



Dati sperimentali misurati con On Board Unit per il monitoraggio delle condizioni dei carri merci

Experimental data measured with an On Board Unit for condition monitoring of freight wagons

Prof. Aurelio SOMÀ^(*)
Dott. Ing. Marco AIMAR^(*)
Ing. Andrea ZANARDELLI^(**)

Sommario - Questo articolo propone i dati sperimentali misurati con una On Board Unit (OBU) realizzata dal gruppo di ricerca di Ingegneria Ferroviaria del Politecnico di Torino. Il prototipo realizzato è stato installato su un carri merci intermodale di proprietà dell'Ambrogio Trasporti S.p.a. nell'ambito del progetto ITS Cluster Italy 2020. La campagna di misura, durata 6 mesi, ha permesso di monitorare all'incirca 25000 km sulla stessa linea. Il sistema di monitoraggio cablato sviluppato utilizza differenti tipi di sensori per descrivere le condizioni reali di funzionamento in cui opera il vagone monitorato. Sono stati utilizzati sensori di pressione e temperatura per investigare e analizzare l'uso e le condizioni di funzionamento dell'impianto frenante. La dinamica del carro è stata monitorata utilizzando un accelerometro fissato al telaio del carro. I dati raccolti saranno utilizzati per lo sviluppo di algoritmi di monitoraggio al fine di aumentare la sicurezza e ridurre i costi manutentivi.

Keyword: veicoli ferroviari, affidabilità, monitoraggio, on-board monitoring, diagnostica sistema frenante.

1. Introduzione

Negli ultimi anni, l'interesse per il monitoraggio delle condizioni operative dei carri merci ha subito un interesse sempre maggiore come testimoniano le numerose pubblicazioni in letteratura e i primi dispositivi dedicati presentati sul mercato [1] [2].

Le aziende che operano in questo settore hanno la necessità di conoscere le condizioni operative dei propri carri in modo tale da pianificare una manutenzione mirata e ridurre così i costi legati a queste attività.

In assenza di informazioni derivanti da un monitorag-

Summary - This paper presents the experimental data measured with an On Board Unit (OBU) realized within the research group of Railway Engineering of Politecnico di Torino. The prototype was installed on an intermodal freight wagon owned by the company Ambrogio Trasporti S.p.a. as part of the project ITS Cluster Italy 2020. The measurement campaign, lasting six months, allowed to monitor approximately 25000 km on the same line. The cabled monitoring system developed uses different kind of sensors to describe the real conditions in which operates the monitored wagon. Pressure and temperature sensors were used to describe and analyze the use and the condition of the braking system. The dynamic of the wagon was monitored using an accelerometer installed on the wagon's chassis. The data collected will be used for the development of condition monitoring algorithms in order to increase the safety and to reduce the maintenance costs.

Keyword: railway vehicles, reliability, freight train monitoring, on-board monitoring, braking system diagnostic.

1. Introduction

In recent years, the interest in monitoring the operating conditions of freight wagons has grown significantly as shown in numerous publications in the literature and by the first devices dedicated presented on the market [1] [2].

The companies operating in this sector need to know the conditions of their wagons to be able to plan targeted maintenance and to reduce the costs connected with these operations. In the absence of continuous monitoring information, programmed maintenance is carried out to prevent faults that could lead at best to the discard of the wagon or, in the worst cases, to derailments with serious consequences for the train convoy and the infrastructure. In the

^(*) DIMEAS - Politecnico di Torino.

^(**) Ambrogio Trasporti Spa.

^(*) DIMEAS - Politecnico di Torino.

^(**) Ambrogio Trasporti Spa.

gio continuo, si è soliti adottare una manutenzione di tipo programmato per prevenire i guasti che potrebbero portare allo scarto del carro o, nei casi peggiori, a deragliamenti con serie conseguenze per il convoglio ferroviario e l'infrastruttura. Nel periodo di tempo, generalmente di 6 anni, tra due revisioni, le condizioni e il chilometraggio coperto dal carro non sono rilevate direttamente ma sono comunicate dall'Impresa Ferroviaria (Non tutte le imprese ferroviarie offrono questo servizio).

Attualmente le uniche informazioni disponibili sono fornite dai dispositivi fissi installati lungo la rete ferroviaria, separati da decine di chilometri. Per poter intervenire su un guasto incipiente è necessario invece disporre di un monitoraggio continuo e di un relativo sistema di comunicazione che possa allertare il macchinista e il personale manutentivo dell'azienda proprietaria del carro. Le caratteristiche essenziali che deve possedere un sistema di monitoraggio sono l'elevata affidabilità combinata all'assenza di manutenzione, il tutto offerto ad un basso costo.

La sensorizzazione di un veicolo ferroviario permette di determinare parametri come le performance dinamiche del carrello, le irregolarità del tracciato e la velocità assoluta del treno. Differenti tipologie di sensori possono essere impiegate per ottenere diversi tipi di informazioni. MATSUMOTO [3] ha proposto un metodo che permette di utilizzare sensori senza contatto per la misurazione della deformazione delle ruote piuttosto che utilizzare estensimetri o le celle di carico. I risultati ottenuti mostrano che la tecnica può essere utilizzata per ricavare dati soddisfacenti. BLEAKELY e SENINI [4] hanno sviluppato uno strumento per analizzare i segnali di accelerazione acquisiti da accelerometri installati sul telaio del vagone. MEI e LI [5] hanno monitorato le risposta dinamica di un veicolo ferroviario alle eccitazioni prodotte dal tracciato utilizzando una piattaforma inerziale montata sul carrello. I valori di accelerazione di beccheggio e imbardata sono stati ottenuti efficacemente utilizzando due differenti filtri. Lo svantaggio di questo approccio è rappresentato dal fatto che, a velocità di 50 m/s, il ritardo tra due segnali è piccolo, ciò introduce un grande errore nella misurazione. MONJE [6] ha misurato la fatica dei contatti volventi nell'interazione ruota rotaia utilizzando dei sensori ottici capaci di rilevare il fenomeno dello slittamento nel punto di contatto ruota rotaia. I risultati dei test mostrano che la ruota non rotola perfettamente ogni volta.

Lo sviluppo e la diffusione di strumenti di misura tecnologici ha permesso la nascita del monitoraggio continuo, che ha il vantaggio di agire in tempo reale da sistema di controllo e sicurezza. I sistemi di monitoraggio continuo sono costituiti dall'unità di acquisizione, elaborazione e di invio dei dati processati da remoto, eliminando così la necessità di recarsi fisicamente sul luogo di installazione del dispositivo. Tuttavia lo svantaggio di questi sistemi è rappresentato dall'alto costo. Nonostante la disponibilità di nuove tecnologie sia stata accompagnata da una continua diminuzione dei costi, i sistemi di monitoraggio tradizionale utilizzati per la misura di

period of time, typically 6-years, between two complete inspection, the condition and the mileage covered by the wagon are not measured directly but communicated by Railway Undertakers (not all the RU).

Currently, the only information available is provided by the equipment installed along the railway network, separated by tens of kilometers. However, to identify and intervene on an incipient failure, it is necessary to have continuous monitoring and a communication system that can warn the train conductor and the maintenance staff of the owner of the wagon. The essential features, which must have a monitoring system, are the high reliability combined with the absence of maintenance, all at a low price of the device.

The sensorization of a railway vehicle allows to detect bogie dynamic performance, track irregularities, and absolute train speed. Different classes of sensors that can be installed on a railway vehicle can be used to obtain different types of information. MATSUMOTO et al. [3] proposed a method that relies on non-contact gap sensors to detect wheel distortion rather than strain gauges or load cells. Their results showed that the method can be used to extract satisfactory data. BLEAKELY and SENINI [4] developed a tool to analyze the acceleration signals acquired from accelerometers mounted on the body frame of a wagon. MEI and LI [5] monitored the vehicle dynamic response to the track excitation using inertial platform mounted on a bogie. The rail vehicle pitch and bounce accelerations were successfully estimated using two separate filters. The disadvantage of this scheme is that, at the speed of 50 m/s, the delay between two signals is small, thereby introducing large errors in the measurement. MONJE et al. [6] measured the rolling contact fatigue at the wheel rail interaction with an optical sensor that was able to detect the sliding effect at the wheel rail contact point. The test deduced that the wheels do not roll evenly at all times.

The development and diffusion of technological measurement instruments has seen the emergence of continuous monitoring, which has the advantage of acting both as a control and a safety system in real time. The monitoring systems continuously are constituted by units of acquisition, processing, and transfer of the processed data remotely, eliminating the need to physically go on the site where the equipment is installed.

However, the drawback of permanently installing the sensors on the structure can often be very expensive. In fact, although the availability of new technologies has been accompanied by a continuous decrease in costs, the traditional monitoring systems based on the detection of static quantities are still being localized in space. On the contrary, a good monitoring system should provide information on when and where you are experiencing a problem.

To achieve these objectives without an increase in costs, it is necessary to select low cost sensors, to develop a system for collecting and processing continuous data on-site, and to determine a method of real-time transmission of information.

grandezze statiche sono ancora installati a bordo linea. Al contrario un buon sistema di monitoraggio deve fornire informazioni su dove e quando si verifica un guasto. Per raggiungere questi obiettivi senza aumentare i costi è necessario individuare dei sensori a basso costo, sviluppare un sistema in grado di campionare ed elaborare i dati sul carro e creare una logica di invio dei dati raccolti in tempo reale.

In letteratura sono presenti pochi articoli che riportano lo studio termico dei sistemi frenanti ferroviari che adottano la soluzione del freno a ceppi. Gli studi di maggior rilievo sono sati condotti da VERNERSSON [7] e da VERNERSSON e LUDÈN [8] che ha sviluppato un modello termico che descrive il fenomeno della generazione di calore in frenata e l'ha successivamente validato attraverso test a banco e in linea. Ha inoltre condotto importanti studi comparativi sull'influenza dei materiali delle suole freno nella generazione di calore in fase di frenata [7].

Lo stress termico generato da un non corretto funzionamento del sistema frenante può portare ad una riduzione significativa della durata operativa delle sale ferroviarie, incrementando così i costi manutentivi. VINEESH [9] ha sviluppato un modello ad elementi finiti sulla base di studi precedenti e l'ha validato attraverso prove in linea sottolineando come la non uniformità della potenza frenante dovuta a malfunzionamenti degli organi dell'impianto porti ad aumenti anomali della temperatura delle sale. VAKKALAGADDA [10] ha condotto numerosi test che hanno messo in luce i differenti comportamenti delle suole in ghisa rispetto a quelle in materiale composito.

Rispetto ai lavori presentati in letteratura, spesso limitati a prove in laboratorio, nel presente lavoro è sono analizzati dati rilevati in linea con una estesa distanza monitorata [11].

I test in linea riportati in letteratura generalmente non superano i 200 km di monitoraggio e sono condotti su circuiti di prova. In questo articolo viene presentato il monitoraggio di un carro merci in condizioni di normale funzionamento su una distanza di circa 1400 km per singolo viaggio.

Nella fase iniziale il sistema è stato alimentato a batterie e le misure accelerometriche possono rappresentare un input per dimensionare correttamente l'energy harvester. L'assenza di un impianto elettrico a bordo carro per alimentare correttamente i dispositivi installati rappresenta il maggior ostacolo da superare necessariamente. Nonostante i grandi passi avanti fatti dall'elettrica per ridurre i consumi energetici, in assenza di un'adeguata fonte di energia a bordo carro, le uniche informazioni che possono essere campionate e inviate da remoto, con una frequenza di qualche ora, sono le informazioni logistiche (Posizione GPS). Questo tipo di informazione permette di tracciare il vagone e i beni trasportati lungo la rete ferroviaria. Le aziende che generalmente forniscono questo servizio garantiscono una vita utile della batteria di 5 anni a fronte di un paio di punti logistici al giorno.

In the literature, there are few articles that report the thermal study of railway brake systems adopting the brake blocks solution. The most significant studies were conducted by VERNERSSON [7] and VERNERSSON and LUNDÉN [8], who developed a thermal model that describes the phenomenon of heat generation in braking and subsequently validated through bench and in-line testing. They have also conducted major comparative studies on the influence of the brake soles materials in heat generation during braking [7].

The thermal stress generated by an incorrect mode of operation of the brake system can lead to a significant reduction in service life of wheelset, increasing the cost maintenance. VINEESH et al. [9] developed a finite element model based on previous studies and validated this through in-line tests, highlighting that the non-uniformity of the braking power due to the failure of some subsystems of the braking system leads to abnormal increases in the wheelset temperature. VAKKALAGADDA et al. [10] conducted numerous tests that have highlighted the different behaviors of cast iron brake blocks compared to those in composite material.

