



Un approccio euristico alla diagnostica predittiva dello stato di usura delle ruote basato su un dispositivo di terra a basso costo

A heuristic approach for predictive diagnosis of wheel wear based on low-cost track-side equipment

Laura CARNEVALI^(*)
 Alessandro FANTECHI^(*)
 Gloria GORI^(*)
 Jacopo PARRI^(*)
 Moreno PIERALLI^(**)
 Samuele SAMPIETRO^(*)

Sommario - La diagnosi predittiva dello stato di usura delle ruote svolge un ruolo fondamentale nella pianificazione dell'attività di manutenzione di veicoli ferroviari. Nei moderni treni ad alte prestazioni (p.e., treni ad alta velocità) sono spesso installati a bordo appositi sensori di usura. Viceversa, nei treni a basse prestazioni (p.e., treni regionali e merci), la valutazione dello stato di usura delle ruote è effettuata in occasione di controlli periodici in appositi siti. Per supportare un controllo costante e a basso costo dello stato di usura, presentiamo un approccio che utilizza un dispositivo di terra per la stima dell'altezza del bordino delle ruote, il cui valore è tanto più alto quanto maggiore è lo stato di usura della ruota. L'approccio sfrutta le caratteristiche di un innovativo pedale elettromagnetico e di un metodo euristico di stima. Fattibilità e prestazioni sono valutate nell'ambito del progetto INDIGO, validando i risultati con sperimentazioni in laboratorio e sul campo.

1. Introduzione

I veicoli ferroviari restano in servizio per un lungo intervallo di tempo (anche fino a 30 anni e più), ma circa un terzo del costo del loro ciclo di vita ricade su attività di manutenzione [10]. Uno dei costi maggiori tra quelli che queste attività comportano è dovuto all'usura dei profili delle ruote che devono essere periodicamente controllate in siti dedicati.

Summary - Predictive diagnosis of wheel wear plays a fundamental role in maintenance of railway vehicles. While on-board installation of wear sensors is affordable only for modern high-performance trains (e.g., high-speed trains), evaluation of wheel wear is mostly performed through periodic measures in maintenance sites for low-performance trains (e.g., secondary line and freight trains). To support constant monitoring of wheel wear at low cost, we present an economical wayside system able to estimate the flange height of wheels, which actually increases with the wheel wear. The approach exploits the capabilities of an innovative electromagnetic treadle and a heuristic estimation method. Feasibility and performance of the proposed approach are evaluated through laboratory and on-field experiments in the context of the INDIGO project.

1. Introduction

Railway vehicles run for a long time (up to 30 years and more), and about one-third of their lifecycle costs is due to maintenance costs [10]. One of the most important maintenance costs comes from wear of wheel profiles, which are periodically checked at maintenance sites.

1.1. State of the art

Though wheel wear prediction is a quite difficult task [14], it could effectively help to optimize maintenance plans of railway vehicles [1], [2], [9], [12], [16], [17]. To support this goal, a variety of devices has been proposed to

^(*) {laura.carnevali, alessandro.fantechi, gloria.gori, jacopo.parrì, samuele.sampietro}@unifi.it.

^(**) moreno.pieralli@comesa.prato.it.

^(*) {laura.carnevali, alessandro.fantechi, gloria.gori, jacopo.parrì, samuele.sampietro}@unifi.it.

^(**) moreno.pieralli@comesa.prato.it.

1.1. Stato dell'arte

Benché predire la condizione di usura sia abbastanza complesso [14], risulta tuttavia vantaggioso per una migliore organizzazione dei piani di manutenzione [1], [2], [9], [12], [16], [17]. A tal scopo, sono stati proposti diversi dispositivi che permettono di automatizzare la verifica dello stato di usura delle ruote: questi dispositivi possono essere installati a bordo, nei siti di manutenzione o lungo i binari, con impatto e costi differenti.

