fornito dal SIDAC.

Fig. 1 - Example of report provided by SIDAC.

- km [km]: spazio percorso;
- velocità attuale [km/h]: velocità istantanea del treno;
- tensione [V]: valore istantaneo della tensione di linea;
- corrente [A]: valore istantaneo della corrente assorbita dal treno per il suo funzionamento;
- trazione [kN]: valore istantaneo dello sforzo di trazione ( $> 0$ ) e di frenatura ( $< 0$ );
- pressione nei cilindri freno 1 e 2 [bar]: valore istantaneo della pressione esercitata dai cilindri freno. Valori diversi da 0 di questi campi indicano che il treno sta effettuando una frenatura di servizio pneumatica;
- energia [kWh]: valore cumulato di energia netta istantanea utilizzata durante il servizio. Essa è il risultato della differenza tra l'energia assorbita e l'energia resa durante la frenatura. Ai fini nella valutazione della prestazione del macchinista è stata posta  $E_0 = 0$  in corrispondenza all'avviamento del treno.

La diagnostica remota di Bombardier, attraverso i file "RegEnergy", fornisce, a sua volta e tra le altre, l'andamento dinamico delle principali grandezze in esame. Ai fini del presente studio, i dati presi in esame sono stati:

- sample time [gg/mm/aaaa hh:mm:ss:nnn]: data e orario del servizio preso in esame con approssimazione al millesimo di secondo;
- speedact-loco [km/h]: velocità istantanea del treno;
- ZB-XFTB-MGr1 [kN]: valore

- MN-XU-Ln [V]: instantaneous value of the line voltage.

Fig. 2 shows an example of the Bombardier tele-diagnostic driving cycle report.

In this case, unlike the SIDAC report, determined by the change in value of at least one of the measured parameters, the sampling interval is constant and equal to 1 second. As it will be clearer below, the non-total correspondence between the real and simulated driving cycle's data did not allow the calculation of some indicators to assess the staff's behavioral driving style referring to the repartition of the various driving phases of the train.

1	Sample Time	SpeedAct-Loco	ZB-XFTB-MGr1	MN-XI-Ln	MN-XU-Ln
474	18/07/2016 08:24:01.164	32.250977	186.767578	654.54102	3268.06641
475	18/07/2016 08:24:02.177	33.862305	186.669922	680.17578	3265.86914
476	18/07/2016 08:24:03.185	35.913086	186.108398	717.77344	3262.69531
477	18/07/2016 08:24:04.195	37.402344	184.448242	738.28125	3259.52148
478	18/07/2016 08:24:05.206	39.477539	184.936523	765.625	3257.32422
479	18/07/2016 08:24:06.216	41.040039	184.179688	798.0957	3253.17383
480	18/07/2016 08:24:07.227	42.724609	182.739258	820.3125	3246.82617
481	18/07/2016 08:24:08.237	44.53125	183.203125	845.94727	3237.30469
482	18/07/2016 08:24:09.247	46.240234	182.299805	866.45508	3230.95703
483	18/07/2016 08:24:10.257	47.998047	181.958008	900.63477	3218.99414
484	18/07/2016 08:24:11.268	49.780273	181.90918	934.81445	3214.11133
485	18/07/2016 08:24:12.278	51.245117	179.077148	957.03125	3197.75391
486	18/07/2016 08:24:13.288	52.929688	180.737305	984.375	3190.18555
487	18/07/2016 08:24:14.301	54.614258	178.515625	998.04688	3194.58008
488	18/07/2016 08:24:15.309	56.347656	180.053711	1035.64453	3197.50977
489	18/07/2016 08:24:16.319	58.007813	179.711914	1051.02539	3201.66016
490	18/07/2016 08:24:17.319	59.619141	178.271484	1064.69727	3205.07813
491	18/07/2016 08:24:18.320	61.230469	178.662109	1083.49609	3213.62305
492	18/07/2016 08:24:19.320	62.62207	178.149414	1088.62305	3209.47266
493	18/07/2016 08:24:20.321	64.428711	177.099609	1151.85547	3196.5332
494	18/07/2016 08:24:21.321	65.917969	176.904297	1158.69141	3187.01172

Fig. 2 - Esempio di report fornito dalla tele-diagnostica.

Fig. 2 - Example of report provided by the tele-diagnostic.

istantaneo dello sforzo di trazione ( $> 0$ ) e di frenatura ( $< 0$ );

- MN-XI-Ln [A]: valore istantaneo della corrente assorbita dal treno per il suo funzionamento;
- MN-XU-Ln [V]: valore istantaneo della tensione di linea.

Nella fig. 2 viene riportato un esempio di report del ciclo di guida fornito dalla tele-diagnostica di Bombardier.

In questo caso, a differenza del report fornito dal SIDAC, dove era determinato dalla variazione di valore di almeno una delle grandezze misurate, l'intervallo di campionamento è costante e pari ad 1 secondo. Come sarà meglio spiegato nel seguito, la non totale corrispondenza fra i dati relativi ai cicli di guida reali e simulati non ha permesso di calcolare alcuni degli indicatori ipotizzati per valutare lo stile di guida del personale di condotta riferiti alla suddivisione percentuale delle varie fasi di marcia del convoglio.

## 6. Indicatori di prestazione

Per valutare la prestazione energetica su una tratta, è necessario individuare gli indicatori di prestazione che la caratterizzano. Gli indicatori più idonei a questo scopo identificati vengono schematicamente riassunti in tabella 1.

L'indicatore energia netta è il risultato della differenza tra l'energia assorbita e l'energia resa. Essa viene fornita automaticamente, per ogni riga, nel report del SIDAC.

Per il calcolo dell'energia assorbita e dell'energia resa, in ogni riga riportante i valori delle grandezze in esame in un determinato istante di tempo, è stato calcolato un  $\Delta e$  rappresentativo del consumo energetico dell'intervallo  $t_i - t_{i-1}$  mediante la seguente formula:

$$\Delta e_i = En_i - En_{i-1}, \forall i = 1, 2, \dots, n$$

La sommatoria dei  $\Delta e$  positivi fornisce il valore finale di energia assorbita, mentre quella dei  $\Delta e$  negativi il valore dell'energia resa.

$$Ea = \sum_{i=1}^n \Delta e_i, \forall i: \Delta e_i \geq 0 \quad Er = \sum_{i=1}^n \Delta e_i, \forall i: \Delta e_i < 0$$

Conoscendo il valore di energia netta  $En$  ed il valore di energia assorbita  $Ea$  è possibile quantificare la percentuale di energia resa.

$$Er \% = \frac{(Ea - En)}{En} \times 100$$

Gli indicatori energia di trazione ed energia di sosta vengono calcolati come segue:

$$Et = \sum_{i=1}^n \Delta e_i, \forall i: V_i \neq 0 \quad Es = \sum_{i=1}^n \Delta e_i, \forall i: V_i = 0$$

## 6. Performance indicators

To evaluate energy performance on a rail section, it is necessary to identify the performance indicators that characterize it. The most suitable indicators for this purpose are summarized in table 1.

The net energy indicator is the result of the difference between absorbed and rendered energy, which is provided for each control line in the SIDAC report.

For the calculation of these energy values, in each line  $e$  representing the energy consumption of the  $t_i - t_{i-1}$  interval was calculated as:

$$\Delta e_i = En_i - En_{i-1}, \forall i = 1, 2, \dots, n$$

The sum of the positive  $\Delta e$  gives the final value of the absorbed energy, while the negative  $\Delta e$  negative the value of the rendered energy.

$$Ea = \sum_{i=1}^n \Delta e_i, \forall i: \Delta e_i \geq 0 \quad Er = \sum_{i=1}^n \Delta e_i, \forall i: \Delta e_i < 0$$

Basing on the values of energies (net  $En$  and absorbed  $Ea$ ), it is possible to quantify the percentage of rendered energy.

$$Er \% = \frac{(Ea - En)}{En} \times 100$$

Traction energy and stop energy indicators are calculated as follows:

$$Et = \sum_{i=1}^n \Delta e_i, \forall i: V_i \neq 0 \quad Es = \sum_{i=1}^n \Delta e_i, \forall i: V_i = 0$$

The specific consumption indicator represents the ratio between net energy and length of the section.

$$Cs = \frac{En}{S}$$

The travel time spent on each route is the difference between two successive times when the speed is zero. Defined  $t_1$  the instant in which the train is started and  $t_n$  the instant whose speed returns to 0, the travel time is:

$$T = t_n - t_0$$

Where  $t_0$  is the time immediately preceding  $t_1$  where  $V_0 = 0$ .

Calculation of advance/delay to cover the route is the result of the difference between the actual and the expected travel time.

$$A(R) = T - Tp$$

In the same way as for the  $\Delta e$ , the calculation of the covered space  $\Delta s$ , in a given time interval, is calculated by:

TABELLA 1 – TABLE 1

Indicatori di prestazione energetica  
Energy performance indicators

Indicatore di Prestazione Performance Indicator	Simbolo Symbol	Definizione Definition
Energia netta [kWh] Net energy [kWh]	En	Energia necessaria per coprire una specifica tratta, al netto di quella resa Energy needed to cover a specific section, net of the rendered quantity
Energia assorbita [kWh] Absorbed energy [kWh]	Ea	Energia lorda necessaria per coprire una specifica tratta Gross energy needed to cover a specific section
Energia resa [kWh] Rendered energy [kWh]	Er	Energia recuperata mediante l'utilizzo del freno elettrico Energy recovered by using the electric brake during driving
Energia resa [%] Rendered energy [%]	Er%	Rapporto % tra energia resa ed energia netta Ratio % between energy rendered and net energy
Energia di trazione [kWh] Traction energy [kWh]	Et	Energia necessaria per il movimento del treno Energy needed for train movement
Energia di sosta [kWh] Stop energy [kWh]	Es	Energia assorbita durante le fasi di sosta del treno Energy absorbed during the train stop phases
Consumo specifico [kWh/km] Specific consumption [kWh/km]	Cs	Rapporto tra energia netta e lunghezza della tratta Relationship between net energy and length of the section
Tempo di percorrenza [min] Travel time [min]	T	Tempo impiegato per percorrere una tratta Travel time to cover a section
Anticipo / Ritardo [min] Advance / Delay [min]	A (R)	Differenza tra tempo di percorrenza effettivo e previsto Difference between actual and planned travel time
Spazio in accelerazione [%] Space travelled accelerating [%]	Sa%	Rapporto % tra spazio percorso in fase di accelerazione e spazio totale Ratio % between acceleration space and total space
Spazio a velocità costante [%] Space travelled cruising [%]	Svc%	Rapporto % tra spazio percorso a velocità costante e spazio totale Ratio % between acceleration space and total space
Spazio in coasting [%] Space travelled coasting [%]	Sd%	Rapporto % tra spazio percorso in fase costante e spazio totale Ratio % between coasting space and total space
Spazio in frenatura [%] Space travelled breaking [%]	Sf%	Rapporto % tra spazio percorso in fase di frenatura e spazio totale Ratio % between braking space and total space

L'indicatore consumo specifico rappresenta il rapporto tra l'energia netta e lo spazio percorso.

$$Cs = \frac{En}{S}$$

Il tempo di percorrenza impiegato su ciascuna tratta è dato dalla differenza tra due istanti successivi in cui la velocità è pari a zero. Detto  $t_1$  l'istante in cui il treno viene avviato e  $t_n$  l'istante in cui la velocità torna ad essere 0, il tempo di percorrenza risulta:

$$T = t_n - t_0$$

essendo  $t_0$  l'istante immediatamente antecedente  $t_1$  in cui  $V_0 = 0$ .

Il calcolo dell'anticipo/ritardo per coprire la tratta è il risultato della differenza tra il tempo di effettiva percorrenza ed il tempo previsto.

$$A(R) = T - Tp$$

Allo stesso modo di quanto fatto per il calcolo di  $\Delta e$ , il calcolo dello spazio percorso  $\Delta s$  in un determinato intervallo di tempo viene calcolato con:

$$\Delta s_i = S_i - S_{i-1}, \forall i = 1, 2, \dots, n$$

Since the distances traveled up to  $t_i$  and  $t_{i-1}$  are respectively  $S_i$  and  $S_{i-1}$ .

To locate the current phase during the  $i$ -th interval, the current speed, traction and brake cylinder pressure columns are used: by combining the values of the  $i$ -th line, it is possible to trace the phase of the motion in action and then to assign the distance travelled in the time interval to one of the phases.

Table 2 shows the criteria for identifying the different phases, in addition to the formula used to calculate the distance travelled during them.

At this point, by dividing them by the total distance, it is possible to know the percentage distribution of the driving phases:

$$Sa \% = \frac{Sa}{S} \times 100 \quad Svc \% = \frac{Svc}{S} \times 100$$

$$Sd \% = \frac{Sd}{S} \times 100 \quad Sf \% = \frac{Sf}{S} \times 100$$

Finally, a statistical analysis was required for all of the



$$\Delta S_i = S_i - S_{i-1}, \forall i = 1, 2, \dots, n$$

essendo  $S_i$  e  $S_{i-1}$  lo spazio percorso rispettivamente fino all'istante  $t_i$  e  $t_{i-1}$ .

Per individuare la fase in corso durante l'i-esimo intervallo, vengono utilizzate le colonne velocità attuale, trazione e pressione cilindro freno 1 e 2: combinando i valori della i-esima riga è così possibile risalire alla fase del moto in atto ed a quel punto assegnare lo spazio percorso nell'intervallo di tempo ad una delle fasi.

In tabella 2 vengono riportati i criteri di individuazione delle diverse fasi, oltre alla formula utilizzata per il calcolo dello spazio percorso durante le stesse.

A questo punto, conoscendo la suddivisione in fasi di marcia della tratta e dividendo per lo spazio totale percorso, è possibile conoscere la distribuzione percentuale delle fasi di marcia stesse:

$$Sa \% = \frac{Sa}{S} \times 100 \quad Svc \% = \frac{Svc}{S} \times 100$$

$$Sd \% = \frac{Sd}{S} \times 100 \quad Sf \% = \frac{Sf}{S} \times 100$$

Per tutti gli indicatori menzionati in precedenza si è resa necessaria infine un'analisi statistica, capace di evidenziare l'affidabilità dei risultati raggiunti. Sono stati a tal fine calcolati:

indicators mentioned above, able to highlight the reliability of the achieved results. It has been calculated for this purpose:

- mean value of the indicator:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

- standard deviation of the indicator:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

- 95% confidence: lower and higher distance from the mean value identifying a variability range for the mean value of the indicator:

$$Conf = \frac{\sigma_x \times 1.96}{\sqrt{n}}$$

where 1.96 is the critical value for the test<sup>(3)</sup>.

<sup>(3)</sup> Critical test value in case of 95% confidence level. To hold 95% of the total area, consider the range between the mean and 1.96 type scraps from the mean value in both directions.