Compared to the works presented in the literature, often limited to laboratory tests, this paper presents and analyzes data collected in line with an extended monitored distance [11]. Generally measurements presented in literature not exceeding 200 km and are conducted on test circuits. This paper shows the monitoring of a freight wagon, under normal operating conditions, for a distance of about 1400 km for single trip.

In the initial stage, the system has been battery powered and accelerometer measurements can be an input to size properly the energy harvester. The absence of an electrical system that can adequately power the necessary electronic devices is the major obstacle that is essential to overcome. Despite the great progress made by electronics to reduce the power consumption, in absence of a suitable on board energy source the freight wagons, the only information that can be collected and sent, with an update every some hours, are the logistical information (GPS positions). These type of information allow to track the wagons and the goods transported along the railway line. The companies that offer this service generally are able to provide a couple of points a day ensuring a battery life of 5 years.

The option to wire existing freight wagons is not viable due to high installation costs. Different technologies and solutions are available for the recovery of energy usable on board the wagon. The choice to adopt one with respect to another is defined from the energy consumption of the monitoring device, the frequency with which the device and its sensors are activated and the type of sensors installed.

Consistent with the more recent literature, our research group [13] [14], proposes to combine the development of the monitoring system with an energy harvester [15] that can provide the necessary power to the monitoring system.

ZAMPIERI et al. [16] developed an on board monitoring systems capable of measuring and processing the signals

L'opzione di cablare i carri merci al momento non è perseguitibile a causa degli alti costi di installazione.

Differenti tecnologie e soluzioni sono disponibili per recuperare l'energia disponibile a bordo carro. La scelta di adottarne una rispetto ad un'altra è determinata dai consumi energetici del dispositivo di monitoraggio, dalla frequenza temporale con la quale il dispositivo e i suoi sensori si attivano e dalla tipologia di sensori installati.

Coerentemente con la più recente letteratura, il nostro gruppo di ricerca [13] [14] propone quindi di affiancare allo sviluppo del sistema di monitoraggio quello di un energy harvester [15] in grado di fornire al sistema l'alimentazione elettrica necessaria all'autoalimentazione.

ZAMPIERI [16] ha sviluppato un sistema di monitoraggio cablato da installare a bordo carro per la misura e l'elaborazione dei dati raccolti sul corpo boccola e sul carrello in modo tale da rilevare eventuali malfunzionamenti di diversi componenti critici. Lo scopo principale di questo dispositivo è quello avvisare con un allarme di primo livello in caso di guasto ai componenti, ma è anche in grado di fornire importanti informazioni per il miglioramento della manutenzione preventiva.

In questo lavoro è presentato lo studio, la progettazione e i test di un dispositivo di monitoraggio (On-Board Unit) installato su un carro merci intermodale. Il vagone è di proprietà dell'Ambrogio Trasporti S.p.A., un'azienda italiana di trasporto intermodale operante in Europa centrale. I parametri monitorati durante le prove effettuate sono stati: la temperatura delle suole freno in ghisa, le pressioni operative dell'impianto frenante (condotta generale, cilindro freno e valvola pesatrice) e le accelerazioni del veicolo. Le misure effettuate hanno permesso in primo luogo di verificare l'efficacia del sistema di monitoraggio sviluppato.

2. Specifiche

Nella prima parte di questo progetto di ricerca sono stati valutati quelli che sono i guasti tipici che si verificano su questa tipologia di carri basandosi su quanto riportato in letteratura e analizzando lo storico guasti presente nel database aziendale.

Quest'attività preliminare ci ha permesso di capire quali fossero i sottosistemi maggiormente interessati da guasti. L'analisi dei sottosistemi (fig. 1) ci ha inoltre permesso di selezionare i sensori necessari per monitorare i componenti individuati.

L'analisi dei guasti che hanno interessato i carri dell'Ambrogio Trasporti S.p.a. ha evidenziato come il sistema frenante fosse l'apparato maggiormente soggetto a guasti. I sottosistemi ruota e corpo boccola, grazie all'uniforme distribuzione dei

detected on the axle-box, and on the bogie in order to detect malfunctions of several critical components. The general purpose of this system is that of ensuring a communication of first-level alarm in the event of components failure, but it is also able to provide indications regarding the requirements of the components in order to improve the programming of preventative maintenance.

In this work, the study, design, and test of a monitoring system (on-board unit) on an intermodal freight wagon was presented. The wagon is the property of Ambrogio Trasporti S.p.A., an Italian intermodal company that operates in Central Europe. The main vehicle parameters monitored during the tests were the temperature of cast iron brake blocks, the operating pressures of the brake system (brake pipe, brake cylinder, and continuous weighing valve), and the accelerations of the vehicle. The measures carried out have allowed to verify, in the first place, the effectiveness of the prototype developed.

2. Design specification

In the first part of the research, the types of faults that occur typically on these kinds of wagons were evaluated by studying the literature and the partner company fault database. This preliminary work allowed us to understand which subsystems are more subject to fault conditions than the others. The analysis of these subsystems (fig. 1) allowed us to choose the necessary sensors to actively monitor the selected components.

The analysis of the historical breakdowns has highlighted that the most frequently problems on this type of wagons occur to the brake system. The wheel and axlebox subsystems, thanks to the evenly distributed load of the wagons achieved by the company Ambrogio Trasporti S.p.A., have a lower failure rate. The design activity of the monitoring system, in accordance with the results obtained from the failure history, was targeted on the braking system. The problems that generally occur on this type of wagon, characterized by a uniformly distributed load, are the following:

- irregular wear of brake blocks;
- incorrect operating pressures of the braking system;
- brake cylinder failures;
- poor performance of control valves.



Fig. 1 - Sottosistemi del veicolo: diagramma e possibili guasti.

Fig. 1 - Vehicle subsystems: diagram and possible failures.

pesi sul carro effettuata dall'Ambrogio Trasporti S.p.A., presentano un basso tasso di guasto.

L'attività di progettazione del sistema di monitoraggio, in accordo con i risultati ottenuti dallo studio dello storico guasti, è stata focalizzata sul sistema frenante. I guasti che generalmente si verificano su questa tipologia di guasti, caratterizzata da carichi distribuiti, sono i seguenti:

- usura irregolare delle suole frenanti;
- errate pressioni operative del sistema frenante;
- guasti al cilindro freno;
- basse performance del distributore.

Questa tipologia di problemi può portare ad un surriscaldamento delle ruote e dei cuscinetti o a problemi di spiazzellamento ruote. Questi eventi possono avere importanti ripercussioni sulla sicurezza e sulla stabilità del vagone.

L'obiettivo principale di questo lavoro è stata la realizzazione di un sistema di monitoraggio compatto. Per il primo prototipo abbiamo adottato una soluzione di tipo cablato. Questo primo dispositivo potrà fungere da base per un futuro sistema di monitoraggio wireless.

Per raggiungere l'obiettivo abbiamo sviluppato un dispositivo composto da tre sottosistemi: i sensori per la misura dei parametri caratteristici del sistema frenante, un sistema di acquisizione per la gestione dei sensori e il salvataggio dei dati e una batteria per l'alimentazione.

2.1. Guasti e manutenzione

Partendo dall'analisi del percorso svolto dalla merce si è analizzata in quale fase ci potesse essere la maggiore criticità sulla qualità del servizio. Per un'azienda che opera nel settore della logistica puntualità e qualità del servizio sono sinonimi. La fase di trasporto su ferrovia è quella che comporta i problemi maggiori. Ciò è dovuto principalmente alla lunghezza della tratta ed alla minor presenza di punti di assistenza rispetto al trasporto stradale. In caso di guasto è possibile che il vagone venga scartato ed escluso dalla composizione del treno in luoghi non adeguati al trasferimento delle UTI (Unità di Trasporto Intermodale) e non facilmente accessibili. Inoltre è necessario gestire autonomamente le azioni correttive per ripristinare il vagone.

Il veicolo ferroviario è stato esploso fino al LRU (Linear Replacement Unit) creando quindi una struttura ad albero per evidenziare i singoli componenti soggetti a guasto. La prima suddivisione del veicolo avviene per componenti funzionali (Organi di Sicurezza) come definito in ambito italiano, il secondo livello è rappresentato dagli assiemi ed infine al terzo livello sono presenti i componenti LRU [17], fig. 2.

I componenti funzionali di un vagone sono:

- rodiggio;

These types of events can lead, in a short time, to the overheating of the wheelset and bearings and wheels-flat damage. These problems may have important consequences on the security and stability of the wagon.

The main goal of the work was the realization of a compact monitoring system. For the first prototype we adopted a cabled solution. This device could be the basis for a future wireless monitoring system. To meet this objective, we developed a cabled device composed of three subsystems: the sensors for measuring the characteristic parameters of the braking system, an acquisition system for managing the sensors and data saving, and a power supply battery.

2.1. Faults and maintenance

Starting from the analysis of the path carried out by the goods, we investigated in which phase of the service there can be the greater critical issues that impact on the quality of the service. For a company that operates in the logistical sector timeliness and service quality are synonymous. The phase of railway transport is the one that may causes the greatest problems. This fact is mainly due to the length of the track and the lower presence of service points if compared with the road transport.

In case of fault it is possible that the wagons can be discarded and excluded from the composition in places not suitable for the transfer of the UTI (Intermodal Transport Unit) and not easily accessible. It is necessary to manage independently the corrective activities in order to restore the wagon.

The railways vehicle was exploded until the LRU (Linear Replacement Units) creating a tree structure to highlight the single components subject to failure.

The first subdivision of the vehicle was carried out for the functional components (Safety devices) as define in the Italian regulation, the second level was represented by the assembly and finally in the third level were present the LRU components [17], (fig. 2).

The functional devices of a wagon are:

- running gear;
- bogie;
- buffers and chain coupler;
- braking system;
- chassis.

Each of these elements are periodically subjected to visual and functional inspections to constantly ensure the highest levels of security to the vehicle.

Analyzing the list of the maintenance operations performed in the last years it was possible to identify which were the components with the biggest fault rate and their impact on transportation.

The legislation describes all possible faults that may occur, and how and when the necessary corrective actions

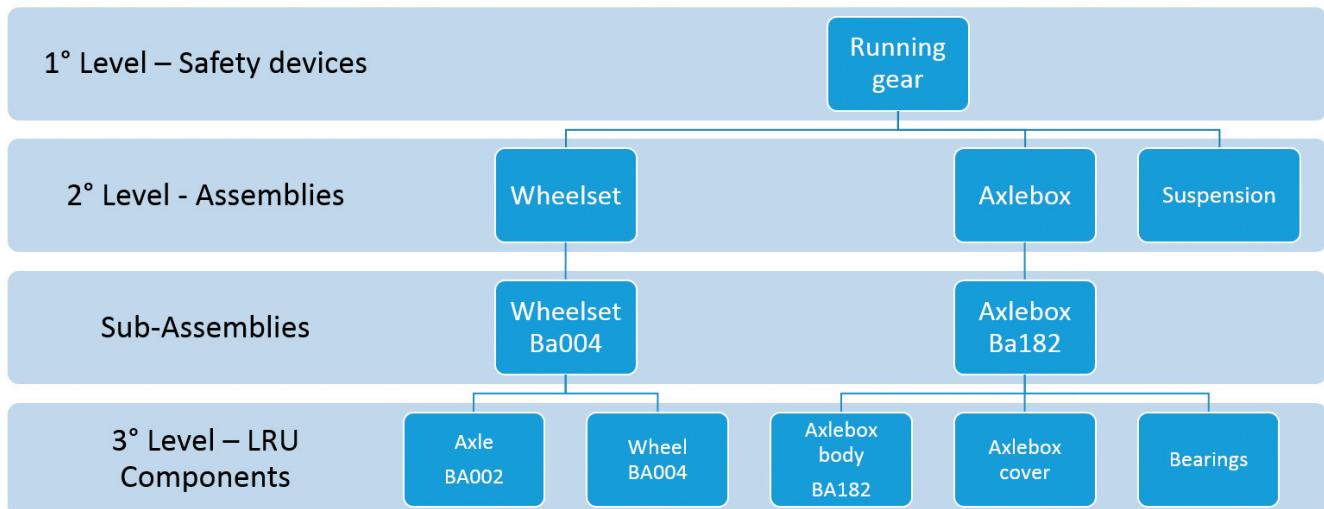


Fig. 2 - Analisi dei possibili guasti.

Fig. 2 - Analysis of the possible faults.

- carrello;
- organi di trazione e repulsione;
- sistema frenante;
- telaio.

Ognuno di questi elementi è soggetto periodicamente a ispezioni visive e funzionali in modo tale da garantire costantemente i più alti livelli di sicurezza del veicolo.