I più avanzati treni moderni, come i treni per l'alta velocità e i treni regionali a configurazione fissa, possono essere dotati di una serie di sensori di usura installati a bordo. Per esempio, in [4] viene presentato un sistema di bordo che rileva lo stato di usura delle ruote analizzando il rumore generato dal loro contatto con la rotaia e validando i risultati su materiale metro equipaggiato ad hoc in Svezia. In [11] gli autori utilizzano i dati provenienti da vari sensori di bordo per estrarre feature da utilizzare in metodi automatici che, combinati con la conoscenza di dominio, consentono attività di diagnostica e prognostica per alcuni componenti del veicolo. In [3] è presentata un'ampia indagine sui metodi di rilevamento e misurazione del livello di usura delle ruote; le molte tecniche utilizzabili si basano su principi fisici diversi e permettono di rilevare varie modalità di usura. Complessivamente dotare i veicoli ferroviari di sensori di bordo fornisce un'informazione continua sulle dinamiche di sistema e supporta una stima accurata dello stato di usura, a fronte però di un costo e di un impatto che rendono quest'approccio utilizzabile solo per treni ad alte prestazioni.

Viceversa, i treni a basse prestazioni, come quelli regionali e merci, monitorano lo stato di usura delle ruote principalmente attraverso controlli in siti di manutenzione. Per aumentare la frequenza di monitoraggio senza interrompere l'attività dei veicoli, sono stati installati dei portali diagnostici che permettono di verificare lo stato di ogni ruota e, a velocità molto alte, i pantografi e i profili dei treni [7], [8]. Certamente i treni a basse prestazioni potrebbero al momento beneficiare dell'installazione di sistemi a basso costo sui binari. In [5], viene mostrato un confronto tra modelli diversi di usura delle ruote, realizzati tenendo conto di informazioni che possono essere acquisite lungo la tratta (p. e., variazioni di velocità, energia dissipata nel contatto ruota-rotaia), ottenendo un buon riscontro in caso di stato severo di usura e mostrando che una combinazione degli aspetti di usura considerati può aumentare l'affidabilità dell'approccio. Alcuni approcci utilizzano reti neurali. Ad esempio, in [13] gli autori sfruttano reti neurali per la predizione dell'usura di ruote e binari sulla base di caratteristiche simili, tra le quali la quantità di carico, la velocità del veicolo, l'angolo di serpeggio, e i profili ruota/rotaia. In [15], è presentato un tool per la predizione dell'usura, che sfrutta la simulazione di contatti veicolo-rotaia utilizzando dati reali, la misura dei profili e le condizioni di servizio, e che ha ottenuto buoni risultati quando è stato applicato a convogli di una linea suburbana di Stoccolma. Tutti questi approcci han-

automate measurement of wheel wear, which can be installed on board, in maintenance sites, or along the tracks, with different cost and with different impact on the existing technologies.

Modern high-end trains, such as high-speed trains and heavy duty-fixed suburban consists, can be instrumented with a plethora of on-board wear sensors. For example, in [4] an onboard measurement system is developed that detects severe wheel wear based on the noise generated by the wheel-rail contact, using instrumented metro trains in Sweden for validation purposes. In [11], informative features are extracted from signals provided by many onboard sensors, combining domain knowledge with automated methods in order to perform diagnostics and prognostics of vehicle components. A survey on several wheel wear detection and measurement techniques is presented in [3], showing that different techniques, based on different physical principles, can cover different aspects of wheel wear. Overall, instrumenting railway vehicles with onboard sensor devices provides continuous real-time information on the system dynamics, supporting accurate estimation of wheel wear while having a cost and impact that makes it affordable only for high-performance trains.