TABELLA 2 – TABLE 2

Criteri di individuazione delle fasi  
Phases detection criteria

Fase Phase	Condizione/i Condition/s	Sommatoria Sum
Accelerazione Acceleration	$V_i, V_{i+1}, \dots, V_{i+n} > V_{i-1} \text{ e } T_{i-1} > 0, \forall i = 1, 2, \dots, n$	$Sa = \sum_{i=1}^n \Delta S_i, \forall i : \Delta S_i \in Sa$
	$V_i = V_{i-1} \text{ e } T_i \geq T_{i-1} + 1 \text{ e } T_i > 0, \forall i = 1, 2, \dots, n$	
Velocità costante Cruising	$V_i = V_{i-1} \text{ e } T_i > 0, \forall i = 1, 2, \dots, n$	$Svc = \sum_{i=1}^n \Delta S_i, \forall i : \Delta S_i \in Svc$
	$V_i = V_{i-1} - 1 \text{ e } T_i > 0, \forall i = 1, 2, \dots, n$	
	$V_i = V_{i-1} + 1 \text{ e } T_i > 0, \forall i = 1, 2, \dots, n$	
Coasting Coasting	$V_i \neq 0 \text{ e } T_i = 0, \text{ e } Pcf_i = 0, \forall i = 1, 2, \dots, n$	$Sd = \sum_{i=1}^n \Delta S_i, \forall i : \Delta S_i \in Sd$
Frenatura Breaking	$V_i < V_{i-1} \text{ e } V_i, Pcf_1 \neq 0, \forall i = 1, 2, \dots, n$	$Sf = \sum_{i=1}^n \Delta S_i, \forall i : \Delta S_i \in Sf$
	$V_i < V_{i-1} \text{ e } V_i, Pcf_2 \neq 0, \forall i = 1, 2, \dots, n$	
	$V_i < V_{i-1} \text{ e } V_i \neq 0 \text{ e } T_i < 0, \forall i = 1, 2, \dots, n$	
	$V_i = V_{i-1} \text{ e } V_i, Pcf_1 \neq 0, \forall i = 1, 2, \dots, n$	
	$V_i = V_{i-1} \text{ e } V_i, Pcf_2 \neq 0, \forall i = 1, 2, \dots, n$	
	$V_i = V_{i-1} \text{ e } V_i \neq 0 \text{ e } T_i < 0, \forall i = 1, 2, \dots, n$	
	$V_i > V_{i-1} \text{ e } Pcf_i \neq 0, \forall i = 1, 2, \dots, n$	
	$V_i > V_{i-1} \text{ e } V_i \neq 0 \text{ e } T_i < 0, \forall i = 1, 2, \dots, n$	

- media: valore medio dell'indicatore:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

- deviazione standard: valore della deviazione standard dell'indicatore:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

- confidenza 95%: distanza inferiore e superiore dal valore medio che identifica un intervallo all'interno del quale si suppone possa variare il valore medio dell'indicatore:

$$Conf = \frac{\sigma_x \times 1.96}{\sqrt{n}}$$

essendo 1.96 il valore critico per il test<sup>(3)</sup>.

- differenza assoluta tra valore massimo e minimo di un indicatore:

$$\Delta_{max-min} = x_{max} - x_{min}$$

- differenza assoluta tra valore medio e minimo di un indicatore:

$$\Delta_{med-min} = \bar{x} - x_{min}$$

- rapporto percentuale tra il valore minimo ed il valore massimo misurati dell'indicatore:

$$\frac{x_{min}}{x_{max}} = 1 - \left( \frac{x_{min}}{x_{max}} \right) \times 100$$

- rapporto percentuale tra il valore minimo ed il valore medio misurati dell'indicatore:

$$\frac{x_{min}}{\bar{x}} = 1 - \left( \frac{x_{min}}{\bar{x}} \right) \times 100$$

## 7. Tratte di studio

Come detto in precedenza, il consumo energetico di un treno dipende da numerosi fattori, tra i quali la tipologia di servizio riveste sicuramente un ruolo centrale: a parità di spazio da percorrere, di norma un treno di massa nota e costante che effettua servizio metropolitano (tipicamente intorno ai grandi centri abitati, caratterizzato da fermate frequenti) genera consumi energetici maggiori rispetto ad un servizio di tipo regionale veloce (genericamente utilizzato per collegare centri abitati di medie

<sup>(3)</sup> Valore critico del test nel caso di livello di confidenza pari al 95%. Per contenere il 95% dell'area complessiva si deve considerare l'intervallo compreso tra la media e 1,96 scarti tipo dalla media in entrambe le direzioni.

- Absolute difference between maximum and minimum value of an indicator:

$$\Delta_{max-min} = x_{max} - x_{min}$$

- Absolute difference between mean and minimum value of an indicator:

$$\Delta_{med-min} = \bar{x} - x_{min}$$

- Percentage ratio between minimum and maximum value of the indicator:

$$\frac{x_{min}}{x_{max}} = 1 - \left( \frac{x_{min}}{x_{max}} \right) \times 100$$

- Percentage ratio between minimum and mean value of the indicator:

$$\frac{x_{min}}{\bar{x}} = 1 - \left( \frac{x_{min}}{\bar{x}} \right) \times 100$$

## 7. Case study sections

As mentioned earlier, the energy consumption of a train depends on several factors, including the type of service that certainly has a central role. Over the same distance, normally a train with the same mass operating a metropolitan service (typically around large inhabited centers, characterized by frequent stops) generates greater energy consumption compared to a fast regional service (generically used to quickly connect medium-sized inhabited centers, characterized by less frequent stops). The performance of these types of service could also be affected by the different values of the towed mass and the maximum speeds permitted on the line, as well as other local peculiarities.

For this purpose, four sections (table 3) have been identified: two operated with metropolitan services (M) and two with regional services (RV). The figure beside the mark identifying the service type indicates the direction of travel, conventionally odd (1) or even (2).

Figg. 3 and 4 show the geographical detail of the case study sections served by the metropolitan and regional services respectively.

## 8. Driving profiles: current behavior

As previously mentioned, the first stage of the work was to build the state of the art with reference to the behavior of driving staff. The results of this phase were then compared with the data collected during the real operation, in order to assess the reliability of the data coming from the simulator, validate the model and check discrepancies in the behavior of drivers in both cases.

The number of simulated and actual driving cycles for each route is given in table 4.

TABELLA 3 – TABLE 3

Principali caratteristiche delle tratte di studio  
Main features of case study section

Tratta Section	Fermate [numero] Stops [number]	Lunghezza Length [km]	Percorrenza Travel time [min]	V <sub>max</sub> Max speed [km/h]
M1: Firenze SMN – Pontassieve	5	19.6	25	105
M2: Montevarchi – Pontassieve	6	33.06	30	160
RV1: Firenze SMN – San Giovanni Valdarno	3	37.21 (24.53 DD)	31	160
RV2: Arezzo – San Giovanni Valdarno	2	39.47	27	160

dimensioni in tempi rapidi, contraddistinto da fermate meno frequenti). Sulle prestazioni di queste tipologie di servizio potrebbe incidere, inoltre, il diverso valore della massa rimorchiata e delle velocità massime consentite dalla linea, oltre ad altre peculiarità locali.

A tal proposito, sono state individuate quattro tratte (tabella 3), due per la tipologia *servizio metropolitano* (M) e due per la tipologia *servizio regionale veloce* (RV) in grado di mettere in risalto quanto precedentemente esposto. La cifra accanto alla sigla che individua la tipologia di servizio indica il senso di percorrenza dispari (1) o pari (2).

Nelle figg. 3 e 4 viene riportato il dettaglio geografico delle tratte di studio, servite rispettivamente dal servizio metropolitano e regionale veloce.

8. Profili di guida del personale di condotta: comportamento attuale

Come in precedenza anticipato, la prima fase del lavoro è servita a costruire lo stato dell'arte in riferimento ai comportamenti di guida del personale di condotta. I risultati di questa fase sono stati poi confrontati con quelli dell'esercizio, al fine di valutare l'attendibilità dei dati provenienti dal simulatore, validare il modello e verificare eventuali discrepanze nel comportamento dei macchinisti nei due casi. Il numero di cicli di guida simulati e reali per ciascuna tratta è riportato in tabella 4.

È stata fornita ai macchinisti la Scheda Treno di una delle tratte in esame del tutto analoga a quella che viene fornita su tablet nel normale esercizio, chiedendo di guidare nel modo più naturale possibile, nel pieno rispetto dell'orario e di tutte le norme vigenti.

8.1. Tratta M1: Firenze Santa Maria Novella-Pontassieve

Nelle tabelle 5 e 6 sono riportati i

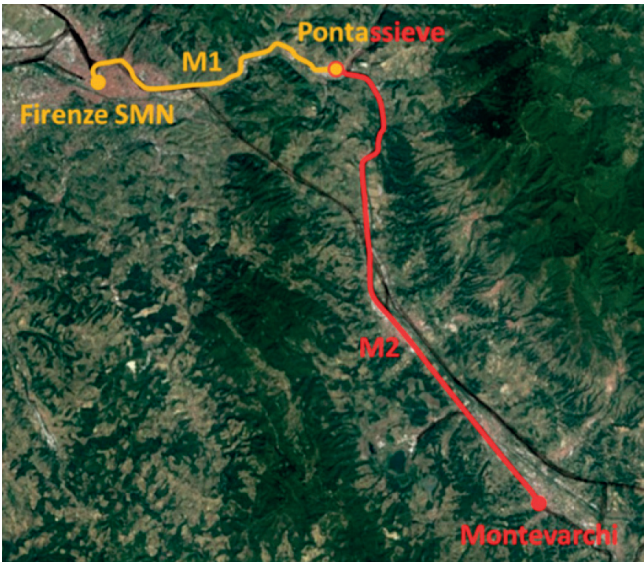


Fig. 3 - Dettaglio delle tratte di studio servite dal servizio metropolitano (M1 e M2).  
Fig. 3 - Case study sections served by metropolitan service (M1 and M2).

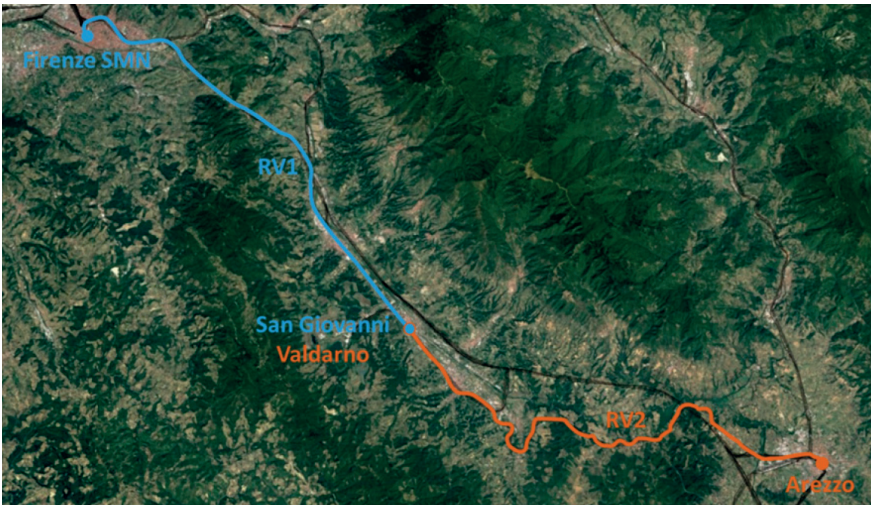


Fig. 4 - Dettaglio delle tratte di studio servite dal servizio regionale veloce (RV1 e RV2).  
Fig. 4 - Case study sections served by the fast regional service (RV1 and RV2).



risultati dell'analisi statistica effettuata su questa tratta con i dati disponibili, rispettivamente con i cicli di guida simulati (SIDAC) e reali (tele-diagnostica).

Si evidenzia una sostanziale differenza tra i risultati ottenuti, a parità di condizioni, con il simulatore e con la tele-diagnostica di bordo, evidenziata nelle figg. 5, 6 e 7.

Tutti gli indicatori presi in esame evidenziano valori reali inferiori a

TABELLA 4 – TABLE 4

Numero di cicli di guida simulati e reali raccolti per ciascuna tratta in esame  
*Number of simulated and actual driving cycles collected for the case study sections*

Tratta Section	Cicli di guida [numero] Driving cycles [number]	
	Simulati Simulated	Reali Real
M1: Firenze SMN – Pontassieve	19	26
M2: Montevarchi – Pontassieve	16	21
RV1: Firenze SMN – San Giovanni Valdarno	22	31
RV2: Arezzo – San Giovanni Valdarno	26	55

TABELLA 5 – TABLE 5

Analisi statistica Firenze Santa Maria Novella – Pontassieve (SIDAC)  
*Statistical analysis Firenze Santa Maria Novella – Pontassieve (SIDAC)*

	Tempo di percorrenza Travel time [min]	Energia netta Net energy [kWh]	Energia trazione Traction energy [kWh]	Energia sosta Stop energy [kWh]	Energia assorbita Absorbed energy [kWh]	Energia resa Rendered energy [kWh]	Consumo specifico Specific consumption [kWh/km]	Energia resa Rendered energy
Media Mean	28.68	472.53	445.46	27.07	481.67	-9.14	24.10	1.95%
Deviazione St. St. deviation	1.99	24.04	21.12	6.80	22.80	3.97	1.22	0.91%
Confidenza 95% 95% confidence	0.90	10.81	9.50	3.06	10.25	1.79	0.55	0.41%
$\alpha$	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Min / Max	23.70%	14.69%	14.24%	59.33%	14.60%	-409.60%	14.50%	82.61%
$\Delta$ Max - Min	8.08	75.28	68.52	25.97	75.80	15.10	3.79	3.51%
Min / Med	9.30%	7.48%	7.33%	34.24%	7.93%	-105.66%	7.33%	62.16%
$\Delta$ Med - Min	2.67	35.36	32.64	9.27	38.21	9.65	1.77	1.22%

TABELLA 6 – TABLE 6

Analisi statistica Firenze Santa Maria Novella – Pontassieve (tele-diagnostica)  
*Statistical analysis Firenze Santa Maria Novella – Pontassieve (tele-diagnostic)*

	Tempo di percorrenza Travel time [min]	Energia netta Net energy [kWh]	Energia trazione Traction energy [kWh]	Energia sosta Stop energy [kWh]	Energia assorbita Absorbed energy [kWh]	Energia resa Rendered energy [kWh]	Consumo specifico Specific consumption [kWh/km]	Energia resa Rendered energy
Media Mean	25.60	310.08	299.59	10.49	335.85	-25.77	15.76	8.62%
Deviazione St. St. deviation	2.98	31.33	30.27	3.75	26.79	9.79	1.58	4.35%
Confidenza 95% 95% confidence	1.14	12.04	11.63	1.44	10.30	3.76	0.61	1.67%
$\alpha$	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Min / Max	43.01%	39.30%	38.92%	75.46%	30.76%	-462.28%	39.13%	86.62%
$\Delta$ Max - Min	16.04	152.10	145.89	18.50	123.28	51.41	7.70	23.05%
Min / Med	16.95%	24.24%	23.59%	42.63%	17.37%	-142.63%	24.05%	58.68%
$\Delta$ Med - Min	4.34	75.15	70.68	4.47	58.32	36.76	3.79	5.06%

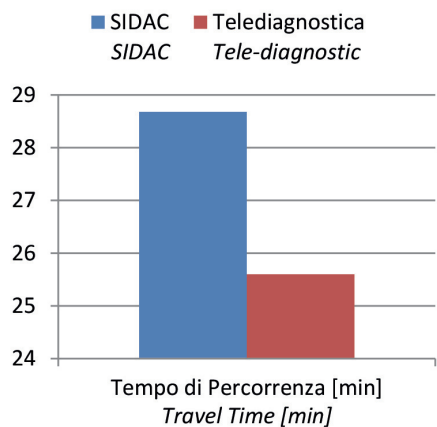


Fig. 5 - Tratta M1 – Tempo di percorrenza medio rilevato in simulazione e dalle misure a bordo.  
Fig. 5 - Section M1 – Mean travel time detected during simulations and on-board measurement.