Analizzando lo storico degli interventi manutentivi si è svolta un'analisi di quali fossero i componenti maggiormente soggetti a guasto e qual è il loro impatto sul trasporto.

La normativa descrive tutti i possibili guasti che si possono verificare e di come e quando devono essere svolte le opportune azioni correttive, come mostrato in fig. 3. I componenti identificati durante l'analisi sono stati quelli oggetto di successivo monitoraggio.

A seguito dei cambiamenti normativi europei in ambito ferroviario tra i quali si citano:

- Reg UE 445/2011 Soggetti Responsabili della Manutenzione;
- Reg UE 402/2013 e ss.mm.ii. CSM Analisi dei Rischi;
- Reg UE 1236/2013 STI WAG;
- Decreto ANSF 4/2012.

Ogni modifica effettuata sul carro deve essere analizzata dal Soggetto Responsabile della Manutenzione (SRM/ECM) ECM ed in caso di rischio rilevante adottate opportune misure mitigative. Le attività devono essere svolte da personale abilitato secondo il decreto ANSF 04/2012.

Ambrogio Trasporti nel dicembre del 2014 ha ottenuto la certificazione come Soggetto Responsabile della manutenzione diventando ECM per i propri carri. Le possi-

can be carried out, as show in fig. 3. The components identified during this investigation are those that were object of monitoring.

Following the European regulatory changes in the railway sector among which we mention:

- EU Regulation 445/2011 Entities in charge of maintenance;
- EU Regulation 402/2013 and subsequent amendments CSM Risk Analysis;
- EU Regulation 1236/2013 STI WAG;
- Decree 4/2012 ANSF (Italian decree).

Any changes made on the wagon must be analyzed by the Entity in charge of Maintenance (SRM / ECM) ECM and in case of significant risk taken appropriate mitigate measures. The activities must be carried out by authorized personnel according to the decree 04/2012 ANSF.

In December 2014 Ambrogio Trasporti has been certified as entity in charge of maintenance, becoming ECM for his wagons. The possible solutions for the installation have been assessed in accordance with EU Regulation 402/2013 in order to ensure the operational safety.

Some solutions have been discarded while others have been evaluated in an iterative process until they have taken all the necessary changes needed to ensure security during the monitoring period.

2.2. Sensor and data acquisition

In this first version (battery powered), the developed monitoring system, whose scheme is shown in fig. 4, consists of the following parts:

- a data acquisition system based on a microcontroller ATmega2560;

bili soluzioni proposte per l'installazione sono state valutate in conformità al regolamento UE 402/2013 al fine di garantire la sicurezza di esercizio. Alcune soluzioni sono state scartate ed altre invece valutate in un processo iterativo fino a che sono state adottate tutte le necessarie modifiche in modo da garantire la sicurezza durante il periodo di monitoraggio.

2.2. Sensori e sistema di acquisizione dati

In questa prima versione (Alimentata a batteria), il sistema di monitoraggio, il cui schema è riportato in fig. 4, si compone delle seguenti parti:

- un sistema di acquisizione dati basato su un micro controllore ATmega2560;
- sensori di temperatura;
- sensori di pressione differenziali;
- accelerometro triassiale;
- modulo GPS con antenna esterna;
- memoria SD per il salvataggio dei dati.

In fig. 5 è riportato il sistema di monitoraggio installato sul carro merci. Tutte le componenti del dispositivo, ad esclusione del sensore di temperatura, sono collocate all'interno della scatola.

2.3. Sistema di acquisizione dati

Il sistema di acquisizione dati è basato su un micro controllore ATmega2560, sul quale sono stati implementati un software e un firmware sviluppati interamente dal nostro gruppo di ricerca. Le caratteristiche dell'Atmega 2560 sono riportate in tabella 1.

La decisione di utilizzare un micro controllore Atmega2560 è stata dettata dalle numerose potenzialità offerte da questo dispositivo, in particolare per la sua facile programmazione, l'alto numero di porte analogiche e digitali, e il basso consumo energetico se confrontato con la possibilità di acquisire ed elaborare dei dati. Le caratteristiche di questo micro controllore permettono un ulteriore e significativo sviluppo del software implementato avendo a disposizione una notevole quantità di memoria.

2.4. Sensori di temperatura

Questi sensori sono stati adottati per monitorare la temperatura delle

Component	Code no.	Irregularities/Criteria/Notes	Action to be taken	Category
Pneumatic part	3.3			
	3.3.1	Main brake pipe		
	3.3.1.1	Main brake pipe inoperative	Detach wagon	4
	3.3.1.2	- reserved -		
	3.3.2	Brake coupling		
	3.3.2.1	Damaged or missing (brake couplers must be available at all existing coupler connections on either end of a wagon)	Replace	3
	3.3.2.2	Unused brake coupler hanging loose (where two couplers are available, only one may be plugged in)	Secure, rectify as appropriate	3

Fig. 3 - Esempio di GCU (Contratto generale di uso dei vagoni) per vagoni.
Fig. 3 - Example of GCU (General Contract of Use for Wagons) for wagons.

- temperature sensors;
- differential pressure sensors;
- tri-axial accelerometer;
- GPS module with external antenna;
- SD memory for data saving.

In fig. 5 is shown the monitoring system installed on the freight car. All the parts of the prototype, except the temperature sensor, were housed inside the box.

2.3. Data acquisition system

The data acquisition system is based on a microcontroller ATmega2560, on which were embedded a software and a firmware developed entirely by our working group. The characteristics of the ATmega2560 are shown in table 1.

The decision to use the ATmega2560 microcontroller was dictated by the numerous potentialities offered by this device, particularly for its simple programming, the high number of digital and analogue ports, and the low power

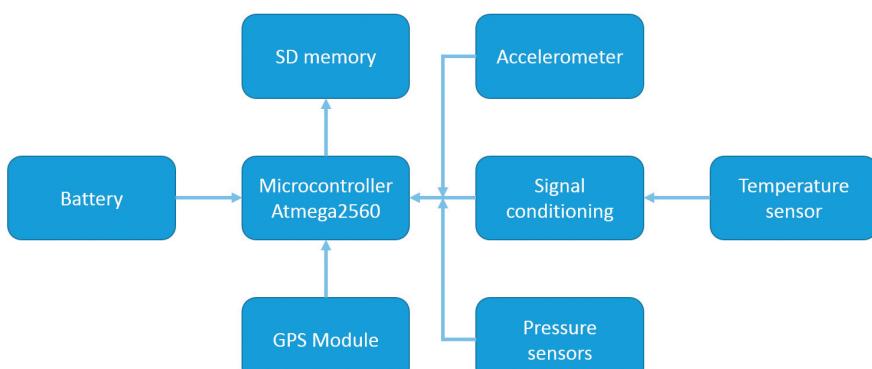


Fig. 4 - Schema del sistema di monitoraggio.
Fig. 4 - Diagram of the monitoring system.

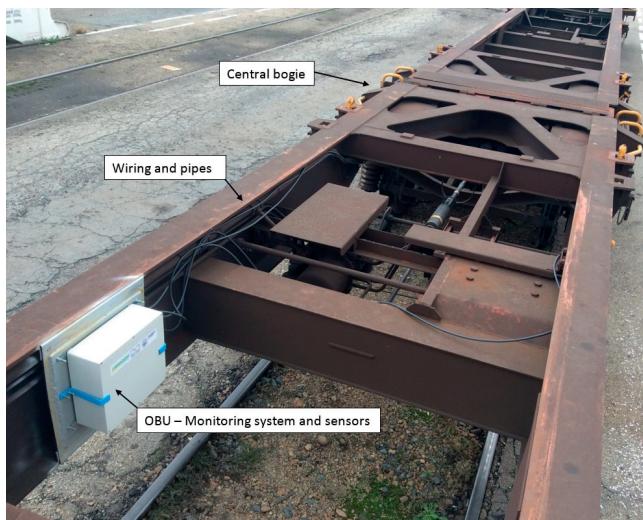


Fig. 5 - Il sistema di monitoraggio installato.

Fig. 5 - The monitoring system installed.

suole freno. Dopo un numero elevato di test in laboratorio, abbiamo deciso di adottare una termoresistenza del tipo Pt1000 con un intervallo di misura compreso tra i -50°C e i +500°C. Si è deciso di utilizzare un intervallo di misura così esteso in quanto in letteratura non sono riportati i valori massimi di temperatura che possono essere raggiunti dalle suole in ghisa in condizioni di forte dislivello e frenate frequenti. Nelle prime installazioni abbiamo adottato due sensori di temperatura, entrambi sul carrello centrale e sulla stessa sala (uno sul lato destro e uno sul lato sinistro), successivamente dopo aver verificato che le temperature raggiunte fossero le stesse su entrambi i lati abbiamo adottato un solo sensore. Sono comunque presenti in letteratura [8] studi che riportano i trend e i picchi di temperatura delle suole freno durante prove a banco o su circuiti di prova.

Il fissaggio dei sensori di temperatura non è stato effettuato in modo meccanico, forando e filettando la suola freno di ghisa, ma mediante incollaggio in modo tale da non apportare alcuna modifica al componente dell'impianto frenante. La colla, scelta per la sua elevata conducibilità termica, è in grado di assicurare un solido fissaggio anche alle alte temperature raggiunte dai freni in condizioni di frenata.

2.5. Sensori di pressione

Per quanto concerne il monitoraggio delle pressioni del sistema frenante, abbiamo utilizzato dei sensori di pressione differenziali con un intervallo di misura da 0 bar a 7 bar, con una risoluzione di 7 mbar, in linea con i valori operativi tipici dei vari componenti [18] [19]. Le pressioni del sistema frenante sono state otte-

consumption compared to the possibility of acquiring and processing data. The characteristics of the processor enable a further significant development of the acquisition software having still available a considerable amount of memory.

2.4. Temperature sensor

These sensors were adopted for monitoring the temperature of the brake blocks. After a high number of laboratory test, we decided to adopt a type of Pt1000 resistance thermometer with a measuring range between -50°C and +500°C. This extreme measuring range was adopted because in the literature there are no reports, to our knowledge, the maximum temperature values that can be reached by the cast iron brake blocks in normal operating conditions on a track with a high gradient slope and so frequent braking. In the firsts installations we adopted two temperature sensors, both on the central bogie and on the same wheelset (one on the right side and one on the left side), later we decided to adopt only a single sensor after having verified that the temperature was the same on both brake blocks. They are still present in literature studies [8] that show the trend and the temperature peaks of brake blocks during test bench or test on circuits.

The fastening of the temperature sensor has not occurred in a mechanical way, by drilling and threading the cast iron brake block, but through bonding to avoid any modification to the component of the braking system. The glue, chosen for its high thermal conductivity, was able to ensure a solid fastening even at high temperatures of the brake blocks during braking.

2.5. Pressure sensors

As regards the monitoring of the pressures of the braking system, we used three differential pressure sensors with a measuring range from 0 to 7 bar, with a resolution of 7 mbar, in accordance with the typical operating pressures of the various components [18] [19].

The system pressures were obtained by connecting the sensors in the same attachment points used during the periodical brake tests. It was possible to monitor the pressure of the brake pipe, the brake cylinder, and the weighing valve of the central bogie. The pressure values of the weighing

TABELLA 1 – TABLE 1

Caratteristiche ATmega2560
ATmega2560 characteristics

Processor	Memory			I/O	
	Flash (kb)	EEPROM (kb)	SRAM (kb)	Digital I/O pins	Analogue I pins
ATmega2560	256	4	8	54	14

nute collegando i sensori alle stesse prese diagnostiche utilizzate durante le periodiche prove freno. È stato così possibile monitorare la pressione della condotta generale, del cilindro freno e della valvola pesatrice del carrello centrale. La pressione della valvola pesatrice è essenziale per stimare correttamente la massa del carico trasportato.

I sensori di pressione, dopo essere stati calibrati in laboratorio, sono stati testati presso l'officina manutentiva collegandoli all'impianto frenante del carro. Attraverso il macchinario utilizzato per la prova freno è stato possibile fornire valori noti di pressione all'impianto frenante. Successivamente questi dati sono stati comparati con quelli rilevati dal dispositivo di monitoraggio. La media degli errori relativi delle diverse misurazioni è stata del 3.2%.

2.6. Accelerometro

Per monitorare la dinamica del vagone abbiamo installato, all'interno della scatola che ospita il sistema di monitoraggio, un accelerometro triassiale con un intervallo di misura di $\pm 16\text{ g}$. In particolar modo ci siamo concentrati sull'accelerazione longitudinale, caratterizzando le operazioni di frenatura, e di accelerazione verticale. I valori di accelerazione, oltre a fornire delle informazioni importanti sull'interazione del vagone con il tracciato ferroviario, rappresentano una base eccellente per il corretto dimensionamento di un dispositivo di energy harvester [13] capace di soddisfare i consumi energetici del sistema.