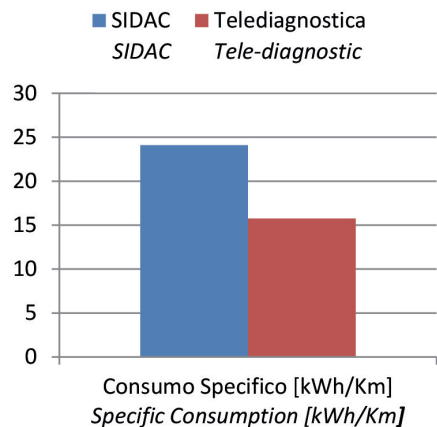


Fig. 6 - Tratta M1 – Consumo specifico medio rilevato in simulazione e dalle misure a bordo.  
Fig. 6 - Section M1 – Mean specific consumption detected during simulations and on-board measurement.

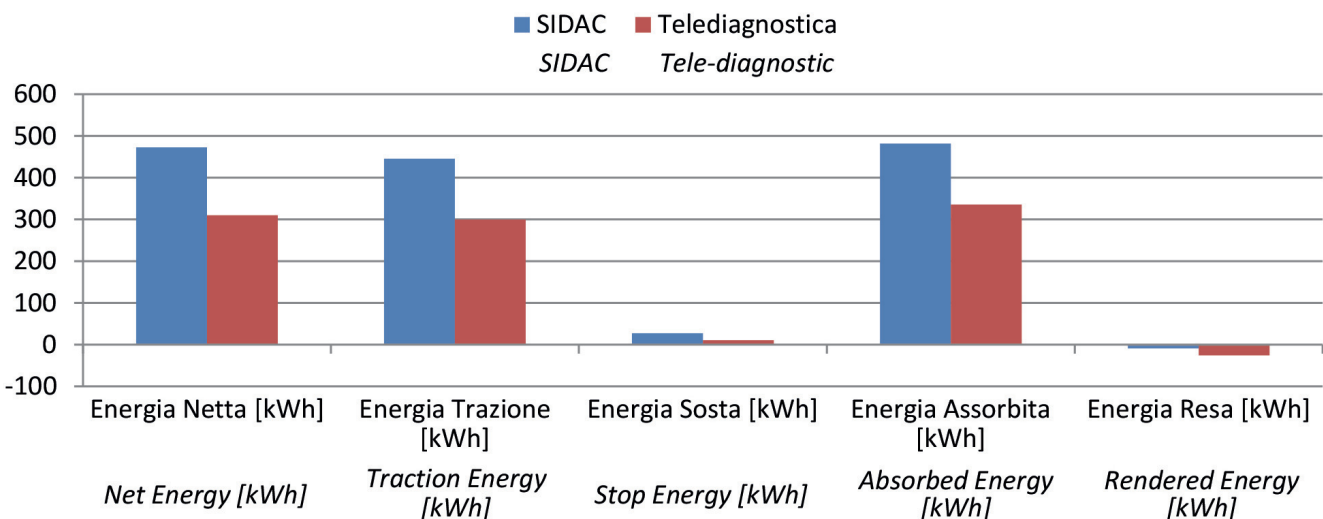


Fig. 7 - Tratta M1 - Valori medi dei principali indicatori di consumo rilevati in simulazione e dalle misure a bordo.  
Fig. 7 - Section M1 - Mean values of the main indicators detected in simulation and on-board measurements.

quelli ottenuti dal simulatore, eccezion fatta per il valore di energia resa, che subisce invece un corposo incremento. Il tempo di percorrenza medio è inferiore di quasi l'11%, il valore di energia netta di oltre il 34%, frutto della riduzione dell'energia assorbita (oltre il 32%) e dell'incremento nell'energia resa (circa il 182%).

Nelle figg. 8 e 9 i risultati sono riportati su un piano energia netta-tempo. Con la guida al simulatore la media dei tempi di percorrenza risulta decisamente più alta della realtà e, in particolare, nessuna delle simulazioni si chiude entro l'intervallo di tempo stabilito dall'orario.

The Train Card of one of the sections under consideration, quite similar to the one provided on a tablet in normal operation, was given to the train drivers, asking her/him to drive as naturally as possible, in full compliance with the timetable and all applicable rules.

8.1. Section M1: Firenze Santa Maria Novella-Pontassieve

Tables 5 and 6 show the results of the statistical analysis carried out on this section with available data, respectively for simulated (SIDAC) and real (tele-diagnostic) driving cycles.

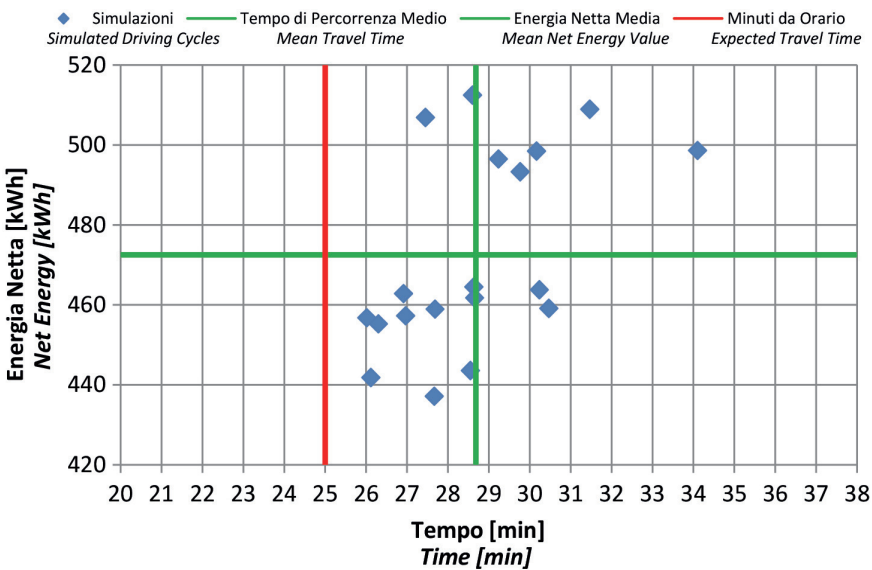


Fig. 8 - Tratta M1 - Distribuzione dei punti rappresentativi i cicli di guida simulati attraverso il SIDAC.

Fig. 8 - Section M1 - Distribution of the representative points of the simulated driving cycles obtained through the SIDAC.

8.2. Tratta M2: Montevarchi-Pontassieve

Anche su questa tratta i valori mostrano una sostanziale differenza tra i risultati ottenuti: come nella tratta M1, tutti gli indicatori presi in esame segnano una riduzione nel passaggio tra i cicli di guida simulati e quelli reali con l'eccezione per l'incremento del valore di energia resa. Il tempo di percorrenza medio è inferiore di oltre l'8%, il valore di energia del 33%, frutto della riduzione dell'energia assorbita (29%) e dell'incremento dell'energia resa (quasi il 60%).

Ad ulteriore conferma degli andamenti relativi alla tratta M1, con il simulatore la media dei tempi di percorrenza risulta più alta e nessuna delle simulazioni riesce a rispettare l'orario.

8.3. Tratta RV1: Firenze Santa Maria Novella-San Giovanni Valdarno

Nelle tabelle 7 e 8 sono riportati i risultati dell'analisi statistica effettuata sui dati disponibili, rispettivamente con i cicli di guida simulati e reali, sintetizzati quindi nelle figg. 10, 11 e 12.

Contrariamente sia ai casi sinora trattati, sia al seguente caso RV2, il tempo di percorrenza medio della tratta è più alto di oltre il 12% nel caso reale, così come l'energia netta, di

There is a substantial difference between the results obtained, on equal terms, with the simulator and the on-board tele-diagnostics, as shown in figg. 5, 6 and 7.

All the indicators under consideration show real values lower than those obtained by the simulator, except for the value of the rendered energy. The mean travel time is lower than 11%, the net energy value lower than 34%, the absorbed energy is lower than 32% and the increase in energy rendered is about 182 %.

In figg. 8 and 9, the results are reported on a net energy -time plan: in simulated driving cycles, the mean travel time is significantly higher than in the reality and, in particular, none of the simulations is respecting the timetable.

8.2. Section M2: Montevarchi-Pontassieve

Again, the values show a substantial difference: as in Section M1, all the indicators mark a reduction in the passage between simulated and real driving cycles with the single exception of the increase in value of energy rendered. The mean travel time is lower than 8%, the energy value is 33% lower, the reduction in absorbed energy is 29% and the increase in energy rendered is almost 60%.

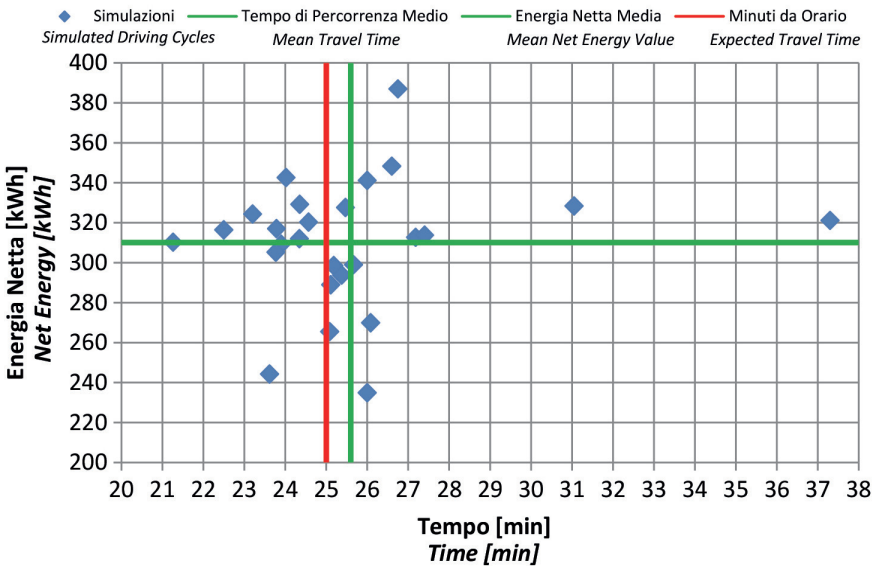


Fig. 9 - Tratta M1 - Distribuzione dei punti rappresentativi dei cicli di guida reali ottenuti con la tele-diagnostica.

Fig. 9 - Section M1 - Distribution of the representative points of the actual driving cycles obtained through the tele-diagnostic.



TABELLA 7 – TABLE 7

Analisi statistica Firenze Santa Maria Novella – San Giovanni Valdarno (SIDAC)

Statistical analysis Firenze Santa Maria Novella – San Giovanni Valdarno (SIDAC)

	Tempo di percorrenza Travel time [min]	Energia netta Net energy [kWh]	Energia trazione Traction energy [kWh]	Energia sosta Stop energy [kWh]	Energia assorbita Absorbed energy [kWh]	Energia resa Rendered energy [kWh]	Consumo specifico Specific consumption [kWh/km]	Energia resa Rendered energy
Media Mean	29.58	568.32	547.11	21.21	599.09	-30.77	15.28	5.44%
Deviazione St. St. deviation	1.51	28.42	28.37	8.07	27.36	6.57	0.76	1.27%
Confidenza 95% 95% confidence	0.51	9.55	9.54	2.71	9.20	2.21	0.26	0.43%
$\alpha$	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Min / Max	18.40%	24.05%	23.65%	75.47%	22.49%	-132.56%	23.89%	61.74%
$\Delta$ Max - Min	5.88	163.05	154.67	26.97	159.71	25.71	4.35	5.12%
Min / Med	11.83%	9.39%	8.73%	58.67%	8.10%	-46.56%	9.32%	41.70%
$\Delta$ Med - Min	3.50	53.35	47.77	12.45	48.56	14.33	1.42	2.27%

TABELLA 8 – TABLE 8

Analisi statistica Firenze Santa Maria Novella – San Giovanni Valdarno (tele-diagnostica)

Statistical analysis Firenze Santa Maria Novella – San Giovanni Valdarno (tele-diagnostic)

	Tempo di percorrenza Travel time [min]	Energia netta Net energy [kWh]	Energia trazione Traction energy [kWh]	Energia sosta Stop energy [kWh]	Energia assorbita Absorbed energy [kWh]	Energia resa Rendered energy [kWh]	Consumo specifico Specific consumption [kWh/km]	Energia resa Rendered energy
Media Mean	33.22	612.92	602.75	10.17	663.25	-50.32	16.41	8.29%
Deviazione St. St. deviation	3.17	52.16	50.34	5.48	56.55	24.60	1.40	4.15%
Confidenza 95% 95% confidence	1.12	18.36	17.72	1.93	19.91	8.66	0.49	1.46%
$\alpha$	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Min / Max	1.47	24.13	23.29	2.53	26.16	11.38	35.36%	99.12%
$\Delta$ Max - Min	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	6.84	18.15%
Min / Med	33.73%	35.33%	34.55%	83.81%	36.79%	-8600.21%	23.80%	98.05%
$\Delta$ Med - Min	13.78	255.58	243.57	18.53	285.20	96.42	3.91	8.13%

quasi l'8%, mentre l'energia resa continua a mantenere l'andamento registrato nei casi precedenti, incrementandosi di oltre il 63%.

A fare la differenza, su questa tratta, è soprattutto l'anomalo comportamento da parte dei macchinisti durante i cicli di guida simulati quando, giungendo nella stazione di Figline Valdarno con un corposo anticipo rispetto all'orario previsto, ripartono da questa non rispettando la fase di sosta prevista, ottenendo, di conseguenza, un tempo di percorrenza nettamente inferiore a quello stabilito dall'orario. Evidentemente, tale anomalia dovrà essere mitigata con una più attenta supervisione dei comportamenti durante i cicli di guida simulati. Al contrario, nei cicli di gui-

To further confirm the trends in M1, by the simulator the mean travel times are higher and none of the simulations met the timetable.

### 8.3. Section RV1: Firenze Santa Maria Novella-San Giovanni Valdarno

Tables 7 and 8 show the results of the statistical analysis carried out on the available data, respectively with simulated and real driving cycles, which are then summarized in figg. 10, 11 and 12.

On the contrary to those discussed above and the following case RV2, the mean travel time of the section is here

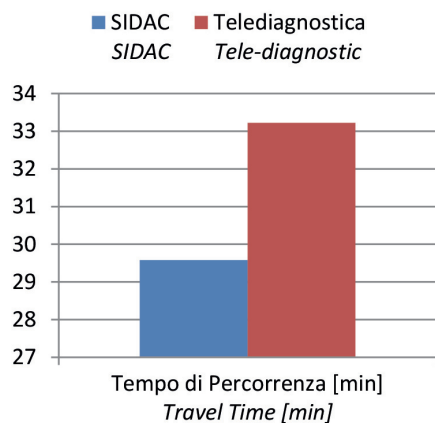


Fig. 10 - Tratta RV1 – Tempo di percorrenza medio rilevato in simulazione e dalle misure a bordo.  
Fig. 10 - Section RV1 – Mean travel time detected during simulations and on-board measurement.

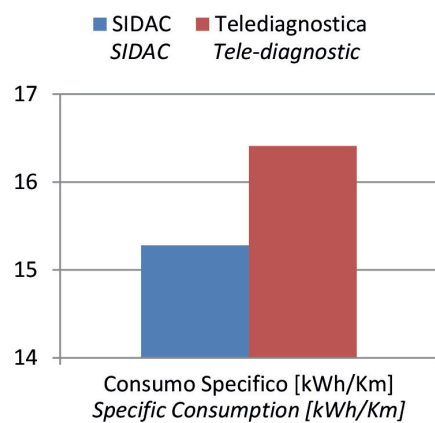


Fig. 11 - Tratta RV1 – Consumo specifico medio rilevato in simulazione e dalle misure a bordo.  
Fig. 11 - Section RV1 – Mean specific consumption detected during simulations and on-board measurement.

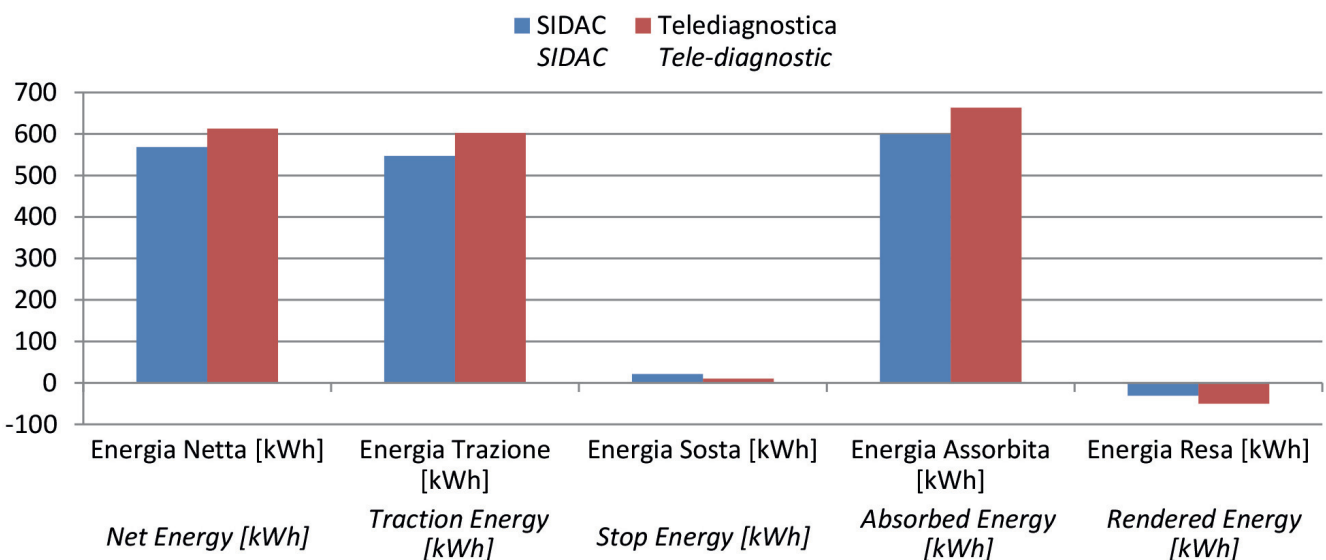


Fig. 12 - Tratta RV1 - Valori medi dei principali indicatori di consumo rilevati in simulazione e dalle misure a bordo.  
Fig. 12 - Section RV1 - Mean values of the main indicators detected in simulation and on-board measurements.

da reali, si riscontrano numerose perturbazioni nell'esercizio, dovute alle interferenze tra i treni, in particolare nella sotto-tratta centrale, che viene percorsa sulla linea direttissima Roma-Firenze: questo comporta inevitabilmente un dispendio di energia dovuto a più frequenti fasi di accelerazione/decelerazione e, in alcuni casi, all'arresto del treno.

Quanto appena esposto è facilmente riscontrabile anche nelle figg. 13 e 14: mentre nella prima quasi tutte le simulazioni si concludono prima del tempo stabilito dall'orario, nella seconda la maggior parte si conclude dopo di questo.

higher of about 12% in the real case, as well as net energy of almost 8%, while the energy rendered continues to maintain the trend recorded in previous cases, increasing by more than 63%.

The difference on this section is the abnormal behavior of driving staff during simulated cycles: the majority of them, arriving in advance to the expected time at Figline Valdarno station, start from this station without respecting the scheduled stopover period and finally obtaining a travel time significantly lower than the one set by the timetable.

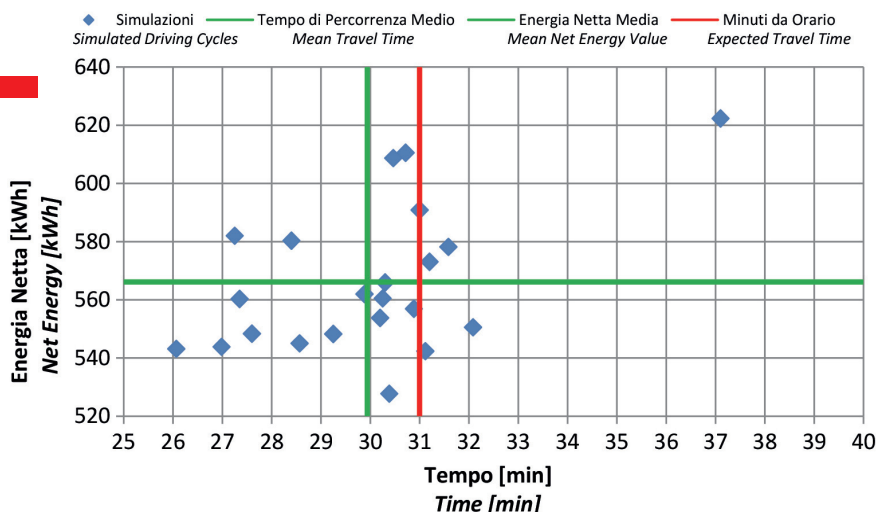


Fig. 13 - Tratta RV1 - Distribuzione dei punti rappresentativi i cicli di guida simulati attraverso il SIDAC.

Fig. 13 - Section RV1 - Distribution of the representative points of the simulated driving cycles obtained through the SIDAC.

#### 8.4. Tratta RV2: Arezzo-San Giovanni Valdarno

Su questa tratta torna a registrarsi l'andamento rilevato nei primi due casi di studio (tratte M1 e M2 relative al servizio metropolitano): passando dall'analisi dei cicli di guida simulati a quelli reali si riscontra una riduzione di tutti gli indicatori, fatta eccezione per l'incremento del valore di energia resa. In questo caso, il tempo di percorrenza medio registra una riduzione del 4%, il valore di energia netta si riduce di oltre il 26%, mentre l'energia resa aumenta di oltre il 128%.

Torna inoltre a riscontrarsi l'assenza di simulazioni conclusesi entro il tempo previsto dall'orario nel caso simulato, a differenza del caso reale, dove, nonostante alcune perturbazioni, molti cicli di guida si completano nel rispetto della puntualità.

#### 9. Identificazione dei profili di guida energeticamente efficienti più naturalmente praticabili da parte del personale di condotta

Nella seconda fase sono state fornite ai macchinisti generiche indicazioni al fine di adottare al simulatore uno stile di guida tale da contenere i consumi energetici, pur nel rispetto dell'orario. Dopo aver raccolto un congruo numero di simulazioni, tale da rendere attendibili i valori ottenuti per i vari indicatori (33 per la tratta M1, 32 per M2, 34 per RV1 e 44 per RV2), è stato

Evidently, this anomaly must be mitigated by a more careful supervision of behavior during simulated driving cycles. On the contrary, in real driving cycles, there are many disruptions in operation due to interference between trains, particularly in the central subsection, which is run on the HS Direttissima line: this inevitably entails a waste of energy due to more frequent acceleration /deceleration phases and, in some cases, train stop.

The concepts above emerge also in fig. 13, where almost all simulations end before the time set by the timetable, while in fig. 14 the majority of cases end after that.

#### 8.4. Section RV2: Arezzo-San Giovanni Valdarno

On this route, the trend observed in the first two study section (M1 and M2) occurs again: from the analysis of the simulated driving cycles to the real ones there is a reduction in all the indicators, with the usual exception for the increase of rendered energy value. In this case, the mean travel time decreases by 4%, the net energy value is reduced by more than 26%, while the energy rendered is increased by more than 128%.

Again, there are no simulations completed within the expected time in simulated driving cycles, unlike the real case, where, despite some disturbances, many driving cycles are completed in compliance with punctuality.

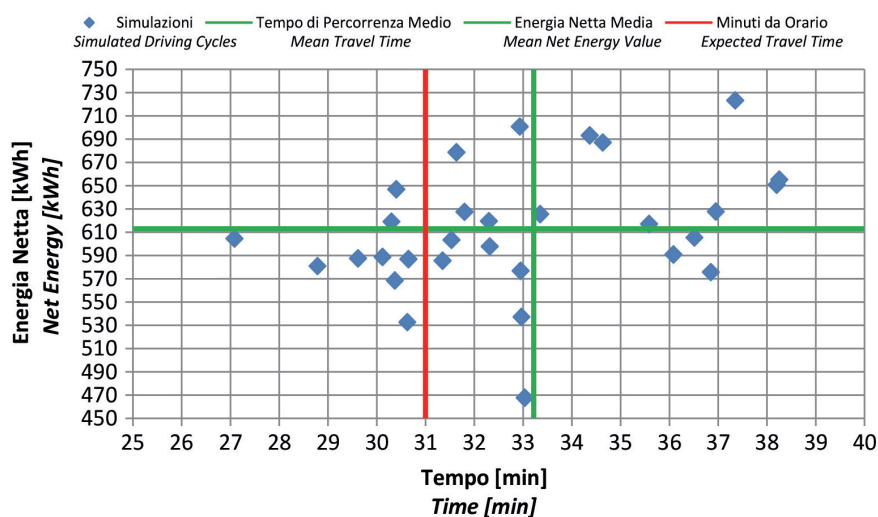


Fig. 14 - Tratta RV1 - Distribuzione dei punti rappresentativi i cicli di guida reali ottenuti con la tele-diagnostica.

Fig. 14 - Section RV1 - Distribution of the representative points of the actual driving cycles obtained through the tele-diagnostic.



possibile identificare i profili di guida più naturalmente e frequentemente praticati dal personale di condotta. Il confronto tra i dati provenienti dalla fase 1 (analisi del comportamento del personale di condotta allo stato attuale) e dalla fase 2 (comportamento spontaneo del personale di condotta in termini di guida “energicamente efficiente”) viene proposto di seguito per ciascuna delle tratte in esame.

### 9.1. Tratta M1: Firenze Santa Maria Novella-Pontassieve

In tabella 9 vengono illustrati i principali risultati in termini di variazioni percentuali riferiti ai valori medi, al-

### 9. Identification of energy-efficient driving profiles naturally practicable by driving staff

*In the second phase, generic information were provided to driving staff to help them to adopt a driving style at the simulator that would contain energy consumption, while respecting the timetable. After collecting a number of simulations, such that the values obtained for the various indicators are reliable (33 for the M1, 32 for M2, 34 for RV1 and 44 for RV2), it was possible to identify the driving profiles more naturally and frequently practiced by train drivers. Comparison of data from phase 1 (current behavior of*

TABELLA 9 – TABLE 9

Confronto complessivo tra fasi della tratta Firenze Santa Maria Novella – Pontassieve  
Overall comparison between the phases of the Florence Santa Maria Novella – Pontassieve Section

	Tempo di percorrenza Travel time [min]	Energia netta Net energy [kWh]	Energia trazione Traction energy [kWh]	Energia sosta Stop energy [kWh]	Energia assorbita Absorbed energy [kWh]	Energia resa Rendered energy [kWh]	Consumo specifico Specific consumption [kWh/km]	Energia resa Rendered energy [%]	Spazio in accelerazione Space accelerating [%]	Spazio a velocità costante Space cruising [%]	Spazio in coasting Space coasting [%]	Spazio in frenatura Space breaking [%]
FASE 1 - PHASE 1												
Media Mean	28.68	472.53	445.46	27.07	481.67	-9.14	24.10	1.95%	22.83%	42.76%	11.29%	23.12%
Dev. standard St. deviation	1.99	24.04	21.12	6.80	22.80	3.97	1.22	0.91%	2.92%	5.21%	4.00%	3.06%
Confidenza 95% 95% confidence	0.90	10.81	9.50	3.06	10.25	1.79	0.55	0.41%	1.31%	2.34%	1.80%	1.38%
Min / Max	23.70%	14.69%	14.24%	59.33%	14.60%	-409.60%	14.50%	82.61%	36.62%	37.99%	80.34%	37.43%
Δ Max - Min	8.08	75.28	68.52	25.97	75.80	15.10	3.79	3.51%	10.82%	19.87%	15.37%	10.48%
Min / Med	9.30%	7.48%	7.33%	34.24%	7.93%	-105.66%	7.33%	62.16%	17.98%	24.16%	66.68%	24.20%
Δ Med - Min	2.67	35.36	32.64	9.27	38.21	9.65	1.77	1.22%	4.11%	10.33%	7.53%	5.59%
FASE 2 - PHASE 2												
Media Mean	28.55	464.38	438.30	26.08	474.10	-9.72	23.68	2.11%	22.64%	39.29%	14.77%	23.30%
Dev. standard St. deviation	1.88	24.67	22.00	7.02	24.06	4.19	1.25	0.94%	2.95%	5.86%	6.58%	4.40%
Confidenza 95% 95% confidence	0.64	8.42	7.51	2.39	8.21	1.43	0.43	0.32%	1.01%	2.00%	2.25%	1.50%
Min / Max	25.53%	20.06%	20.18%	64.32%	20.23%	-861.40%	20.12%	90.46%	43.94%	40.83%	86.79%	56.89%
Δ Max - Min	8.47	101.22	97.03	30.45	103.41	16.41	5.18	3.74%	13.69%	20.29%	30.94%	18.63%
Min / Med	13.50%	13.14%	12.42%	35.24%	14.01%	-88.52%	13.22%	81.30%	22.83%	25.15%	68.10%	39.39%
Δ Med - Min	3.85	61.01	54.43	9.19	66.43	8.60	3.13	1.71%	5.17%	9.88%	10.06%	9.18%
CONFRONTO - COMPARISON												
Media Mean	-0.45%	-1.72%	-1.61%	-3.66%	-1.57%	6.34%	-1.73%	7.83%	-0.84%	-8.11%	30.77%	0.79%
Dev. standard St. deviation	-5.50%	2.64%	4.18%	3.19%	5.56%	5.66%	2.43%	3.14%	0.87%	12.63%	64.39%	43.66%
Confidenza 95% 95% confidence	-28.29%	-22.11%	-20.95%	-21.70%	-19.90%	-19.83%	-22.28%	-21.74%	-23.46%	-14.54%	24.74%	9.00%
Min / Max	7.69%	36.56%	41.73%	8.41%	38.61%	110.30%	38.82%	9.51%	20.00%	7.46%	8.03%	51.99%
Δ Max - Min	4.74%	34.46%	41.60%	17.25%	36.42%	8.66%	36.75%	6.43%	26.59%	2.11%	101.26%	77.76%
Min / Med	45.20%	75.56%	69.51%	2.90%	76.62%	-16.23%	80.28%	30.78%	26.94%	4.13%	2.13%	62.80%
Δ Med - Min	44.55%	72.54%	66.78%	-0.86%	73.84%	-10.92%	77.16%	41.02%	25.88%	-4.31%	33.56%	64.08%

la deviazione standard, all'intervallo di confidenza con errore massimo ammesso pari al 5% ed al rapporto percentuale tra la migliore e la peggiore e tra la migliore e la media prestazione in termini di consumi energetici di alcuni indicatori rappresentativi.