2.7. GPS module

Gli errori relativi alla posizione del treno, ottenuta attraverso il GPS, è estremamente importante perché permette di conoscere la posizione geografica e la velocità del treno e di correlare i parametri misurati con il tracciato del treno.

L'informazione GPS permette inoltre di calcolare la distanza percorsa dal treno durante l'intero periodo di monitoraggio. Quest'informazione è estremamente importante per le operazioni di manutenzione del treno ed è un dato essenziale per valutare l'affidabilità del sistema di monitoraggio. Il segnale GPS viene campionato con una frequenza di 1 Hz. Nelle porzioni di tracciato in cui il segnale GPS è assente, per esempio, nelle gallerie, il sistema di acquisizione dei dati continua a campionare ogni parametro con la propria frequenza di campionamento.

La tabella 2 riporta le caratteristiche essenziali del GPS selezionato per questo primo prototipo.

La tabella 3 mostra le frequenze di campionamento adottate per popolare il database necessario per sviluppare algoritmi di monitoraggio e diagnostica.

2.8. Vagone monitorato

Il vagone sul quale è stato installato il dispositivo di monitoraggio sviluppato è un carro intermodale, tipo

valve were essential to correctly estimate the mass of the load transported.

The pressure sensors, after having been calibrated in the laboratory, were tested in the maintenance workshop connecting them to the braking system. With the brake tester equipment, we supplied known values of pressure to the braking system. Then this data were compared with those provided by the monitoring system. The mean of the relative errors of the various measurements was 3.2%.

2.6. Accelerometer

To monitor the dynamics of the wagon we installed, inside the box in which was housed the monitoring system, a tri-axial accelerometer with a measurement range of $\pm 16\text{ g}$. In particular, we studied the longitudinal acceleration, characterizing the braking operations, and the vertical acceleration. The vertical acceleration values, in addition to providing an important information on the interaction of the wagon with the railway track, represent an excellent basis for the correct design of an energy harvester device [13] able to satisfy the energy consumption of the system.

2.7. GPS module

The information related to the position of the train, detected by the GPS, is extremely important because it allows to know the position and speed of the train and to correlate the parameters measured with the track of the train.

The GPS information also allows to calculate the distance traveled by the train during the entire monitoring period. This information represents an important data for the maintenance of the train and an essential data for the reliability related to the monitoring system. The GPS signal is sampled with a frequency of 1 Hz. In the path's section where the GPS signal cannot be fixed, for example, in gallery, the data acquisition system continues to sample each parameter with own sampling frequency.

Table 2 reports the essential characteristics of the GPS module selected for this first prototype.

TABELLA 2 – TABLE 2

Caratteristiche GPS
GPS characteristics

GPS characteristics	
Horizontal position accuracy	2.5 m
Maximum navigation update rate	1 Hz
Velocity accuracy	0.1 m/s

Table 3 shows the sampling frequencies adopted to populate the database necessary for the development of diagnostic and monitoring algorithms.

“Sggmrs”, un carro di tipo speciale utilizzato per il trasporto di container e di casse mobili (UTI: Unità di trasporto intermodale). Questo vagone con sei assi è equipaggiato con dispositivi di fissaggio ripiegabili, con coni di fissaggio in accordo con il regolamento UIC 571-4. Il caricamento del vagone è effettuato con delle apposite gru per il sollevamento con la quale viene posizionata l’UTI sui coni dei vagoni. In fig. 6 è riportato un esempio del modello di carro monitorato.

In questa fase della ricerca si è deciso di sensorizzare unicamente il carrello centrale che risulta essere quello maggiormente stressato durante le operazioni di frenatura.

L’installazione del dispositivo di monitoraggio è avvenuta a seguito di una completa revisione del carro in modo tale che i dati registrati durante le corse monitorate non fossero influenzati in alcun modo da guasti o malfunzionamenti. Le informazioni così ottenute hanno permesso di stabilire quali sono i livelli di temperatura, pressione e accelerazione che caratterizzano il funzionamento di questa tipologia di carri in condizioni di funzionamento ottimali.

Una particolarità di questo articolo è rappresentata dalle lunghe e continue misurazioni delle temperature delle suole su percorso reale e in condizioni difficili. Particolare attenzione è stata prestata alla preparazione delle suole. Prima di procedere con l’installazione a bordo carro sono stati condotti numerosi test al banco confrontando il valore di temperatura rilevato dal sistema di monitoraggio con quello misurato grazie ad un termometro ad infrarossi in modo tale da verificarne l’accuratezza. Si sono inoltre testati numerosi collanti per individuare quello che offriva le migliori prestazioni alle alte temperature.

Le prime installazioni prevedevano il semplice incollaggio del sensore alla suola in prossimità dell’attacco per fissarla al porta ceppi. Questa soluzione è stata però abbandonata per via della non esaustiva durata del sensore che a causa delle sollecitazioni meccaniche e termiche.

Successivamente si è optato per la pratica di una sede, fig. 7, in cui annegare il sensore di temperatura rendendolo così maggiormente resistente alle sollecitazioni. La sede praticata ha una profondità di circa 2 mm, una lunghezza di 20 mm e una larghezza di circa 4 mm.

Si è inoltre reso necessario fissare opportunamente il cablaggio del sensore al porta ceppi in modo tale che il peso dei cavi di connessione non gravasse sul sensore.

La sensorizzazione della suola è stata effettuata presso i nostri laboratori, infatti è stato necessario effettuare

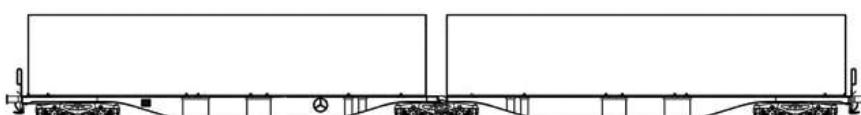


Fig. 6 - Vagone ferroviario intermodale Sggmrs 90.
Fig. 6 - Intermodal freight wagon Sggmrs 90.

TABELLA 3 – TABLE 3

Frequenze di campionamento adottate
Frequencies adopted

Sensor	Sampling frequency (Hz)	Saving frequency (Hz)
Temperature	1	1
Pressure	200	1
Acceleration	200	1
GPS	1	1

2.8. Monitored wagon

The wagon on which the developed monitoring device was installed is an intermodal wagon, type “Sggmrs”, which is a special type of wagon used for container transport. This wagon, with six axles and three bogies, is equipped with folding fastening devices having the cone of the fixing devices according to UIC 571-4 regulation. The loading of wagon is achieved directly on the platform with specific lifting installations, with UTI being placed on the cones of the wagon. Fig. 6 shows an example of the monitored wagon.

At this stage of the research only the central bogie was sensorized because, being the most heavily loaded, it is the most stressed during braking operations. The installation of the monitoring device was made following a complete inspection of the wagon in such a way that the data recorded during the monitored installation are not influenced in any way by faults or malfunctioning. The information thus obtained made it possible to establish what levels of temperature, pressure, and acceleration characterize the operation of this type of wagon in optimum conditions.

A particular novelty of this paper is the continuous long-term measurement, in harsh conditions, of brake block temperature along a real track. Therefore, particular attention was given to the sensorization of the brake pads. Before proceeding with the installation on board of the wagon, several bench tests were conducted comparing the value of the temperature detected by the monitoring system to the one measured with an infrared thermometer in order to verify its accuracy.

Numerous adhesives were tested to find the one that offer the best performance at high temperatures.

During the first installation the temperature sensors were simply glued to the brake blocks near to the attack point for the brake hanger. This solution, however, was abandoned because it did not guarantee an exhaustive lifetime for the sensors due to the mechanical and thermal stresses.

Subsequently, it was decided to perform a seating, fig. 7, in which the temperature sensor was drowned, thereby making it more resistant to



Fig. 7 - Sensorizzazione suola freno.
Fig. 7 - Brake block sensorization.

l'alloggiamento per il sensore, installarlo e applicargli i collanti necessari. Inoltre ad ogni passaggio della lavorazione è stato necessario verificare la corretta funzionalità della termoresistenza per garantirne il successivo funzionamento.

stress. The seating used had a depth of about 2 mm, a length of 20 mm, and a width of about 4 mm. The wiring of the sensor was also adequately fixed to the brake hanger so that the weight of the connecting cables did not burden on the sensor.

The sensorization of the brake block is carried out in our laboratories. It was necessary to make the seating for the sensor, install it, and apply the necessary glue. Furthermore, at each step, it was necessary to verify the correct functionality of the sensor to ensure the subsequent operation.

2.9. Acceleration Monitoring

The tri-axial accelerometer mounted inside the box installed on the freight wagon chassis allowed us to monitor the vertical and longitudinal acceleration of the wagon.

During the activation of the brake it is possible to synchronize the measurement of the brake cylinder pressure variation with the longitudinal deceleration and with the increase of temperature of the brake blocks.

Figs 8, 9 and 10 show the trend of the longitudinal acceleration of the wagon in relation to the brake cylinder pressure. As can be seen, the RMS values of the longitudinal deceleration present the same trend of the pressure in

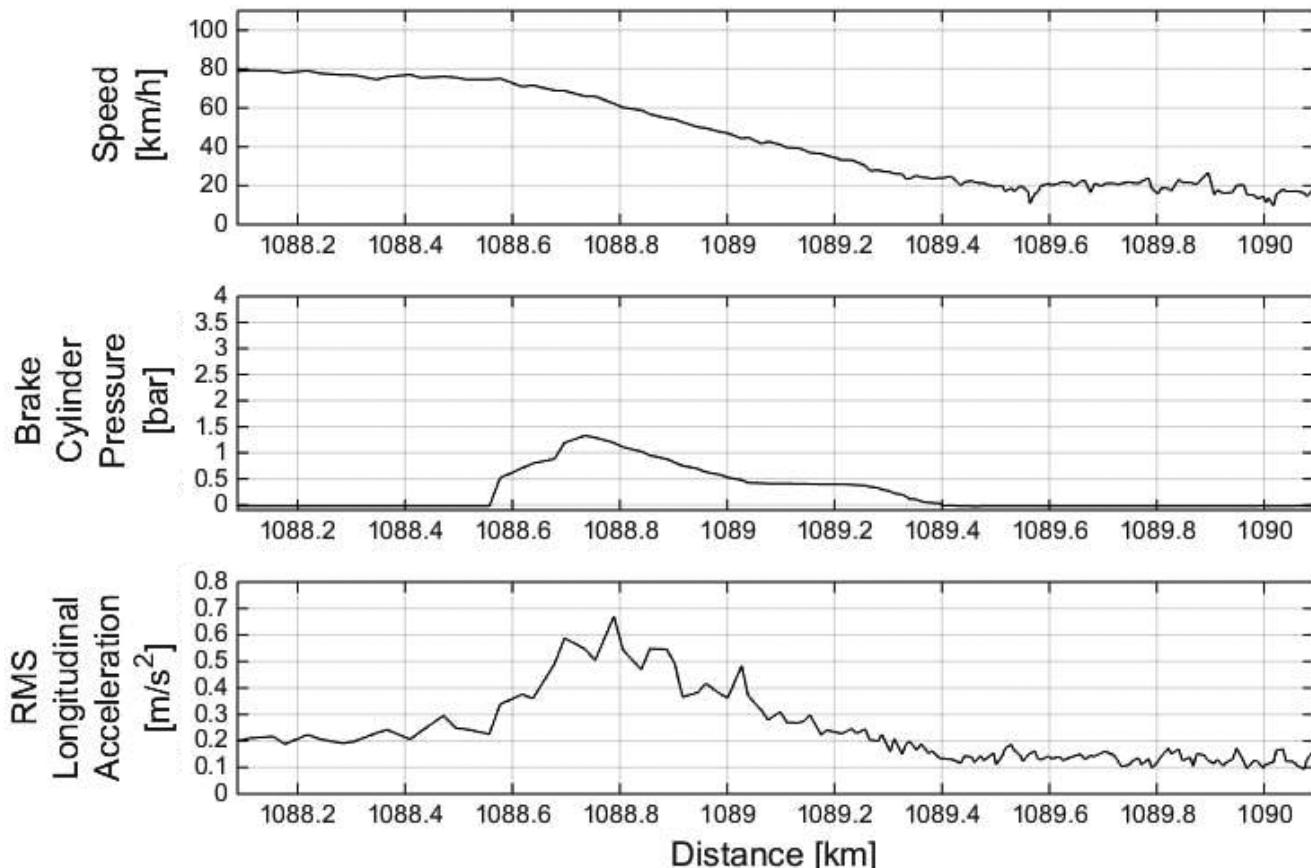


Fig. 8 - Caso 1 – Trend RMS decelerazione longitudinale durante la frenata.
Fig. 8 - Case 1 – Longitudinal RMS trend during braking.