I risultati presentati nella tabella 9 evidenziano una riduzione scarsamente apprezzabile dei consumi energetici a seguito della richiesta di una guida energeticamente efficiente: l'energia netta si riduce di meno del 2%, quella assorbita di poco più dell'1,5%, a fronte di un incremento dell'energia resa di oltre il 6%. Il tempo di percorrenza medio dell'intera tratta subisce una lievissima flessione, inferiore all'1%. Queste variazioni vengono illustrate nelle figg. 15, 16 e 17.

La suddivisione spaziale delle diverse fasi di marcia viene invece sintetizzata in fig. 18.

Il seppur lieve calo dei consumi energetici netti è imputabile alla riduzione della fase a velocità costante di oltre l'8%, a favore di una maggiore percorrenza in coasting, superiore al 30%; la fase di accelerazione rimane pressoché identica, così come quella di decelerazione, seppure con risultati migliori in termini di energia recuperata in fase di frenatura.

## 9.2. Tratta M2: Montevarchi-Pontassieve

Anche in questo caso i risultati evidenziano una riduzione pressoché nulla dei consumi energetici a seguito della richiesta di una guida "energeticamente efficiente": l'energia netta si riduce di meno dell'1%, quella assorbita cresce di poco più dello 0,5%, mentre l'energia resa subisce un sostanzioso incremento di quasi il 21%. Il tempo

train staff) and phase 2 (behavior of driving staff in terms of spontaneous energetically efficient drive), is proposed below for each case study section.

### 9.1. Section M1: Firenze Santa Maria Novella-Pontassieve

Table 9 shows the main results in terms of percentage variations referring to mean values, standard deviation, confidence intervals with the maximum allowed error of 5% and the percentage ratio between the best and the worst and the best and the mean performance in terms of energy consumption of some representative indicators.

The results presented in the table 9 show a somewhat appreciable reduction in energy consumption following the demand for energy-efficient driving: net energy is reduced by less than 2%, absorbed by just over 1.5%, in front of an energy increase of more than 6%. The mean travel time of the whole route undergoes a very slight decrease, less than 1%. These variations are illustrated in the figg. 15, 16 and 17.

Instead, the spatial subdivision of the different driving phases is summarized in fig. 18.

Although slight decrease in net energy consumption is attributable to the constant speed reduction of more than 8%, in favor of greater travel in coasting, more than 30%, the acceleration phase remains almost identical, as well as deceleration, albeit with better results in terms of recovered energy during braking.

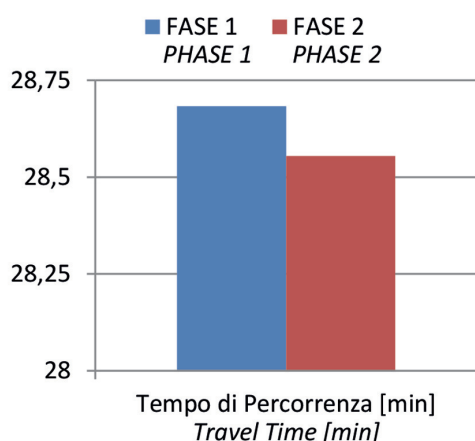


Fig. 15 - Tratta M1 – Tempo di percorrenza medio rilevato nelle due fasi.

Fig. 15 - Section M1 – Mean travel time detected in the two phases.

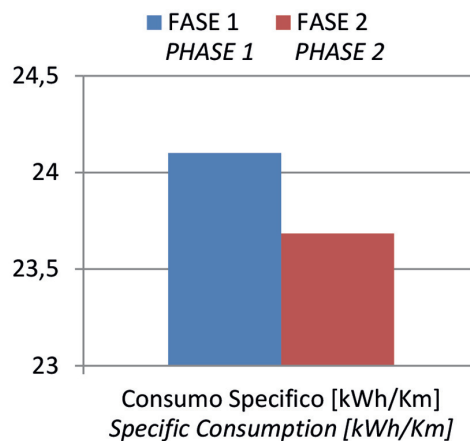


Fig. 16 - Tratta M1 – Consumo specifico medio rilevato nelle due fasi.

Fig. 16 - Section M1 – Mean specific consumption detected in the two phases.

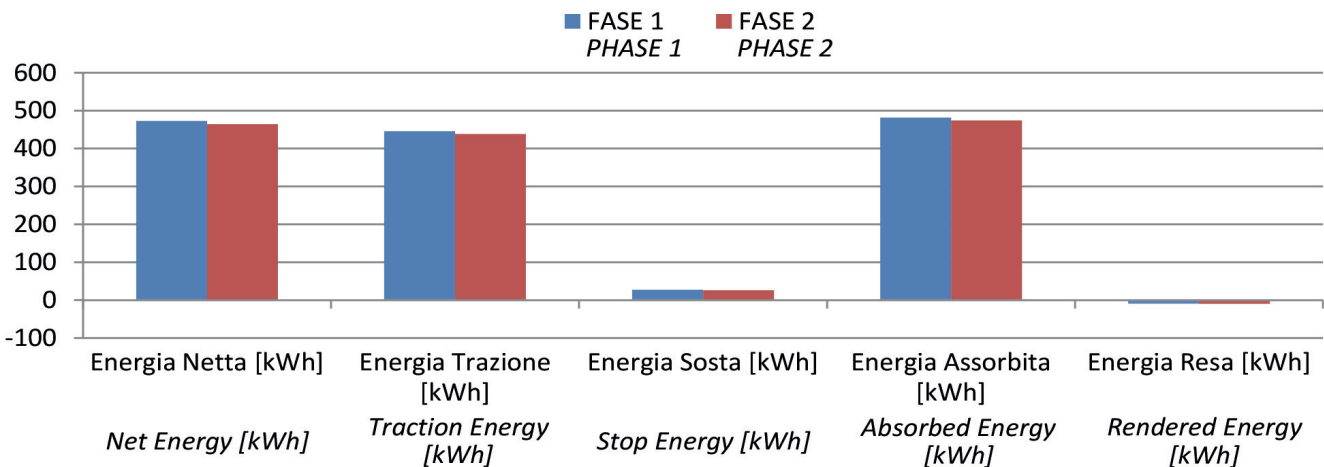


Fig. 17 - Tratta M1 - Valori medi dei principali indicatori di consumo rilevati nelle due fasi.  
Fig. 17 - Section M1 - Mean values of the main indicators of consumption recorded in the two phases.

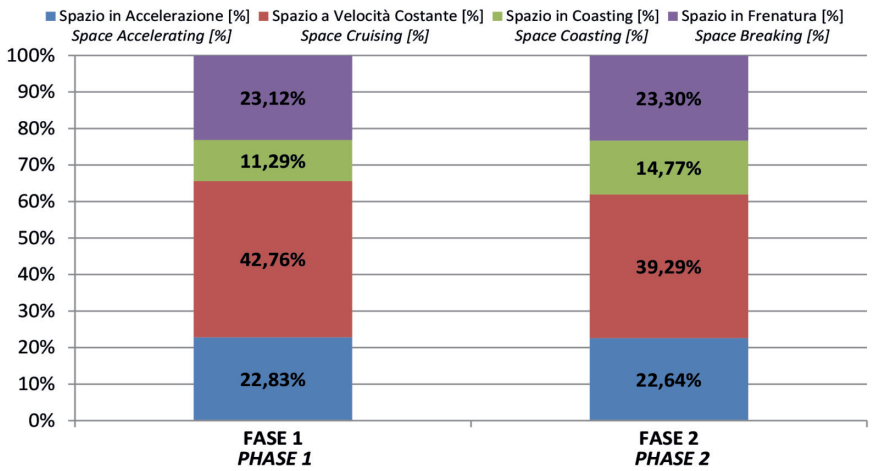


Fig. 18 - Tratta M1 - Suddivisione % del tragitto nelle fasi di marcia.  
Fig. 18 - Section M1 - % subdivision of the journey in the driving phases.

di percorrenza medio dell'intera tratta subisce una lievissima flessione, inferiore all'1%. La variazione dei valori dei vari indicatori viene sintetizzata nelle figg. 19, 20 e 21.

La suddivisione spaziale delle diverse fasi di marcia viene sintetizzata in fig. 22.

Nonostante il calo dei consumi energetici netti risulti, per questa tratta, trascurabile, va posto in risalto l'incremento dell'energia resa, di pari passo con quello della percorrenza in frenatura, che cresce di oltre il 5%; questo dimostra un miglior utilizzo della frenatura a recupero, a discapito delle fasi di marcia a velocità costante e in coasting. La fase di accelerazione rimane invece pressoché costante tra le due fasi.

### 9.3. Tratta RV1: Firenze Santa Maria Novella-San Giovanni Valdarno

In questo caso, per un servizio più veloce, si evidenzia un trascurabile incremento dei consumi energetici a se-

### 9.2. Section M2: Montevarchi-Pontassieve

Again, the results show a near-zero reduction in energy consumption as a result of the demand for an energy-efficient guide: net energy is reduced by less than 1%, absorbed by just over 0.5%, while rendered energy suffer a substantial increase of nearly 21%. The mean travel time of the whole route undergoes a very slight decrease, less than 1%. The variation of the values of the various indicators is summarized in figg. 19, 20 and 21.

The spatial subdivision of the different driving phases is summarized in fig. 22.

Although the decline in net energy consumption is negligible in this section, the increase in rendered energy, in parallel with the space travelled braking, which is growing by more than 5%, demonstrates the best use of recovery braking, the costs of cruising and coasting. The acceleration phase, however, remains almost constant between the two phases.

### 9.3. Section RV1: Firenze Santa Maria Novella-San Giovanni Valdarno

In this case, for a faster service, there is a negligible increase in energy consumption following the demand for an energy-efficient guide: net energy grows less than 0.5%, absorbed by just over 0.5%, while rendered energy increases by just under 6%. Mean travel time of the entire section is slightly reduced, by just over 1%. As noted above, the results of this route strongly affect, in addition to time extensions, the abnormal behavior of many drivers during simu-

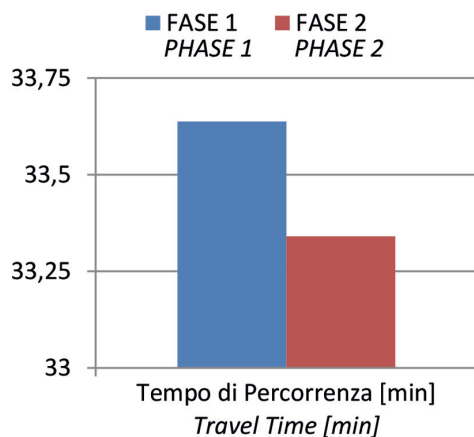


Fig. 19 - Tratta M2 – Tempo di percorrenza medio rilevato nelle due fasi.

Fig. 19 - Section M2 – Mean travel time detected in the two phases.

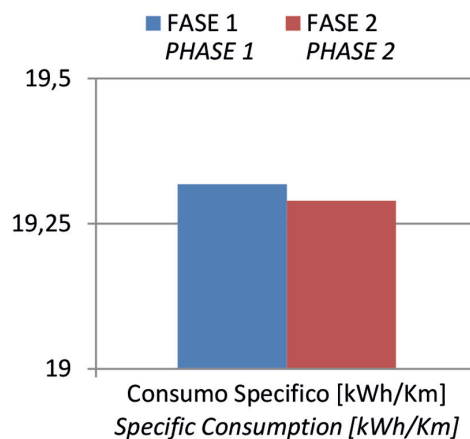


Fig. 20 - Tratta M2 – Consumo specifico medio rilevato nelle due fasi.

Fig. 20 - Section M2 – Mean specific consumption detected in the two phases.

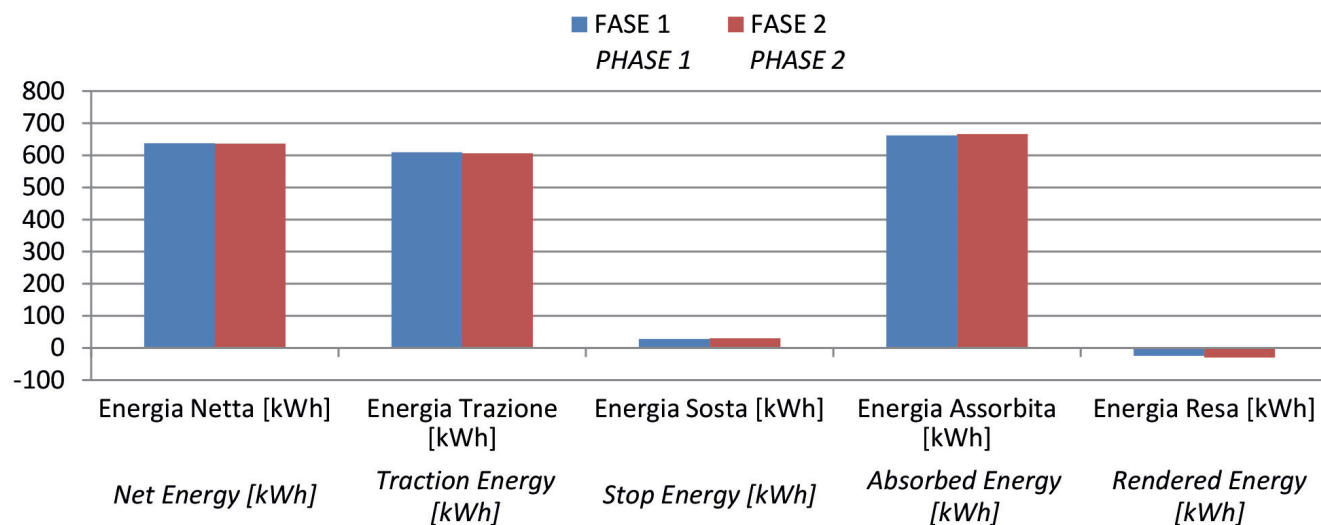


Fig. 21 - Tratta M2 - Valori medi dei principali indicatori di consumo rilevati nelle due fasi.

Fig. 21 - Section M2 - Mean values of the main indicators of consumption recorded in the two phases.

guito della richiesta di una guida “energeticamente efficiente”: l’energia netta cresce meno dello 0,5%, quella assorbita di poco più dello 0,5%, mentre l’energia resa aumenta di poco meno del 6%. Il tempo di percorrenza medio dell’intera tratta subisce una leggera flessione, di poco superiore all’1%. Come evidenziato in precedenza, sui risultati di questa tratta incide fortemente, oltre agli allungamenti temporali, il comportamento anomalo di molti macchinisti durante i cicli di guida simulati, con frequenti partenze in anticipo rispetto all’orario dalla stazione di Figline Valdarno. Queste variazioni vengono illustrate nelle figg. 23, 24 e 25.

lated cycles, with frequent departures in advance from Figline Valdarno station. These variations are illustrated in the figg. 23, 24 e 25.

The spatial subdivision of the different driving phases is summarized in fig. 26.

To point out is the slight increase, more than 2%, of the space travelled accelerating and cruising, almost 3.5%, along with the reduction, by almost 20%, in space travelled coasting. This demonstrates the current lack of attention to the energy aspect, justified by the fact that, despite the important prolongation in the central section, the drivers did



La suddivisione spaziale delle diverse fasi di marcia viene sintetizzata in fig. 26.

Da mettere in risalto sono il leggero incremento dello spazio percorso in accelerazione, oltre il 2%, ed a velocità costante, quasi il 3,5%, insieme alla riduzione di quello percorso in coasting, di quasi il 20%; questo dimostra l'attuale scarsa attenzione all'aspetto energetico, giustificato dal fatto che, nonostante l'importante allungamento nella tratta centrale, il personale di condotta non abbia tenuto conto del largo anticipo d'orario, adottando misure più energicamente efficienti, quali ad esempio, un maggiore utilizzo della marcia in coasting.

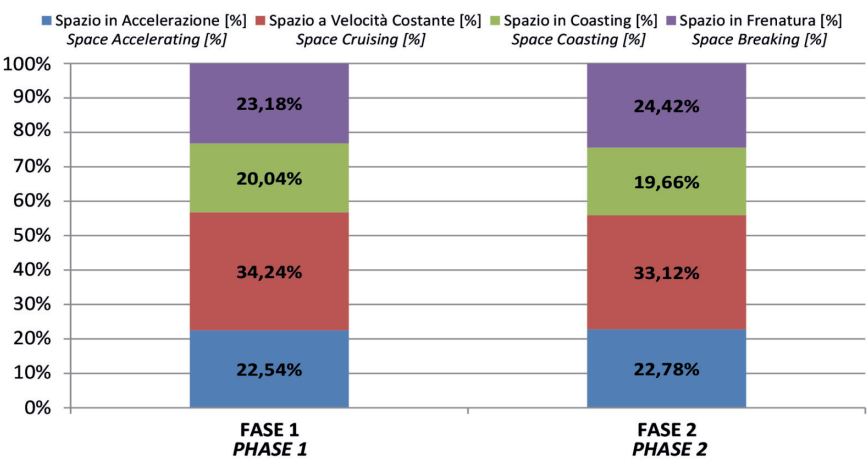


Fig. 22 - Tratta M2 - Suddivisione % del tragitto nelle fasi di marcia.  
Fig. 22 - Section M2 - % subdivision of the journey in the driving phases.

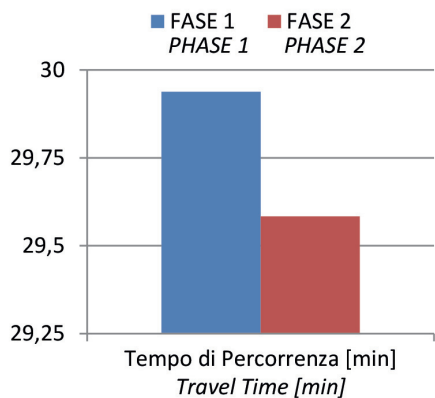


Fig. 23 - Tratta RV1 - Tempo di percorrenza medio rilevato nelle due fasi.  
Fig. 23 - Section RV1 - Mean travel time detected in the two phases.

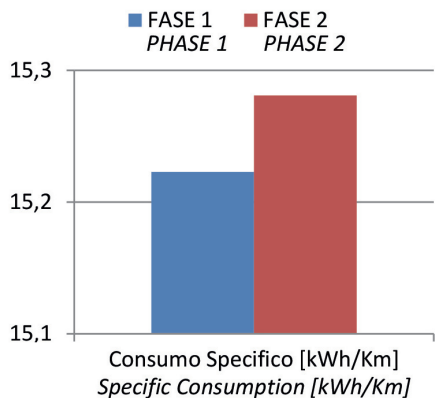


Fig. 24 - Tratta RV1 - Consumo specifico medio rilevato nelle due fasi.  
Fig. 24 - Section RV1 - Mean specific consumption detected in the two phases.

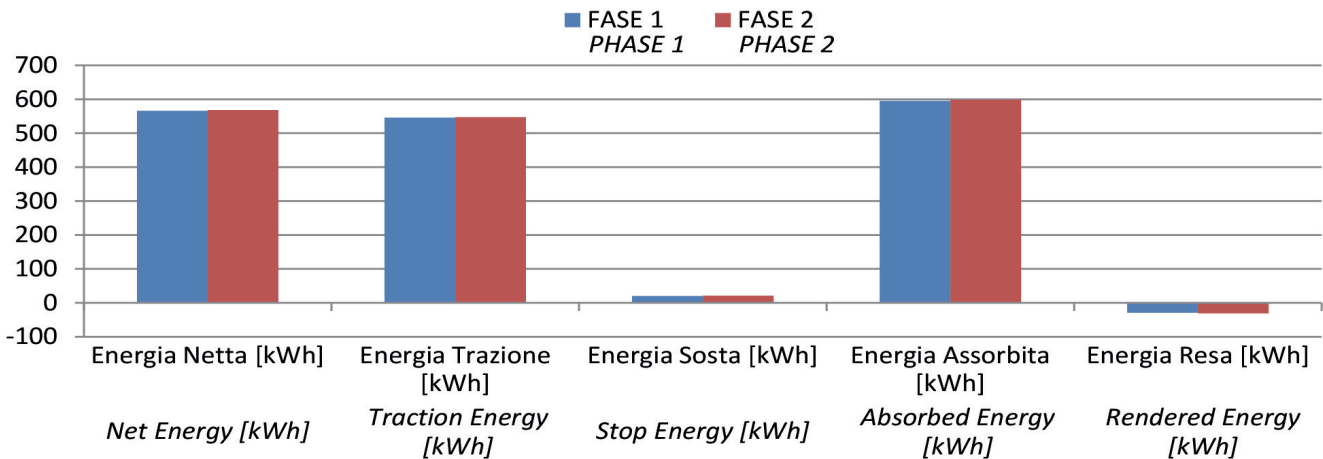


Fig. 25 - Tratta RV1 - Valori medi dei principali indicatori di consumo rilevati nelle due fasi.  
Fig. 25 - Section RV1 - Mean values of the main indicators of consumption recorded in the two phases.

9.4. Tratta RV2: Arezzo-San Giovanni Valdarno

I risultati evidenziano una leggera riduzione dei consumi energetici a seguito della richiesta di una guida “energeticamente efficiente”: l’energia netta decresce poco più dell’1%, quella assorbita di poco meno, mentre l’energia resa incrementa di circa il 3%. Il tempo di percorrenza medio per coprire l’intera tratta subisce un lievissimo decremento, inferiore allo 0,5%. La variazione dei valori dei vari indicatori viene sintetizzata nelle figg. 27, 28 e 29.

La suddivisione spaziale delle diverse fasi di marcia viene sintetizzata in fig. 30.

In queste simulazioni non si osservano apprezzabili differenze nel comportamento del personale di condotta tra le due fasi del lavoro, ad eccezione della riduzione delle fasi di marcia in coasting, pari a quasi il 5%. A questo va unito l’incremento, seppur lieve, dell’energia resa a parità di distanza percorsa in frenatura; da cui si evince una maggiore attenzione all’utilizzo del freno in termini di recupero di energia.

10. Discussione dei risultati

Il presente lavoro è stato articolato in due macro attività: mentre la prima fase ha riguardato lo studio del comportamento attuale dei macchinisti ed il confronto

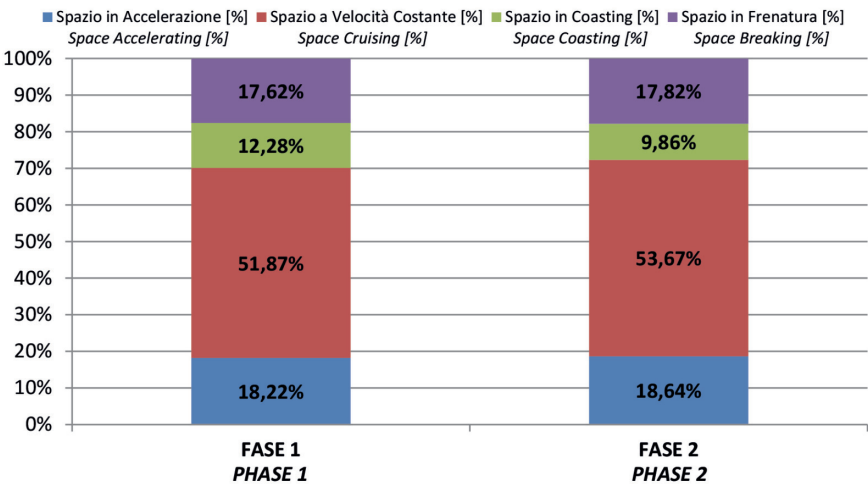


Fig. 26 - Tratta RV1 - Suddivisione % del tragitto nelle fasi di marcia.  
Fig. 26 - Section RV1 - % subdivision of the journey in the driving phases.

not take into account the relevant advance, by adopting more energetically efficient measures, such as, increased use of the coasting.

9.4. Section RV2: Arezzo-San Giovanni Valdarno

The results show a slight reduction in energy consumption, because of the demand for an energy-efficient guide: net energy decreases slightly more than 1%, absorbed energy by a little less, while the rendered energy increases by about 3%. The mean travel time to cover the entire route suffers a slight decrease of less than 0.5%.

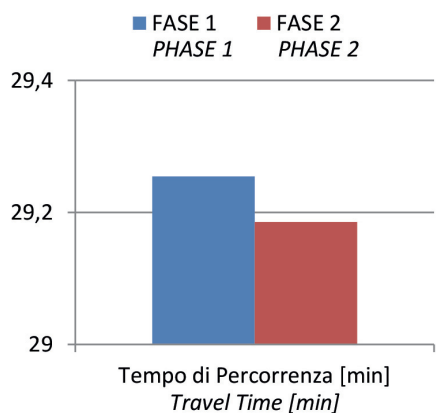


Fig. 27 - Tratta RV2 – Tempo di percorrenza medio rilevato nelle due fasi.  
Fig. 27 - Section RV2 – Mean travel time detected in the two phases.

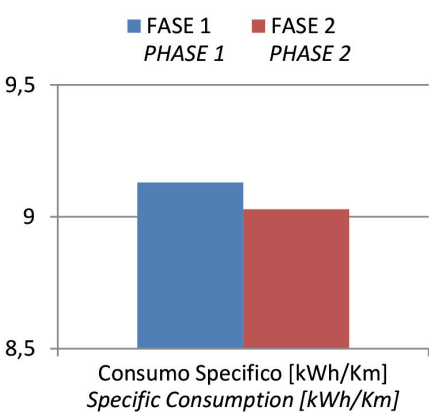


Fig. 28 - Tratta RV2 – Consumo specifico medio rilevato nelle due fasi.  
Fig. 28 - Section RV2 – Mean specific consumption detected in the two phases.

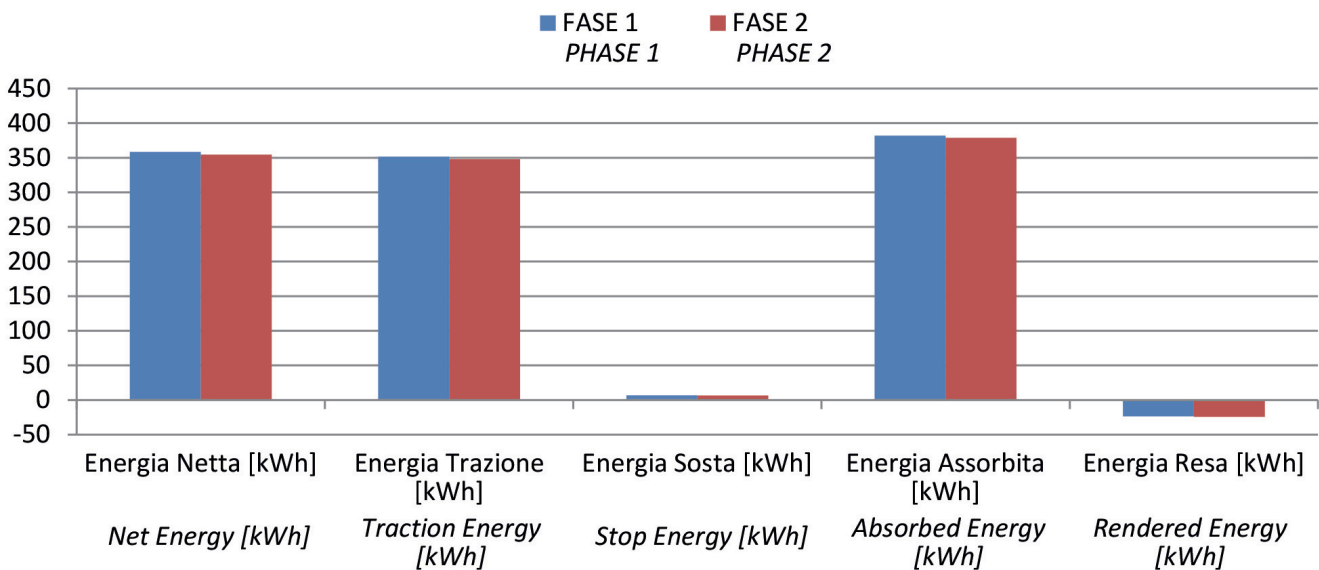


Fig. 29 - Tratta RV2 - Valori medi dei principali indicatori di consumo rilevati nelle due fasi.  
Fig. 29 - Section RV2 - Mean values of the main indicators of consumption recorded in the two phases.

tra i risultati forniti dai cicli di guida simulati e reali, la seconda ha avuto come scopo principale quello di valutare le conoscenze del personale di condotta in materia di guida “energeticamente efficiente”, mediante un confronto tra cicli di guida simulati, rispettivamente senza e con la richiesta ai macchinisti di guidare nel modo che ritenessero più “energeticamente efficiente” possibile, fermi restando i vincoli di orario e sicurezza.

È stato raccolto un adeguato numero di prestazioni con lo scopo di ottenere un valore attendibile dei principali indicatori individuati per caratterizzarle, con un errore massimo del 5%.

La prima fase di questo lavoro ha messo in risalto le differenze tra i risultati forniti dal report del simulatore rispetto al reale esercizio: nel caso del servizio metropolitano, in particolare, le differenze nel risultato finale in termini di consumi energetici si collocano tra il 30 ed il 35%, mentre per quello che riguarda i tempi di percorrenza per coprire la tratta ci si attesta intorno al 10%.

Queste differenze sono imputabili a diverse cause, tra le quali vale la pena citare le seguenti:

- il simulatore nasce e viene ad oggi utilizzato allo scopo di aggiornare e mantenere le competenze dei macchinisti: in questo modo, il personale si prepara in maniera ottimale ad affrontare le situazioni di crisi, senza interferenze, dovute alle esercitazioni, con la regolare circolazione ferroviaria;

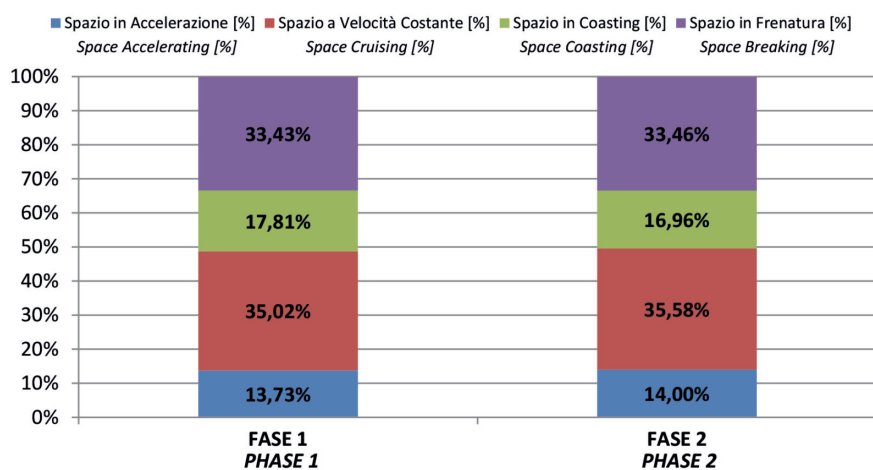


Fig. 30 - Tratta RV2 - Suddivisione % del tragitto nelle fasi di marcia.  
Fig. 30 - Section RV2 - % subdivision of the journey in the driving phases.

the values of the various indicators is summarized in figg. 27, 28 and 29.