2.9. Acceleration Monitoring

L'accelerometro installato all'interno della scatola fissata al telaio del carro merci ha permesso di monitorarne le accelerazioni verticali e longitudinali del vagone.

Durante l'attivazione del cilindro freno è possibile sincronizzare la misurazione della variazione di pressione del cilindro freno con la decelerazione longitudinale e con l'incremento della temperatura delle suole freno.

Le figg. 8, 9 e 10 mostrano i trend della accelerazione longitudinale del vagone in relazione alla pressione del cilindro freno. Come si può osservare il valore RMS della decelerazione longitudinale presenta lo stesso andamento della pressione nel cilindro freno. L'analisi dei dati che verrà effettuata nei prossimi mesi sarà focalizzata sullo studio della relazione tra queste due grandezze, decelerazione longitudinale e pressione del cilindro freno.

3. Modello termico

Per lo studio delle prestazioni termiche del sensore può essere applicato un semplice modello termico semplificato. Infatti è possibile affermare che durante l'ope-

the brake cylinder. The future data analysis will focus on the study of the relationship between the longitudinal deceleration and the pressure level in the brake cylinder.

3. Thermal model

To study the thermal performance of the brake blocks sensorized, a simple energetic simplified approach can be applied. In fact, it can be stated that, during braking, the kinetic and potential energies of the wagon are transformed into thermal energy according to the principle of energy conservation.

During braking operations, the change in kinetic energy (1) between the instants of beginning and end braking is equal to

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} m (v_2^2 - v_1^2) \quad (1)$$

where m is the sum of the mass wagon and the mass transported and $(v_2^2 - v_1^2)$ is the difference of the square of the speed change due to the braking. The change in potential energy (2) it is equal to

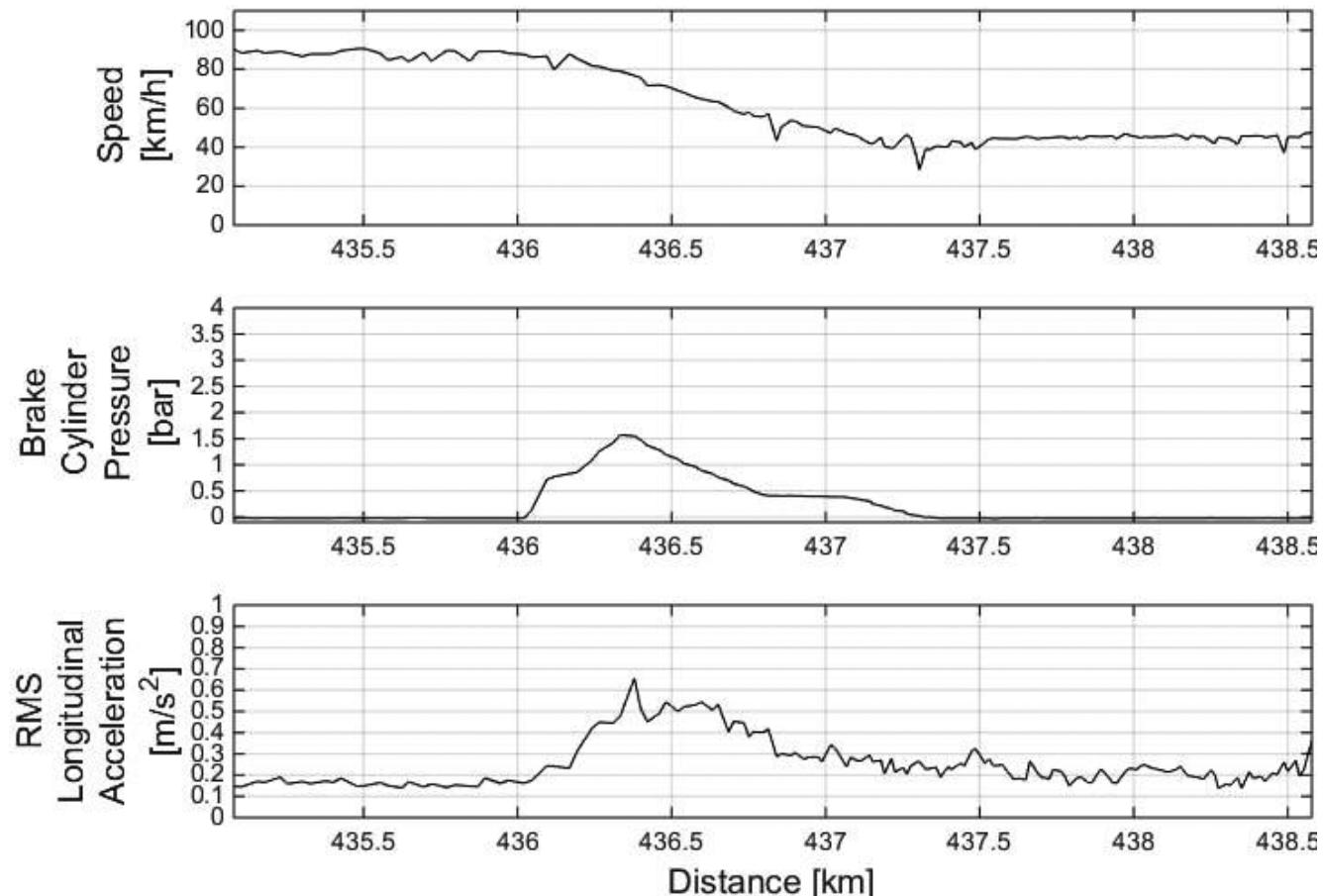


Fig. 9 - Caso 2 – Trend RMS decelerazione longitudinale durante la frenata.

Fig. 9 - Case 2 – Longitudinal RMS trend during braking.

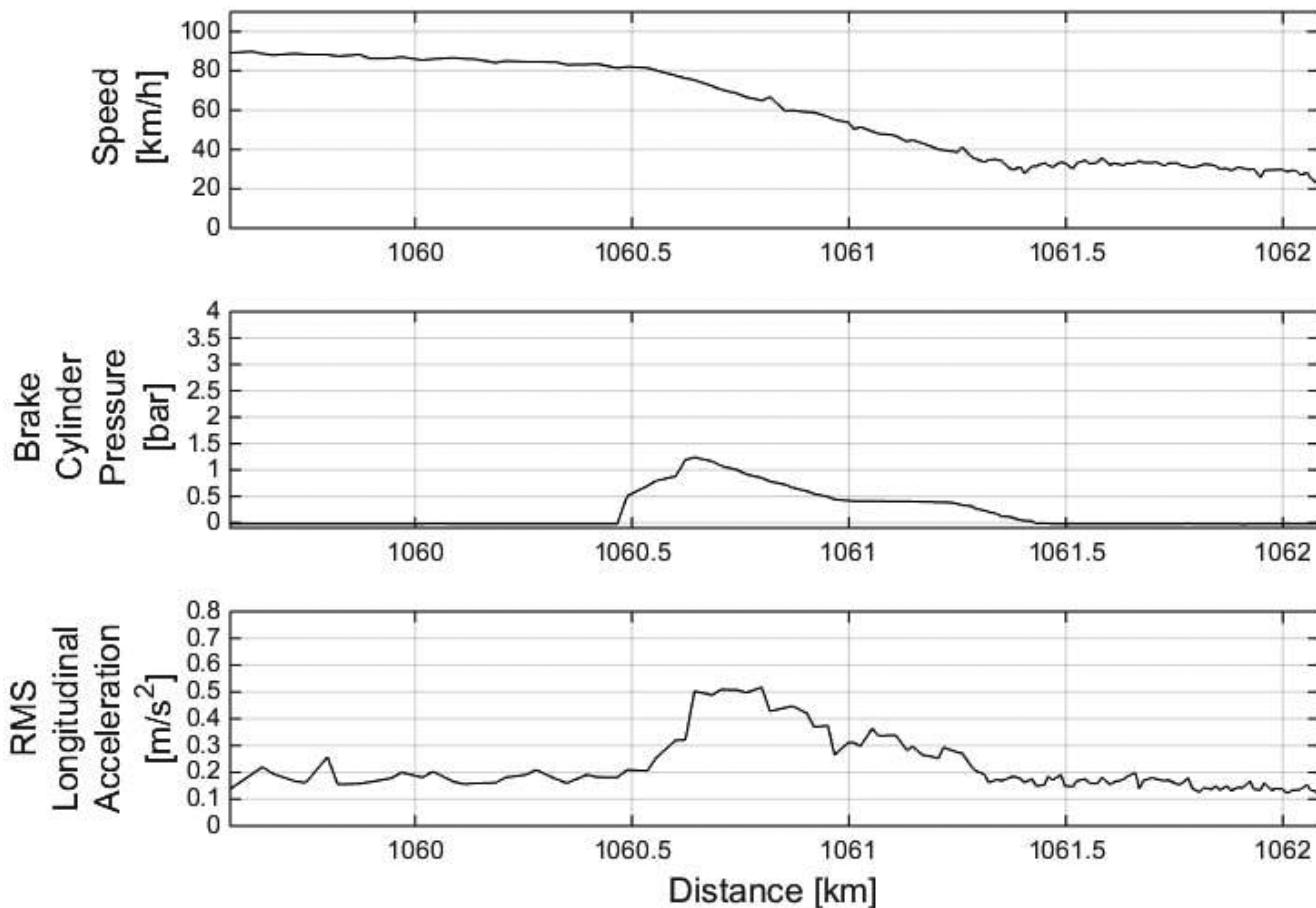


Fig. 10 - Caso 3 – Trend RMS decelerazione longitudinale durante la frenata.

Fig. 10 - Case 3 – Longitudinal RMS trend during braking.

razione di frenatura, l'energia cinetica e potenziale del vagone sono trasformate in energia termica in accordo con il principio di conservazione dell'energia.

Durante la frenata, la variazione di energia cinetica (1) tra l'istante iniziale e finale della frenata è pari a:

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} m (v_2^2 - v_1^2) \quad (1)$$

dove m è la somma della massa del vagone e del carico trasportato e $(v_2^2 - v_1^2)$ è la differenza dei quadrati delle velocità dovuto alle frenate.

La variazione di energia potenziale(2) è uguale a

$$\Delta E_p = m g \Delta h \quad (2)$$

dove Δh è la possibile variazione di quota altimetrica durante la frenata del vagone. Il parametro di altitudine è stato ottenuto durante il processo di elaborazione offline dei dati partendo dalla posizione GPS utilizzando un software online capace di fornire queste informazioni. La precisione della quota altimetrica è legata alla precisione con la quale è stata rilevata la posizione del vagone lungo la linea ferroviaria.

$$\Delta E_p = m g \Delta h \quad (2)$$

where Δh is the possible change in altitude during the braking of the wagon. The altitude parameter was obtained from the GPS position using an online software able to add this information during the processing of the data. The accuracy of the elevation is linked to the accuracy of the position of the wagon along the railway network.

The mass of the wagon and the load was assumed equal to 97.3 tons.

The heat partition coefficient (3) between the wheel and the cast iron brake blocks [12] is calculated with the following equation:

$$\alpha = \frac{\beta_r S_r}{\beta_r S_r + \beta_s S_s} \quad (3)$$

where β is the thermal effusivity and S is the relative contact surface between the bodies. The subscript r indicates the characteristic related to the wheel, whereas the subscript s indicates the characteristic relative to the cast iron block. The thermal effusivity (4) is calculated as

La somma del vagone carico è stata assunta pari a 97.3 tonnellate.

Il coefficiente di ripartizione del calore (3) tra la ruota e la suola freno in ghisa è calcolata [12] con la seguente equazione:

$$\alpha = \frac{\beta_r S_r}{\beta_r S_r + \beta_s S_s} \quad (3)$$

dove β è l'effusività termica e S è la superficie di contatto relativo tra i due corpi. Il pedice r è utilizzato per le caratteristiche legate alla ruota, mentre il pedice s indica le caratteristiche legate alla suola freno in ghisa. L'effusività termica (4) è calcolata come

$$\beta = \sqrt{k \rho c} \quad (4)$$

dove k è la conducibilità termica, ρ è la densità, e c è la capacità termica del corpo sotto esame. L'energia totale termica (5) generata durante la frenata è calcolata con la seguente espressione:

$$E_{tt} = \Delta E_c + \Delta E_p \quad (5)$$

La frazione dell'energia totale termica che fluisce nelle suole freno (6) è pari a:

$$E_{ts} = (1 - \alpha)E_{tt} \quad (6)$$

Si è assunta come ipotesi semplificativa che l'energia totale termica fluisca in modo uniforme in tutte le suole freno del vagone. È quindi necessario, per l'analisi della singola suola frenante, dividere il valore di energia trovato per il numero totale di suole installate sui 6 assi. Il numero totale di suole è uguale a 48.