The spatial subdivision of the different driving phases is summarized in fig. 30.

In these simulations, there is no noticeable difference in the behavior of the train drivers between the two phases of the work, with the exception of reduction of the coasting, which is almost 5% and a less relevant increase of the rendered energy by braking: more attention is drawn to the use of the brake in terms of energy recovery.

## 10. Discussion of results

The research work was divided into two macro activi-

- al momento, per i macchinisti del servizio regionale di Trenitalia, non è prevista formazione in termini di guida “energeticamente efficiente”, per questo motivo non è mai stata posta attenzione agli aspetti inerenti ai consumi energetici (ad esempio, la presenza di uno o più treni nella tratta compresa tra due sottostazioni non incide sull’andamento del valore della tensione di linea, che si mantiene pressoché costante); questo comporta, evidentemente, un difficile computo del quantitativo di energia assorbita nelle varie fasi di marcia o resa durante le fasi di frenatura;
- i sistemi ausiliari, durante le simulazioni, registrano consumi energetici nettamente superiori a quelli riscontrati nei report forniti dalla tele-diagnostica, riferiti al reale esercizio;
- la conoscenza della linea, in termini di orografia e di riferimenti fissi da utilizzare durante la guida, comporta un vantaggio in termini di esperienza riscontrabile nei cicli di guida reali, a differenza di quelli simulati, svolti da personale di condotta proveniente da tutto il territorio nazionale che, in taluni casi, potrebbe aver percorso il tratto di linea in esame per la prima volta.

Nelle figg. 31 e 32, facenti riferimento alla sotto tratta Firenze Rovezzano – Compitobbi, vengono riportati degli esempi a dimostrazione di quanto esposto finora, rispettivamente con dati forniti dal simulatore e dalla tele-diagnostica.

Nel grafico di fig. 33 viene invece mostrato l’andamento della corrente assorbita durante una fase di sosta dai sistemi ausiliari nel caso del report fornito dal SIDAC e dalla tele-diagnostica.

Da sottolineare, infine, la difficoltà nel reperire cicli di

*ties. The first phase involved the study of the current behavior of the drivers and the comparison between simulated and real driving cycles. The second phase had the main purpose of evaluating the knowledge of railway staff in “energy-efficient” driving, by comparing simulated cycles, respectively without and with the request to drive in the most energetically efficient way, without prejudice to time constraints and safety.*

*An adequate number of driving cycles has been collected with the aim of obtaining a reliable value of the main indicators identified to characterize them, with a maximum error of 5%.*

*The first phase of this work highlighted the differences between the results of the simulator report compared to the real operation: in the case of metropolitan rail service, in particular, the differences in terms of energy consumption are 30÷35%, while in terms of traveling time, it is around 10%.*

*These differences are attributable to several causes, among which:*

- *the simulator was conceived and is used today in order to update and maintain the skills of the drivers: in this way, the staff is optimally prepared to deal with crisis situations, with minimum interference, thanks to the acquired experience, with regular rail traffic;*
- *Trenitalia’s regional service drivers are not currently trained in terms of “energetically efficient” driving, which is why no attention has been paid to energy-related aspects (e.g. the presence of one or more trains travelling between two substations do not affect the actual line voltage, which is kept almost constant); this obviously involves a difficult calculation of the amount of*

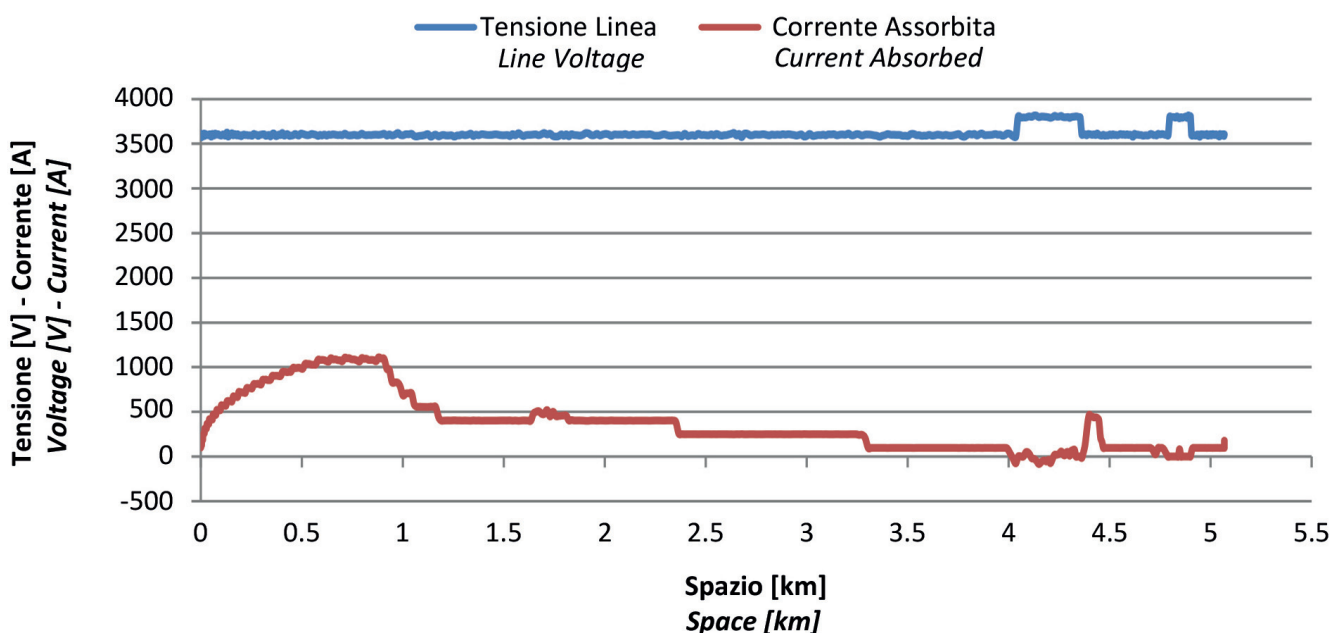


Fig. 31 - Andamento delle grandezze tensione di linea e corrente assorbita nella tratta Firenze Rovezzano-Compitobbi (SIDAC).  
Fig. 31 - Trend of the parameters line voltage and current absorbed in the section Firenze Rovezzano-Compitobbi (SIDAC).



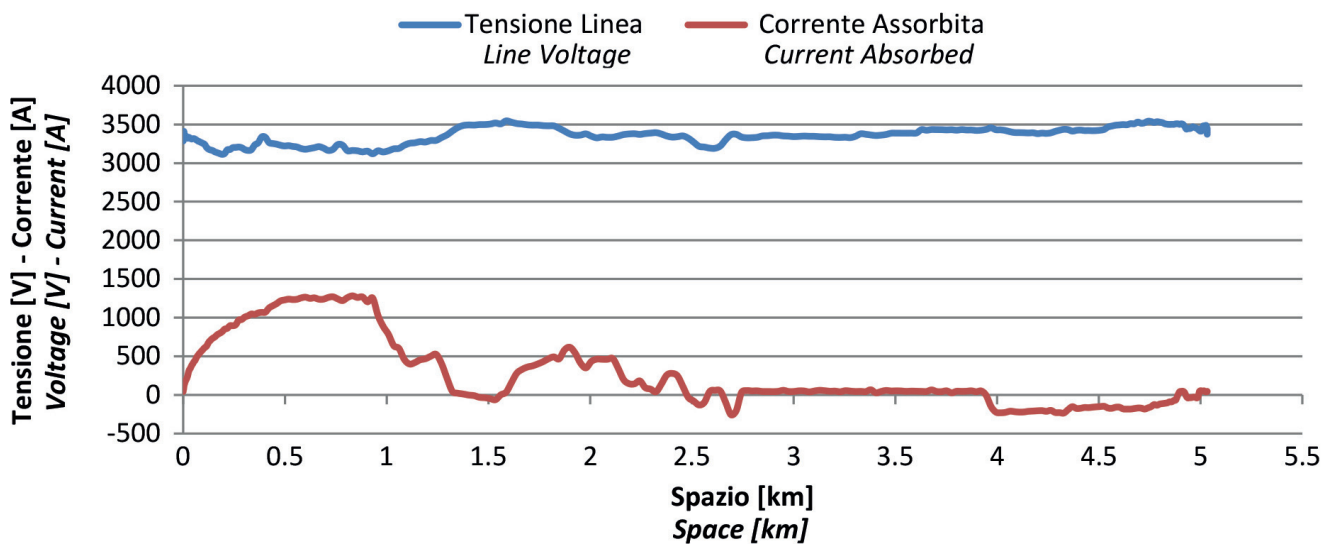


Fig. 32 - Andamento delle grandezze tensione di linea e corrente assorbita nella tratta Firenze Rovezzano-Compiobbi (tele-diagnostica).

Fig. 32 - Trend of the parameters line voltage and current absorbed in the section Firenze Rovezzano-Compiobbi (tele-diagnostic).

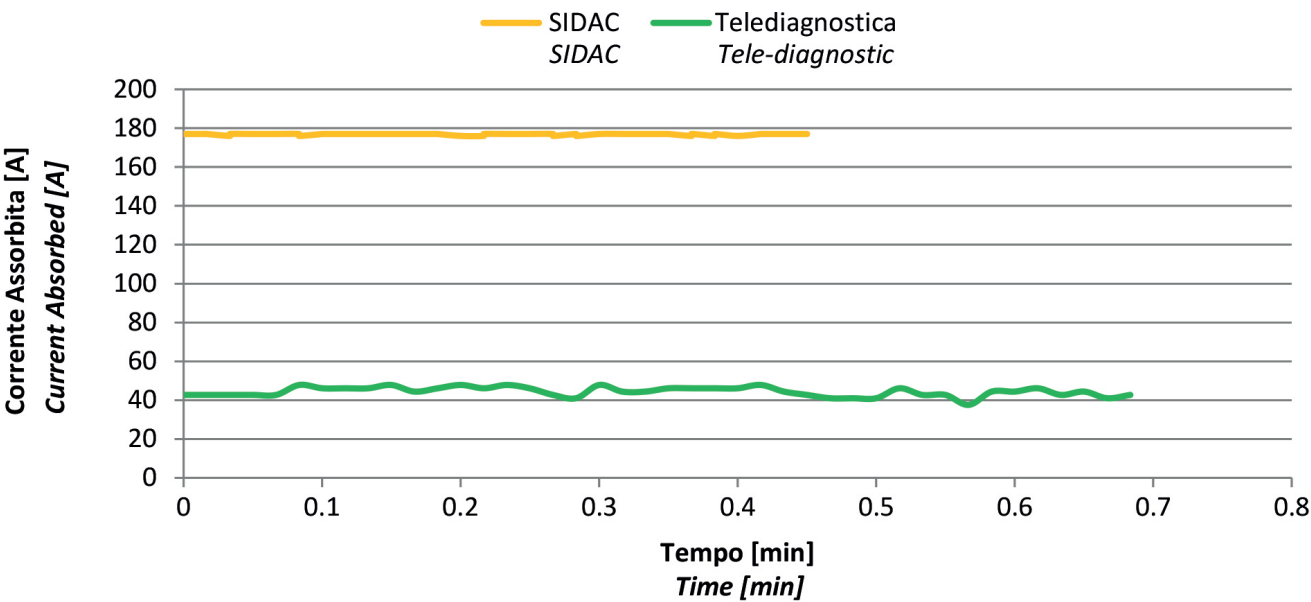


Fig. 33 - Andamento della grandezza corrente assorbita in corrispondenza di una sosta.

Fig. 33 - Trend of the parameter current absorbed at a stop.

guida realizzati in totale assenza di perturbazioni di esercizio nel caso reale da confrontare con quelli svolti al simulatore senza alcuna interferenza durante la marcia del treno.

Il risultato di questa prima fase ha permesso di valutare l'errore atteso commesso dal simulatore nelle misurazioni di energia assorbita e resa. Per ottenere valori più attendibili e confrontabili con il reale esercizio è infatti necessario misurare o stimare in che misura il simulatore sia in grado di riprodurre condizioni di esercizio paragonabili a quelle reali, come ad esempio i cali di tensione

energy absorbed during the various driving phases or rendered during braking;

- auxiliary systems, during simulations, show energy consumption far above those found in the reports provided by the tele-diagnostic for the real operation;
- knowledge of the line, in terms of orography and fixed references to use during driving, brings advantages in terms of experience in real driving cycles, unlike simulated ones, conducted by driving staff from all over the

naturali nei punti più lontani dalle sottostazioni oppure dovuti alla presenza di uno o più treni in differenti fasi di marcia nella tratta coperta da una sottostazione, e se necessario intervenire mediante l'aggiornamento del software del simulatore stesso.

Ai fini della seconda fase di questo lavoro, ad ogni modo, l'errore commesso dal simulatore nel computo delle grandezze caratteristiche, non incide sui risultati, trattandosi di un confronto relativo fra le due fasi del lavoro, nel quale i macchinisti vengono messi nelle stesse condizioni operative e l'unica differenza risiede nella richiesta di guida "energicamente efficiente" relativa alla seconda fase.

La seconda fase del lavoro ha invece permesso di valutare le conoscenze e le attitudini del personale di condotta per la guida "energicamente efficiente". L'analisi dei dati a disposizione non ha fornito i risultati attesi, dal momento che la riduzione dei consumi energetici si attesta su valori inferiori al 2% a seguito della richiesta generica di guida "energicamente efficiente", mentre il tempo di percorrenza di ciascuna tratta si riduce di meno dell'1%, mantenendo inoltre la maggior parte dei cicli di guida conclusi in ritardo rispetto all'orario previsto.

Da sottolineare è l'incremento percettibile del quantitativo di energia resa nel passaggio tra le due fasi, compreso tra il 3% ed il 20% nei quattro casi analizzati, a dimostrazione di una maggiore attenzione posta dai macchinisti alla tecnica della frenatura a recupero, anche se, come visto, questo quantitativo rimane condizionato dall'assenza di cali di tensione durante la percorrenza della tratta, che incidono sui valori registrati.

I risultati di questa sperimentazione indicano la necessità di attività di formazione del personale di condotta finalizzato ad un maggiore approfondimento dei temi legati al risparmio energetico. La conoscenza di alcune semplici tecniche di guida "energicamente efficiente" da acquisire e mantenere durante le esercitazioni al simulatore, possono portare ad una riduzione potenziale dei consumi energetici, che in letteratura è stata quantificata tra il 10% ed il 15%.

Questi semplici accorgimenti sono, ad esempio:

- la riduzione della velocità di crociera di alcune unità nelle tratte più lunghe, dell'ordine della decina di km;
- il maggior utilizzo della tecnica di marcia in coasting dopo il raggiungimento della velocità massima consentita nelle tratte coperte dal servizio metropolitano, dove la distanza tra due stazioni successive è dell'ordine di qualche km.

## 11. Considerazioni conclusive e sviluppi futuri

Gli sviluppi futuri di questa ricerca riguardano lo studio di uno strumento in grado di fornire un semplice supporto ai macchinisti durante la guida.

country, who may have gone over the line for the first time.

In figg. 31 and 32, referring to the sub-section Firenze Rovezzano-Compiobbi, examples are given to highlight the values of electrical parameters according to data provided by simulator and tele-diagnostic system.

The graph in fig. 33 shows the trend of the absorbed current during a standstill by the auxiliary systems, both in the simulated case reporting SIDAC and the in real operation by tele-diagnostic.

Lastly, it is important to note the difficulty in finding driving cycles with no real operating disturbances to compare with those carried out on the simulator without any interference during the train's travel.

The result of the first phase allowed estimating the expected error of the simulator in the measurements of absorbed and rendered energy. Indeed, to obtain reliable values, it is necessary to measure or estimate to what extent the simulator can reproduce operating conditions, such as natural voltage drops far from substations or due to the presence of more trains in a section covered by a substation.

For the second phase of the work, however, the simulator's deviations in calculating the characteristic parameters do not affect the results, since they derive from a relative comparison between the two phases, in which the drivers are placed in the same operating conditions and the only difference lies in the "energetically efficient" driving request for the second one.

This phase, on the other hand, allowed assessing the knowledge and parameters of staff for energetically efficient driving. The data analysis did not provide the expected results, since the reduction in energy consumption is less than 2% due to the spontaneous "energy-efficient" driving behaviour, while the travel time is reduced by less than 1%, though keeping most of the driving cycles completed late in time.

To point out is the perceptible increase for energy in the transition between the two phases, ranging from 3% to 20% in the four case study sections, demonstrating increased attention given by the train drivers to the braking technique in recovery, though the measured quantity are partially affected by the absence of voltage drops.

The results of this experiment indicate the need of training activities for train drivers aimed at a deeper insight into the issues related to energy saving. Knowledge of some energetically efficient driving techniques to acquire and maintain during simulator training can lead to a potential reduction in energy consumption, quantified in literature in the range 10÷15%.

Simple arrangements are, for example:

- reduction of cruising speed of along the longest sections, approximately longer than 10 kilometers;

L'idea sulla quale si basa l'introduzione di questo strumento consiste nella valorizzazione della colonna "Velocità di Marcia" della Scheda Treno fornita ai macchinisti.

Mediante l'utilizzo dei dati provenienti dalle prime due fasi della ricerca, è possibile risalire alle migliori prestazioni in ciascuna sotto-tratta, ognuna delle quali delimitata da due stazioni/fermate successive.

A questo punto, attraverso l'impiego dei diagrammi velocità - spazio, possono essere individuate, in corrispondenza di specifiche sezioni della tratta, le velocità tenute dai macchinisti più virtuosi dal punto di vista del risparmio energetico, tra tutti quelli riusciti a rispettare l'orario previsto dalla Scheda Treno. Il valore di velocità individuato per ciascuna sezione viene riportato nella colonna "Velocità di Marcia" della Scheda Treno, ad oggi contenente valori identici a quelli della colonna "Velocità Massima", pari alla massima velocità consentita in ogni tratto di linea.

Nella fig. 34 viene riportato, a titolo di esempio, l'andamento della velocità nello spazio tenuto da un macchinista "virtuoso" in una delle sotto tratte: in corrispondenza della stazione di origine o di un punto fisico della rete (cippo, bivio, segnale, ecc.) riportato sulla Scheda Treno, può essere consigliata al macchinista la velocità da raggiungere in avviamento e da mantenere pari a 75 km/h, piuttosto che quella massima consentita di 105 km/h.

La ripetizione di questa procedura fornisce, come risultato, una "Scheda Treno Eco", riportata in fig. 35, in cui i valori della colonna "Velocità Massima" e della colonna "Velocità di Marcia" possono differire.

- *large use of coasting after reaching the maximum speed allowed in the sections, where the distance between two subsequent stops is within a few kilometers.*

11. Closing remarks and future developments

*Future developments of this research concern the study of a tool that can provide simple support to drivers.*

*The idea behind the introduction of this tool is the enhancement of the "Train Speed" column of the Train Card supplied to the train drivers.*

*Based on the achieved results, it is possible to trace the best performance in each sub-section delimited by two subsequent stops.*

*By means of speed-space diagrams, the speeds held by the most energetically virtuous drivers can be identified, among those who respected the timetable provided by the Train Card. The speed value for each section is reported in the "Train Speed" column of the Train Card, which now contains values identical to those in the "Maximum Speed" column, i.e. the maximum speed allowed in each line section.*

*As an example, fig. 34 shows the speed diagram held by a "virtuous" driver in one of the sub-sections delimited by stops or other physical points of the line (mileposts, junctions, signals, etc.) on the Train Card.*

*In the showed section, it can be recommended to the driver the maximum speed of 75 km/h, rather than the maximum allowable of 105 km/h.*

*The repetition of this procedure, as a result, provides an "Eco Train Card", shown in fig. 35, where the values in the "Maximum Speed" and "Train Speed" columns may differ.*

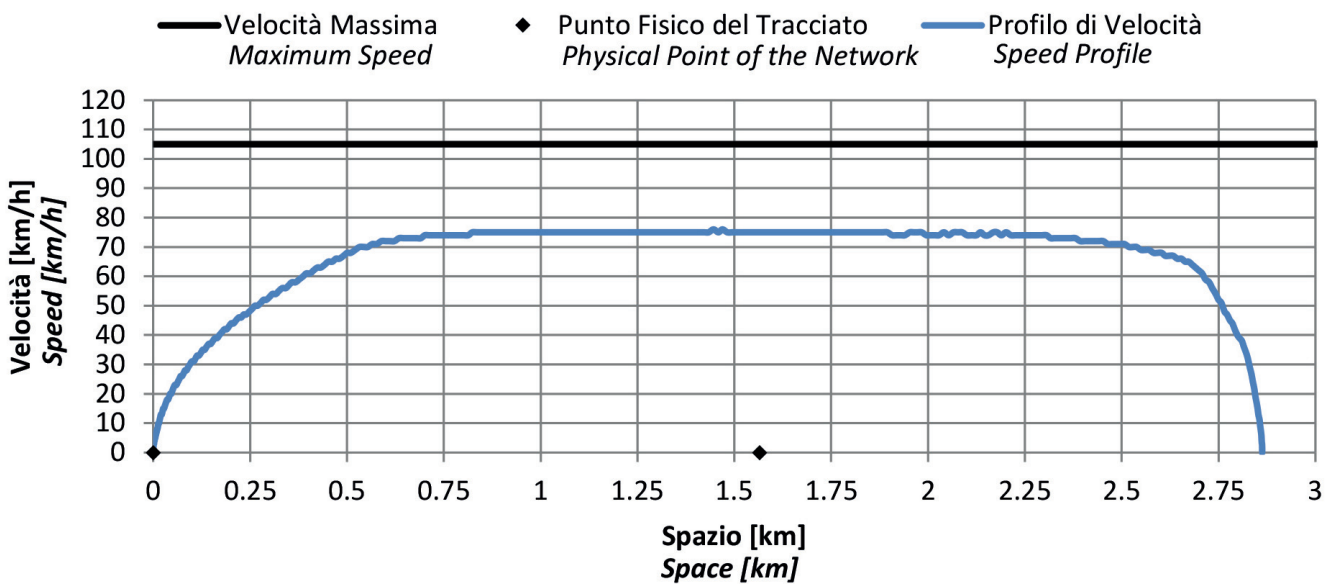



Fig. 34 - Esempio di diagramma velocità - spazio in una sotto-tratta tenuto da un macchinista "virtuoso".  
Fig. 34 - Example of speed - space diagram in a sub-section held by a "virtuous" train driver.



Grado di frenatura	Binario L/S		Rosa km	Località	Orario	Binario ILLUD Val. Max.	SX	Simbologia	DX
	Val. Max.	Val. Max.							
II	30	30	314.077	*FI S.M.N.....	8.15	30	3		
	70	70	313.408	Dev. Uscita		70			
			313.040	INIZIO CODICE					
	85	85	312.794	Cavalc. Statuto		85			
			312.074	Segn. Prot. EST., FI OF			2		
la	105	105	311.000	Cippo km 311.000		105			
			310.112	*FI CAMPO MARTE...	8.20 8.21				
			308.547	Segn. Part. ESTERNO					
			307.040	Fi. Rovezzano	8.24½ 8.25				
	95	95	305.545	2° Bivio Rovezzano	8.27	95			
			302.089	Compiobbi	8.30 8.31				
			286.636	Sieci	8.35 8.36				
			284.479	PONTASSIEVE	8.40 8.41		2		

Grado di frenatura	Binario L/S		Rosa km	Località	Orario	Binario ILLUD Val. Max.	SX	Simbologia	DX
	Val. Max.	Val. Max.							
II	30	30	314.077	*FI S.M.N.....	8.15	30	3		
	70	70	313.408	Dev. Uscita		70			
			313.040	INIZIO CODICE					
	85	85	312.794	Cavalc. Statuto		85			
		55	312.074	Segn. Prot. EST., FI OF			2		
la	105	105	311.000	Cippo km 311.000		105			
		75	310.112	*FI CAMPO MARTE...	8.20 8.21				
			308.547	Segn. Part. ESTERNO					
		95	307.040	Fi. Rovezzano	8.24½ 8.25				
			305.545	2° Bivio Rovezzano	8.27	95			
		90	302.089	Compiobbi	8.30 8.31				
		85	286.636	Sieci	8.35 8.36				
			284.479	PONTASSIEVE	8.40		2		

Fig. 35 - Scheda Treno attuale (a sinistra) e Scheda Treno Eco (a destra).

Fig. 35 - Current Train Card (left) and "Eco Train Card" (right).

I risultati ottenuti con l'utilizzo di questo sistema verranno misurati durante cicli di simulazione, attualmente già in corso, da effettuarsi per stimare l'efficacia del metodo, prima di fornire la "Scheda Treno Eco" ai macchinisti in servizio ordinario.

The results obtained using this system will be measured during simulation cycles that are currently under evaluation to estimate the effectiveness of the method before providing the "Eco Train Card" to drivers in regular service.

## BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] European Commission - Directive 2009/29/CE - 2009.
- [2] MESSINA G., VALENTINI M.P., PEDE G., "L'efficienza energetica nei Trasporti", ENEA, 2011.
- [3] European Commission – TRAINER, "System for driver TRaining and Assessment using Interactive Evaluation tools and Reliable methodologies", Final Report – 2003.
- [4] Intelligent Energy for Europe – ECORailS, "Energy Efficiency and Environmental Criteria in the Awarding of Regional Rail Transport Vehicles and Services", Linee Guida per le amministrazioni responsabili per il trasporto pubblico in Europa – Berlin, 2011.
- [5] BALDASSARRA A., COSCIOTTI E., RICCI S., "Energy efficiency and environmental criteria in the awarding of railway vehicles and services: methodologies of implementation and monitoring", WCRR 2011. 9<sup>th</sup> World Congress on Railway Research, Lille, 2011.
- [6] MALAVASI G., PALLESCHI P., RICCI S., "Driving and operation strategies for traction-energy saving in mass rapid transit systems", Proc. Inst. Mech. Eng., Part F: J. Rail Rapid Transit 225 (5), pagg.475-482, 2011.
- [7] SALVADOR ZURIAGA P., GARCÍA ROMÁN C., PINEDA JARAMILLO J. D., INSA FRANCO R., "The use of driving simulators for enhancing train driver's performance in terms of energy consumption", CIT 2016 – XII Congreso de Ingeniería del Transporte, València, 2016.
- [8] BRUNO F., COVIELLO N., DALLA CHIARA B., DI PAOLA A., PAGLIERO P., VIKTOROV V., "Il consumo energetico di treni in esercizio: simulazione, metodologia di analisi ed influenza dello stile di condotta / The energy consumption of trains in operation: simulation, a methodology for the analysis and influence of the driving style", IF Ingegneria ferroviaria, vol. LXX n. 4, pp. 327-357, ISSN 0020-0956, 2015.
- [9] COVIELLO N., BRUNO F., "Energy performance in railway services: a calculation methodology and the influence of operation parameters", Intelligent Transport Systems, IET, 9(5), 530-538, 2015.
- [10] CHEVRIER R., MARLIÈRE G., RODRIGUEZ J., "Saving Energy in Railway Management with an Evolutionary Multiobjective Algorithm: application and case study", WCRR 2011. 9<sup>th</sup> World Congress on Railway Research, Lille, 2011.
- [11] CUCALA A.P., FERNÁNDEZ A., SICRE C., DOMÍNGUEZ M., "Fuzzy optimal schedule for high speed train operation to mini-



*mize energy consumption with uncertain delays and driver's behavioral response*", Engineering Applications of Artificial Intelligence 25, pagg.1548-1557, 2012.

- [12] KIM K., OH S., HAN M., "A mathematical approach for reducing the maximum traction energy: the case of Korean MRT trains", Proceedings of the International Multiconference of Engineers and Computer Scientists, Vol. 3, pp. 2169-2173, 2010.
- [13] SICRE C., CUCALA A.P., FERNÁNDEZ A., JIMÉNEZ J. A., RIBERA I., SERRANO A., "A method to optimise train energy consumption combining manual energy efficient driving and scheduling", WIT Transaction on The Built Environment, 114, pp. 549-560, 2010.
- [14] COLTRO N., SACCO L., DALLA CHIARA B., "Calcolo della potenzialità e dei consumi energetici del collegamento ferroviario Torino-Modane: applicazione di modelli e simulazione / Calculations of the carrying capacity and energy consumption on the Turin-Modane railway connection: application of models and simulation", IF Ingegneria Ferroviaria, vol. LXVI n. 10, pp. 831-858, ISSN: 0020-0956, 2013.
- [15] DALLA CHIARA B., DE FRANCO D., COVIELLO N., PASTRONE D., "Comparative specific energy consumption between air transport and high-speed rail transport: a practical assessment", Transportation Research Part D, 52(2017), 227-243, 2017.
- [16] RASPINI M., BERLINCIONI L., PALAZZINI C., "SIDAC, il primo simulatore full-mission/full-scale ferroviario italiano", La Tecnica Professionale, anno 10, n. 6, pp. 5-12, 2003.

## ISOTRACK Le soluzioni che contano per il ferroviario

**ISOTRACK**, la divisione trasporti di **Isoil Industria S.p.A.**  
dispone di una vasta gamma di strumentazione per risolvere qualsiasi problema di misura e controllo.



*La nostra gamma di prodotti per il settore ferroviario comprende:*

- Pick up
- Generatori e Sensori di velocità
- Sensori Radar
- Indicatori di velocità
- Registratori Statici d'Eventi (Scatola Nera)
- Display Multifunzione
- Sistemi di Videosorveglianza sui veicoli
- Misuratori di pressione, temperatura, portate e livello
- Barriere e Sensori ad infrarosso per la chiusura automatica delle porte

gandhi-hendrix.com  
AZIENDA CON SISTEMA  
DI GESTIONE QUALITÀ  
CERTIFICATO DA DNV GL  
■ ISO 9001 ■

Cinisello B. - MI (Italy)  
tel. +39 0266027.1  
www.isoil.com  
isotrack@isoil.it

**ISOIL**  
INDUSTRIA

*Le soluzioni che contano*