Utilizzando la capacità termica del corpo, l'aumento di temperatura ΔT (7) che interessa la singola suola dopo la frenata può essere calcolata con la seguente espressione:

$$\Delta T = \frac{E_{ts}/48}{m_s c_s} \quad (7)$$

Nell'equazione (7) m_s è la massa della suola frenante pari a 7.5 kg e c_s è la capacità termica.

4. Risultati

4.1. Linea ferroviaria monitorata

La linea ferroviaria percorsa dai carri merce dell'Ambrogio Trasporti collega il terminal di Torino (IT) con quello di Mouguerre (FR), per una lunghezza complessiva prossima ai 1400 chilometri, come visibile in fig. 11.

Il consumo delle suole freno risulta nettamente superiore sulla tratta monitorata se confrontato con quello registrato sulle linee ferroviarie che collegano i terminal

$$\beta = \sqrt{k \rho c} \quad (4)$$

where k is the thermal conductivity, ρ is the density, and c is the thermal capacity of the body under examination. The total thermal energy (5) generated during braking was calculated by the following expression:

$$E_{tt} = \Delta E_c + \Delta E_p \quad (5)$$

The fraction of total heat energy flowing into the brake blocks (6) was equal to

$$E_{ts} = (1 - \alpha)E_{tt} \quad (6)$$

A uniform distribution of the total heat energy was assumed, as a simplification, on all the brake blocks of the wagon. Then, for the analysis of the single block, it was necessary to divide by the total number of brake blocks installed on the six axes. The total number of brake blocks is equal to 48.

Using the thermal capacity of the body, the increase of temperature ΔT (7) recorded on the single brake block after braking can be calculated with the following expression:

$$\Delta T = \frac{E_{ts}/48}{m_s c_s} \quad (7)$$

In equation (7), m_s is the mass of the brake shoes, which was equal to 7.5 kg, and c_s is the thermal capacity.

4. Results

4.1. Monitored railway line

The railway line traveled by the freight wagon of the company Ambrogio Trasporti S.p.a., which connects the terminal of Turin (IT) to the one in Mouguerre (FR), for a total length close to 1400 km, is shown in fig. 11.

The consumption of the brake blocks is considerably higher on the route monitored compared to the one observed on the railway lines connecting the terminals of Ambrogio Trasporti S.p.a. located in the north of Europe.

On the route connecting the Italian terminal with the French one, the railway wagons must cover the demand of the route between Bardonecchia (IT) and Chambéry (FR). This stretch is considered for the braking system one of the toughest in the world due to the altitude profile of the route that reaches gradients of 30% on the French and Italian sides. The altitude profile of the route monitored is the main cause of the high consumption of the brake blocks.

Along the same lines, it is also possible to monitor the long sector of the track in plains. This is the ideal situation for the study of the braking operation.

Between September 2015 and February 2016, the developed monitoring system covered 10 outward and return

dell'Ambrogio Trasporti con le località del Nord Europa.

Nel percorso che collega il terminal italiano con quello francese i carri ferroviari devono affrontare l'imponente tratta alpina compresa tra Bardonecchia (IT) e Chambéry (FR). Questo tratto è considerato per l'impianto frenate uno dei più duri al mondo a causa del profilo altimetrico del percorso che raggiunge pendenze del 30% sia sul lato francese che su quello italiano. L'altimetria del percorso monitorato è quindi la causa principale dell'elevato consumo delle suole freno. Lungo la stessa linea ferroviaria è inoltre possibile monitorare un lungo tratto pianeggiante. Questa è la condizione ideale per lo studio delle operazioni di frenatura.

Nel periodo compreso tra settembre 2015 e febbraio 2016 il sistema di monitoraggio sviluppato ha percorso 10 viaggi di andata e di ritorno sulla linea presentata nel paragrafo precedente, monitorando all'incirca 25000 chilometri di tracciato. Grazie alle sue caratteristiche di modularità tra un'installazione e la successiva è stato possibile effettuare delle modifiche sia software che hardware permettendoci così di trovare la miglior configurazione per i sensori installati. In particolar modo è stato necessario provare differenti soluzioni per il fissaggio dei sensori di temperatura al fine di ottenere un segnale continuo sia nel viaggio di andata che in quello di ritorno.

L'elaborazione dei dati raccolti ha permesso di ottenere due differenti tipi di informazioni: logistiche e di funzionamento generale del carro. Le informazioni logistiche, ottenute grazie alla presenza del modulo GPS, includono i chilometri percorsi, il tempo di viaggio, la velocità commerciale e la velocità media calcolata sull'intera tratta.

I chilometri percorsi sono risultati identici in tutti i viaggi effettuati mentre i restanti parametri logistici sono cambiati in funzione dello stato della linea.

Le informazioni sul funzionamento del carro merci intermodale invece includono il numero di frenate, i chilometri percorsi con il freno attivato, i trend di pressione, temperatura e accelerazione nelle diverse condizioni di funzionamento del carro, in particolar modo durante le frenate. Abbiamo inoltre monitorato la tenuta dei componenti pneumatici durante le soste del carro lungo il tracciato.

Per il conteggio del numero di frenate è stato sviluppato un algoritmo in grado di riconoscere il cambiamento di pressione all'interno del cilindro freno. Nel periodo temporale di attivazione del freno è possibile effettuare ulteriori analisi per caratterizzare la singola frenata con-

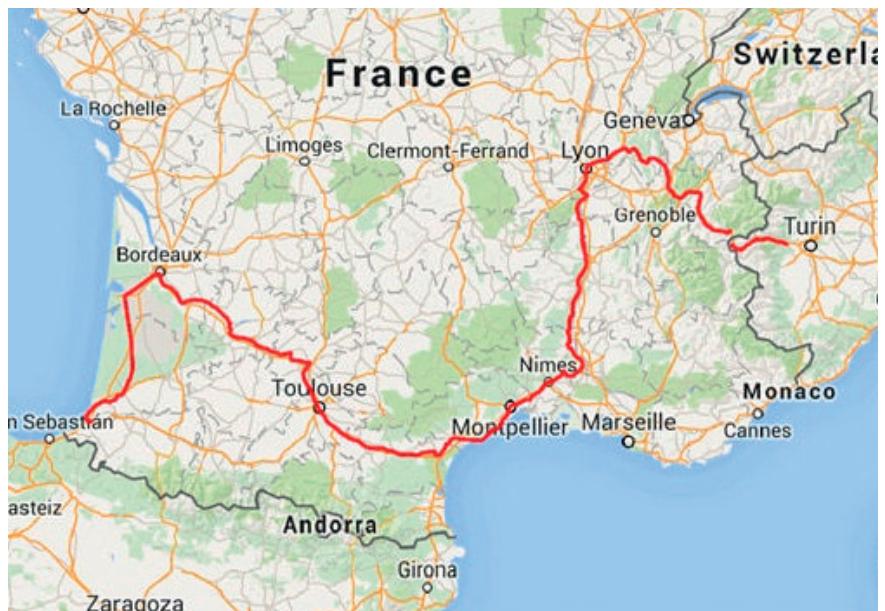


Fig. 11 - Linea ferroviaria monitorata.
Fig. 11 - Monitored route.

journeys on the line presented previously, monitoring approximately 25,000 km of railway track. Thanks to its modularity between an installation and the following, it was possible to make changes in both software and hardware, allowing us to find the best configuration for the installed sensors. In particular, it was necessary to try different solutions for the fixing of the temperature sensors in order to obtain a continuous signal on the outward and return journeys.

The processing of the collected data has allowed us to obtain two different types of information: logistical and general operation of the wagon.

Logistical information, obtained thanks to the GPS module, includes the kilometers covered, the travel time, the commercial speed, and the average speed calculated on the whole track.

The kilometers traveled were identical in all the monitored trips, whereas the remaining logistical parameters changed depending on the line status.

Information on the operation of intermodal freight car instead include the number of stops, mileage with brake activated, pressure trend, temperature trend, and acceleration in the different running conditions of the wagon, particularly during braking. We also monitored the seal of the pneumatic components during the stops along the route.

For counting the number of brakes, we developed an algorithm able to recognize the change of pressure inside the brake cylinder. In the time period of the brake activation, it is possible to carry out further analysis to characterize the single braking concentrating in particular in the longitudinal acceleration and the increase of temperature of the

centrandosi in particolar modo sull'accelerazione longitudinale e sull'aumento di temperatura delle suole freno.

L'informazione GPS ci ha permesso di definire il contesto di attivazione del cilindro freno, distinguendo così le frenate dovute all'approssimarsi di una stazione da quelle necessarie a controllare la velocità del treno all'approssimarsi di una curva.

4.2. Informazioni logistiche

Le tabelle 4 e 5 riassumono alcune informazioni logistiche e di funzionamento generale per i viaggi di andata e ritorno di tre differenti installazioni. Nei tre casi presentati è stata utilizzata la stessa on-board unit, operante nella stessa stagione ma in mesi differenti. Questi parametri sono fortemente influenzati dallo stato della linea. Risultano inoltre essere influenzati dai giorni della settimana in cui il convoglio viaggia.

Come è possibile osservare nelle diverse tabelle, esiste una differenza molto marcata tra le velocità media e la

brake blocks. The developed calculation algorithm allows to monitor the characteristics of the brake parameters such as the maximum pressure reached in the cylinder or the initial speed of the train so that we can have a clearer overview of the performed braking.

The GPS information has allowed us to define the brake cylinder activation context and to distinguish the braking caused by the approach to a station from those needed to control train speed when approaching a curve.

4.2. Logistical information

Tables 4 and 5 summarize some logistical and overall behavior information for the outward and return journeys of three installations. The three cases had the same type of on-board unit hardware and operate in the same season but in different months. These parameters are strongly influenced by the state of the line. They are also influenced by specific days of the week in which the wagon was travelling. It can be observed that there is a significant difference

TABELLA 4 – TABLE 4

Informazioni logistiche viaggio di andata
Logistical Information Outward Journeys

Case A Line Torino (IT) Mouguerre (FR)		Journey 1	Journey 2	Journey 3	Mean	Standard deviation
	Length (km)	1394	1394	1394	1394	N.A.
	Kilometers monitored	1394	1394	1394	1394	N.A.
	Time for terminal to terminal (h)	28,3	29,0	27,1	28,1	1,0
	Effective time of travel (h)	18,6	19,5	18	18,7	0,8
	Commercial speed (km/h)	48,3	47,3	50,6	48,7	1,7
	Average speed (km/h)	73	70,4	71,7	71,7	1,3
	Average pressure weighing valve (bar)	3,9	3,5	3,7	3,7	0,2
	Number of brake activation	136	176	149	153	20
	Distance covered with brake active (km)	87	91	82	87	4,5

TABELLA 5 – TABLE 5

Informazioni logistiche viaggio di ritorno
Logistical Information Return Journeys

Case B Line Mouguerre (FR) Torino (IT)	Journey 1	Journey 2	Journey 3	Mean	Standard deviation	
	Length (km)	1394	1394	1394	1394	N.A.
	Kilometers monitored	1394	1394	1394	1394	N.A.
	Time for terminal to terminal (h)	87,4	42,6	40,6	56,9	26,5
	Effective time of travel (h)	20,7	19,4	19	19,7	0,9
	Commercial speed (km/h)	15,6	32,3	34,33	27,4	10,3
	Average speed (km/h)	64,9	70	73,3	69,4	4,2
	Average pressure weighing valve (bar)	3,6	3,8	3,7	3,7	0,1
	Number of brake activation	121	98	109	109	11
	Distance covered with brake active (km)	113	64	89	89	24,6

velocità commerciale del convoglio, ovvero la distanza tra la partenza e la destinazione del treno diviso il tempo totale di viaggio, includendo gli stop intermedi, dovuti al cambio di impresa ferroviaria ogni qualvolta il convoglio ferroviario supera i confini nazionali.

Il numero di frenate e i chilometri percorsi dal carro con i freni attivati sono ulteriori parametri fortemente influenzati dalla guida del macchinista.

Come riportato nelle tabelle 4 e 5, è possibile osservare l'estrema similarità dei dati monitorati durante i tre viaggi di andata e ritorno, in particolare nel numero di frenate e sulla loro durata. Questo fatto sottolinea l'estrema ripetibilità delle misurazioni effettuate.

4.3. Temperatura delle suole freno

Le figure 12, 13, 14 e 15 riassumono i parametri di altitudine, velocità, pressione del cilindro freno e temperatura suole per i due viaggi maggiormente significativi comprensivi di andata e ritorno.

I grafici nelle figure mostrano i dati relativi a 5600 dei 25000 km monitorati. Per monitorare una distanza e un periodo di tempo così esteso è necessario dimensionare correttamente il pacco batterie di alimentazione in modo tale da assicurare il monitoraggio dell'intero viaggio, sfruttando così la rara possibilità offerta da questo progetto di ricerca e dell'azienda di mettere a disposizione un suo carro e le sue competenze.

between the average speed and the commercial speed, which is the distance between the origin and destination of a train divided by the total journey time, including intermediate stops, due to the change of locomotive made once exceeded the national borders. The number of braking and kilometers covered with the brake activated are other parameters strongly influenced by the train driver.

From the tables 4 and 5 can be observed the extreme similarity of the data monitored during the three outward and return journeys. In particular, the number and duration of braking. This fact highlights the extreme repeatability of the measurements performed.

4.3. Brake block temperature

The figgs 12, 13 14 and 15 summarize the parameters of altitude, speed, brake cylinder pressure, and temperature of brake shoes of the two most significant trips including outward and return journeys. The graphs in the figure show the data of about 5600 km of the 25,000 km monitored. To monitor a distance and a period of time, such extent was necessary to accurately size the battery pack to be sure to monitor the whole journey, given the rare opportunity offered by this research project and the willingness of the company to make available his wagon and his skills.

As can be seen, the monitored temperature trends are almost specular in both outward and return journeys for

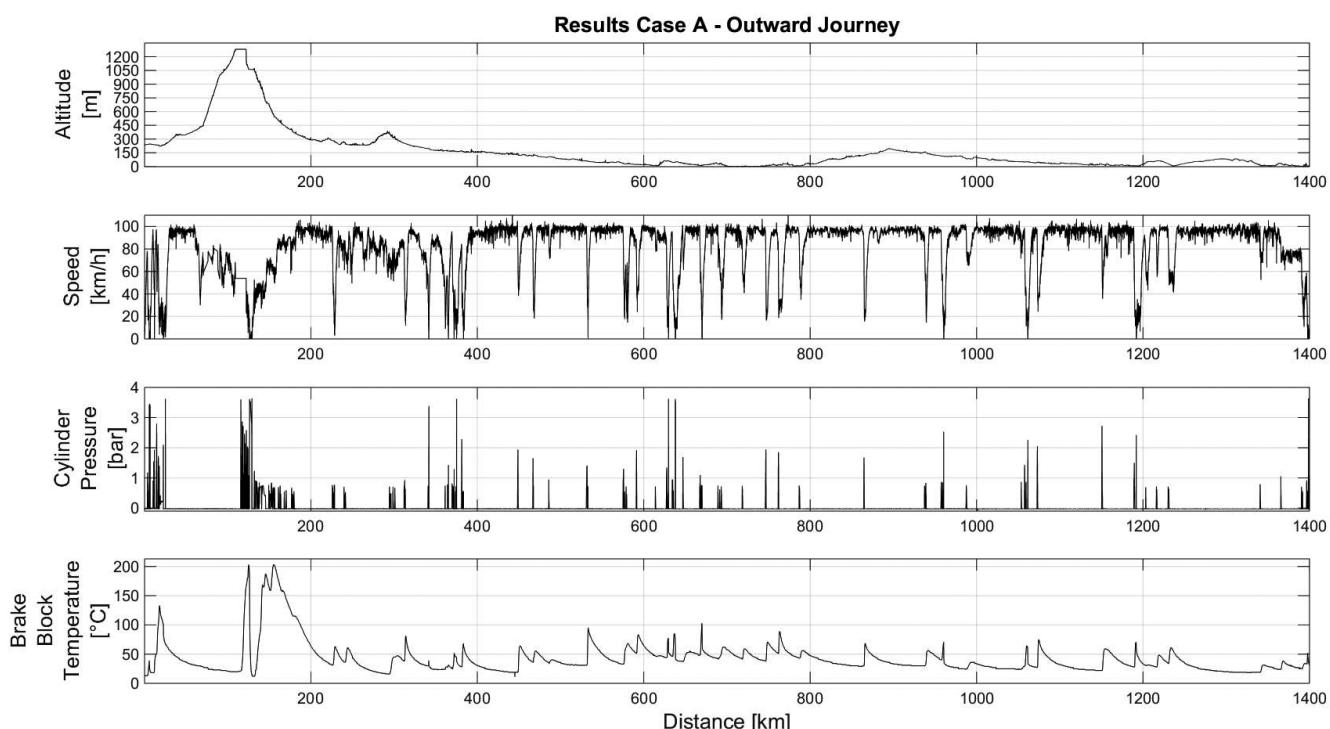


Fig. 12 - Caso A: Viaggio di andata.
Fig. 12 - Case A: Outward journey.

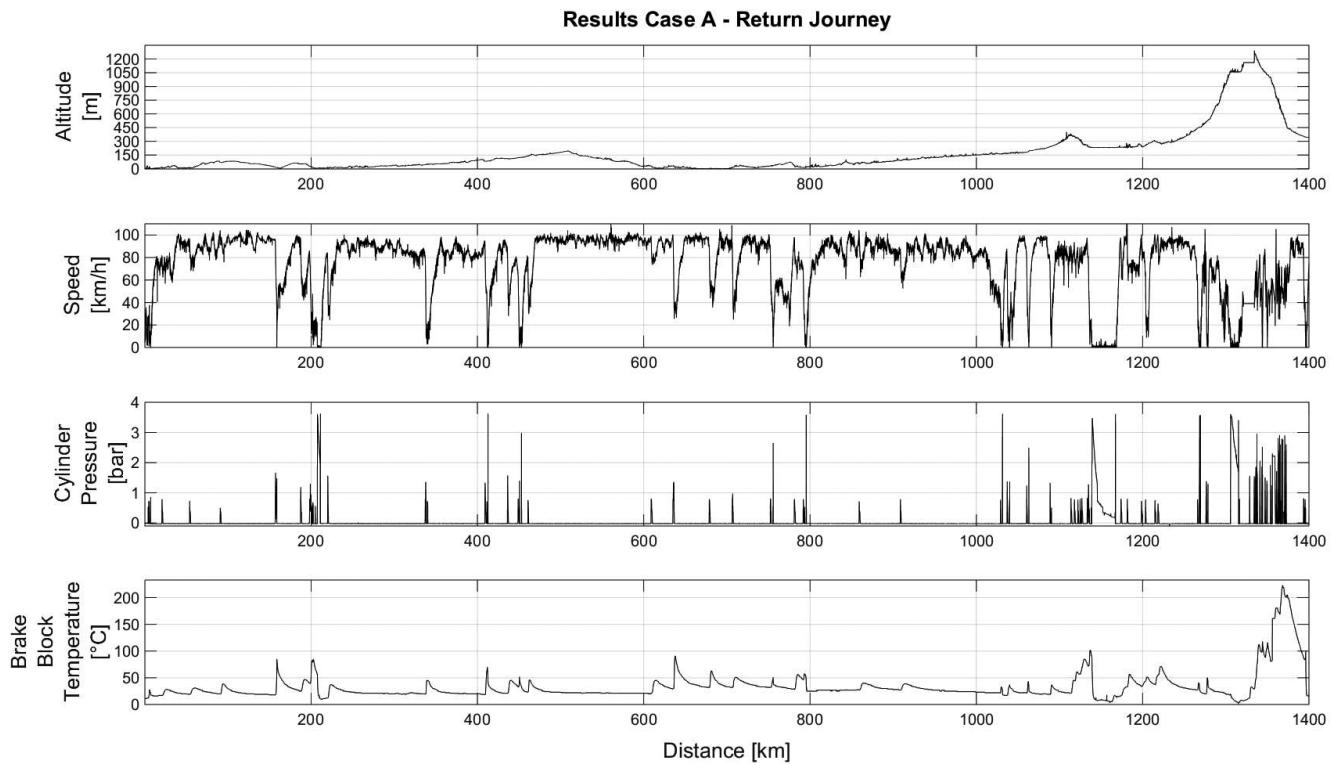


Fig. 13 - Case A: Viaggio di ritorno.

Fig. 13 - Case A: Return journey.

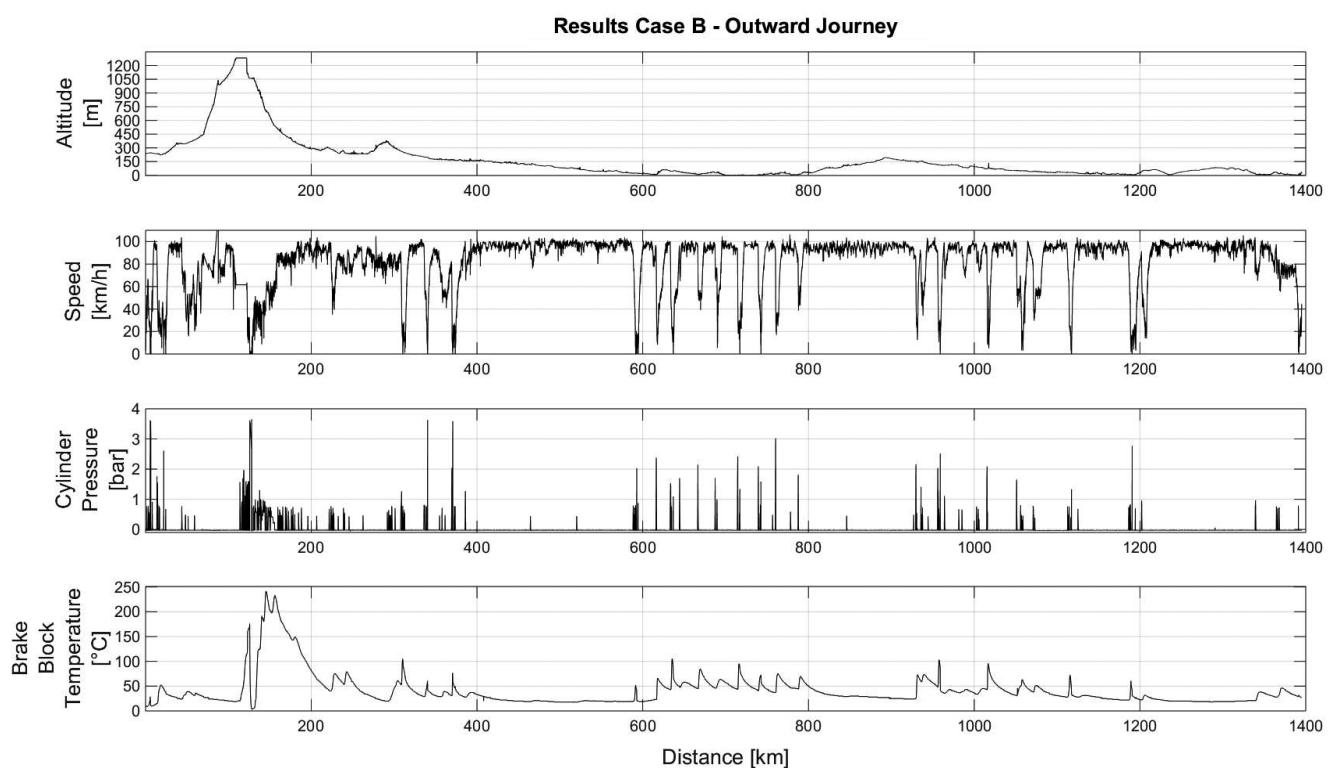


Fig. 14 - Caso B: Viaggio di andata.

Fig. 14 - Case B: Outward journey.

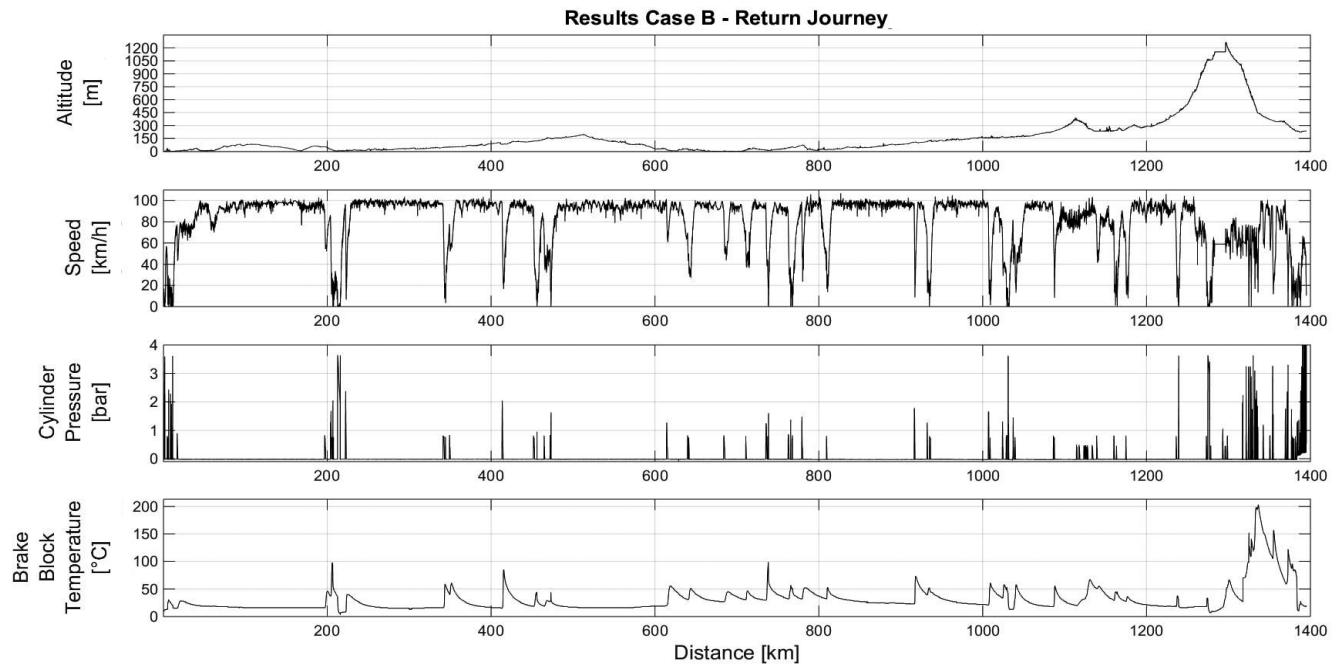


Fig. 15 - Case B: Viaggio di ritorno.
Fig. 15 - Case B: Return journey.

Come si può osservare gli andamenti delle temperature si presentano pressoché speculari tra l'andata e il ritorno per entrambe le installazioni. I massimi livelli di temperatura raggiunti sul tratto alpino sono pressoché identici e testimoniano come le temperature raggiunte dalle suole in ghisa su questo tratto di percorso siano superiori ai 200°C. I valori di temperatura registrati sono relativi al punto di applicazione del sensore. All'interfaccia ruota-suola freno, i valori raggiunti sono più elevati come enfatizzato dalle misure ottenute da VERNERSSON e LUNDÉN [8].

Va sottolineato come questo dato sia stato misurato a bordo di un carro dalle componenti appena revisionate e dalle eccellenti condizioni operative. Con molta probabilità in caso di guasto la temperatura dei freni avrebbe potuto superare i 250°C.

In condizioni di marcia in piano, in particolar modo nel tratto compreso tra il chilometro 600 e il chilometro 800, si può osservare come la temperatura non superi mai i 100°C anzi si attesti su valori intorno ai 70°C.

Si può inoltre notare come in alcuni tratti pianeggianti del percorso il freno non venga attivato per decine di chilometri permettendo così ai freni di smaltire il calore accumulato nelle frenate precedenti.

4.4. Risultati del modello termico

Dal modello termico precedentemente descritto e utilizzando i dati del veicolo e quelli misurati, è stata effettuata una valutazione energetica che ha permesso di stimare la temperatura della suola freno come funzione delle condizioni di marcia del veicolo. Per questo modello è

both installations. The maximum temperature levels reached on the mountain section are almost identical and demonstrate that the temperatures reached by cast iron brake blocks on this section of the railway track are higher than 200°C. The temperature values recorded were related to the point application of the sensor. At the interface wheel-brake blocks, the achieved values are much higher as emphasized the measurements value obtained by VERNERSSON and LUNDÉN [8].

It should be pointed out that these data were measured on a wagon just inspected and with excellent operating conditions. In case of failure, the brake temperature could have exceeded 250°C in the measurement point.

It can be observed that in flatland driving conditions, especially in the section between 600 and 800 km, the temperature never exceeds 100°C but rather stands at 70°C.

The figures also show that, in some plain parts of the route, the brake were not activated for tens kilometers, allowing the brake blocks to dissipate the heat accumulated in the previous braking.

4.4. Results of the thermal model

From the simplified model previously described and using the vehicle data and the measured data, can be performed the energy evaluations that allow to estimate the temperatures of brake block as a function of the running conditions of the vehicle. For this model, it is important to know the mass of the wagon because this parameter strongly influences the results.

importante conoscere la massa del carro in quanto questo parametro influenza fortemente i risultati.

La tabella 6 riporta le caratteristiche fisiche utilizzate per il calcolo:

La tabella 7 riporta i risultati ottenuti con il modello termico in alcune porzioni di tracciato e in differenti installazioni. La sezione F è riferita al passaggio attraverso il tunnel del Frejus.

5. Conclusioni

In questo articolo sono stati presentati la realizzazione, l'installazione e i primi risultati ottenuti dal sistema di monitoraggio modulare dedicato a carri merci sviluppato dal Politecnico di Torino. I dati raccolti hanno permesso di ottenere informazioni di tipo logistico e di funzionamento generale andando a creare un primo database per la futura creazione di algoritmi di diagnostica dei carri. Una prima parte dei dati è stata elaborata ed ha permesso di individuare i tratti più critici del tracciato nei quali sono stati studiati i valori di temperatura, pressione, velocità e accelerazione. L'ulteriore studio dei dati permetterà la creazione di specifici algoritmi che permetteranno una più completa, veloce e chiara analisi dei dati.

Si deve sottolineare la gran quantità di dati da analizzare, ottenuta grazie ad una distanza monitorata che è generalmente tipica dei soli prototipi industriali prima del loro lancio sul mercato.

Questa campagna di misurazioni ci ha permesso di verificare quali sono i valori di soglia dei vari parametri: ciò, unito alle competenze dell'Ambrogio trasporti S.p.a., ci ha permesso di sviluppare dei nuovi algoritmi di monitoraggio.

Nei prossimi mesi si svolgeranno delle prove al banco per simulare il comportamento dell'impianto frenante in condizioni di guasto in quanto durante la campagna di misura non si sono verificati dei guasti. Le future campagne di misura prevedono la sensorizzazione di suole in materiale sintetico per confrontare i valori di temperatura raggiunti con quelli registrati con le suole in ghisa. I prossimi sviluppi del dispositivo si concentreranno invece sulla minimizzazione del consumo energetico, sullo sviluppo di un energy harvester in grado di ricaricare la batteria e si svilupperà un sistema di monitoraggio wireless.

Risultati del modello termico Thermal model results

Track sector	Δ Kinetic energy (MJ)	Δ Potential energy (MJ)	Δ Monitored temperature (°C)	Δ Calculated temperature (°C)	Absolute temperature error (°C)
A	29.9	10.1	50	52	2
B	9.8	1.8	18	15	3
C	23.7	0	34	31	3
D	36.1	6.4	58	56	2
E	27.4	0	39	36	3
F	4.4	138.6	175	182	7

Table 6 reports the physical properties used for the calculation.

TABELLA 6 – TABLE 6

Proprietà fisiche Physical properties

Physical quantity	Wheel	Cast iron brake block
Thermal conductivity k (W/m K)	49	48
Density (kg/m ³)	7850	7100
Thermal capacity (J/kg K)	460	520
Mass (kg)	—	7.5

Table 7 reports the results obtained with the thermal model relating to some sections of the track in different installations. Section F refers to the passage through Frejus Tunnel.

5. Conclusion

In this paper, we presented the realization, the installation, and the first results obtained from the modular monitoring system dedicated to intermodal freight wagons developed by the Politecnico di Torino. The data collected made it possible to obtain information on the logistical and general behavior, creating an initial database for the future development of diagnostic and monitoring algorithms for freight wagon.

The first part of the data was analyzed and allowed to identify the most critical sections of the track in which the values of temperature, pressure, speed, and acceleration were studied. The further part of the data will be used to create specific algorithms that allow a more complete, fast, and clear analysis of the data. It is necessary to underline the large amount of data to analyze, collected thanks to a monitored distance that is generally typical only of the prototype tests conducted by the industry before the launch of a product on the market. This collection data campaign has allowed us to verify which are the threshold values of the various parameters; this factor, combined with the company skills of Ambrogio Trasporti S.p.A., allows us to develop new monitoring algorithms.

In the coming months, some bench tests to simulate a fault of the brake system will take place because during our tests no failure occurred on the wagon.

Future measurement campaigns provide a sensorization of synthetic brake blocks to compare the temperature values reached to those with the cast iron block data.

The next device developments will focus on three key issues: the minimization of the energy consumption, the development of a suitable energy harvester for the battery recharge, and the transition to a wireless system.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] EDWARDS M.C. et al., "Improving freight rail safety with on board monitoring and control systems", in *Joint Rail Conference*, 2005.
- [2] NGIGI R.W., PISLARU C., BALL A., and GU F., "Modern techniques for condition monitoring of railway vehicle dynamics", *Journal of Physics: Conference Series* 364, 2012.
- [3] MATSUMOTO A., SATO Y., OHNO H., TOMEOKA M., MATSUMOTO K., KURIHARA J., OGINO T., TANIMOTO M., KISHIMOTO Y., SATO Y., and NAKAI T., "A new measuring method of wheel-rail contact forces and related considerations", *Wear* 265 (9-10), 1518-1525, 2008.
- [4] BLEAKELY S. and SENINI S., "Autonomous time frequency analysis of wagon body accelerations", in *Proceedings of the Fifth Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference 2004 Gold Coast Australia*, 2004, pp. 34.6.1-34.6.12.
- [5] MEI T.X. and LI H., "Measurement of vehicle ground speed using bogie-based inertial sensors", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 222 (2), 107-116, 2008.
- [6] MONJE P., ARANGUREN G., MARTINEZ B., and CASADO L., "Using bogie-mounted sensors to measure wheel rolling and sliding in railway tracks", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 2011.
- [7] VERNERSSON T., "Temperatures at railway tread braking. Part 2: calibration and numerical examples", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 221.
- [8] VERNERSSON T. and LUNDÉN R., "Temperatures at railway tread braking. Part 3: wheel and block temperatures and the influence of rail chill", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 221.
- [9] VINEESH K.P., VAKKALAGADDA M.R.K., TRIPATHI A.K., MISHRAC A., and RACHERLA V., "Non-uniformity in braking in coaching and freight stock in Indian Railways and associated causes", *Engineering Failure Analysis* 59, 493-508, 2016.
- [10] VAKKALAGADDA M.R.K., SRIVASTAVA D.K., MISHRA A., and RACHERLA V., "Performance analyses of brake blocks used by Indian Railways", *Wear* 328-329, 64-76, 2015.
- [11] AIMAR M., SOMÀ A., and FRACCAROLLO F., "An on-board braking monitoring system for intermodal freight trains", in *Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance*, 2016.
- [12] TALATI F. and JALALIFAR S., "Analysis of heat conduction in a disk brake system", *Heat Mass Transfer* 45, 1047-1059, 2009.
- [13] Bosso, N., GUGLIOTTA, A., ZAMPIERI, N., Strategies to simulate wheel-rail adhesion in degraded conditions using a roller-rig, (2015), *Vehicle System Dynamics*, 53 (5), pp. 619-634. DOI: 10.1080/00423114.2014.981194.
- [14] Bosso, N., ZAMPIERI, N., Long train simulation using a multibody code,(2017), *Vehicle System Dynamics*, 55 (4), pp. 552-570. DOI:10.1080/00423114.2016.1267373
- [15] DE PASQUALE G., SOMÀ A., AND ZAMPIERI N., Design, simulation, and testing of energy harvesters with magnetic suspensions for the generation of electricity from freight trains vibrations, *Journal of Computational and Linear Dynamics* 7, 2012.
- [16] ZAMPIERI, N.; Bosso, N.; GUGLIOTTA, A. Innovative Monitoring Systems for Onboard Vehicle Diagnostics. In: *Railways 2016 The Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, Cagliari, 5-8 April 2016.* pp. 1-14.
- [17] COMMISSION REGULATION (EU) No 321/2013 of 13 March 2013 concerning the technical specification for interoperability relating to the subsystem 'rolling stock – freight wagons' of the rail system in the European Union and repealing Decision 2006/861/EC.
- [18] TAGLIAFERRI A. and MATRICARDI A., Nozioni sul freno ferroviario *CIFI collana per la formazione professionale*, 2001.
- [19] UIC 540 O, *Brakes – Air Brakes for Freight Trains and Passenger Trains*, 5th ed., 2006.