Conversely, low-performance trains, such as secondary line and freight trains, mostly monitor wheel wear through periodic measures in maintenance sites. To increase the number of checks while avoiding downtime of railway vehicles, diagnostic portals have been recently installed, which are able to measure every wheel as well as other critical equipment, such as pantographs [7], [8]. Of course, low-performance trains could actually benefit from low-cost detection systems installed along the tracks. In [5], a comparison is performed among different models of wheel wear based on information that can be acquired along the track (e.g., sliding speed, energy dissipated in the wheel-rail contact area), showing good agreement in severe wear conditions and suggesting that a combination of the considered wear aspects would improve model reliability. Artificial neural networks are used in [13] to predict wheel and rail wear based on similar features, including vehicle load and speed, yaw angle, and wheel/rail profiles. In [15], a wear prediction tool is developed which leverages vehicle-track simulations based on actual track data, measured rail profiles, and operating conditions, achieving good results when applied to a vehicle operating the commuter rail network in Stockholm. As a common trait, all these approaches are much more focused on predicting wheel wear based on observed raw data rather than on designing and developing equipment that support agile acquisition of such data.

1.2. Contribution and contents organization

In this paper, we present a low-cost track-side equipment that evaluates the wear level of the wheels of a railway vehicle based on estimates of wheel flange height. This work has been carried out in the context of INDIGO (De-

no in comune il fatto di essere focalizzati sulla previsione dello stato di usura delle ruote basandosi su misure grezze piuttosto che sulla progettazione e sullo sviluppo di dispositivi che supportino un'agevole acquisizione di tali dati.

1.2. Contributo e sommario

In questo lavoro presentiamo un dispositivo di terra a basso costo che consente di stimare il livello di usura delle ruote dei convogli ferroviari sulla base dall'altezza del bordino delle ruote. Questo lavoro è stato sviluppato nell'ambito di INDIGO (Sviluppo di un dispositivo INtelligente per la DIagnosi e il monitoragGiO di sistemi ferroviari), un progetto di Ricerca&Sviluppo cofinanziato da Regione Toscana nel programma quadro POR FESR 2014-2020 e sviluppato da piccole e medie imprese (Comesa S.R.L., Isertech S.R.L., e QuestIT S.R.L.) con il supporto scientifico del Laboratorio di Tecnologie del Software dell'Università degli Studi di Firenze. Il progetto di ricerca è stato ispirato dalla quantità di dati che possono essere acquisiti da un pedale elettromagnetico multifunzione progettato e realizzato da Comesa S.R.L., ovvero un dispositivo di terra in grado di rilevare gli assi di un convoglio ferroviario che vi transita sopra. Ad ogni passaggio di un asse, il pedale produce una serie di campioni che hanno andamento simile a quello di una funzione gaussiana, con proprietà dipendenti dalla ruota che ha effettuato il passaggio (p.e., massa metallica, forma geometrica), da caratteristiche fisiche del treno (p.e., velocità, direzione di marcia) e dalla sua composizione (p.e., posizione della locomotrice rispetto alle altre carrozze). Se i passaggi di tutte le ruote di un treno specifico vengono univocamente identificati, è possibile stimare l'usura della ruota applicando un metodo euristico che utilizza il confronto delle forme d'onda ottenute in passaggi successivi. I valori dell'usura acquisiti, insieme alla conoscenza della distanza di viaggio effettuata da ogni convoglio, vengono utilizzati per definire un algoritmo per la predizione dell'usura delle ruote. La fattibilità e le prestazioni dell'approccio proposto sono provate con sperimentazione sia in laboratorio sia sul campo, mostrando risultati incoraggianti che in futuro potrebbero essere usati a supporto della pianificazione e ottimizzazione delle attività di manutenzione.

L'articolo è organizzato come segue. In Sez. 2, vengono introdotte le caratteristiche principali del pedale elettromagnetico ed il suo utilizzo tipico in un sistema contaassi. In Sez. 3, viene illustrato in che modo dati diagnostici possono essere derivati da dati grezzi acquisiti dal pedale. In Sez. 4, vengono presentati i risultati sperimentali ottenuti nel contesto del progetto INDIGO. Infine, in Sez. 5 vengono presentate le conclusioni.

2. Sensore di rilevamento di un asse: il pedale elettromagnetico

Il pedale elettromagnetico è un dispositivo in grado di rilevare disturbi nel campo elettromagnetico circostante causati dal passaggio di una ruota, e di conseguenza può

development of an intelligent device for diagnosis and monitoring of railway systems), a Research&Development project co-funded by the Tuscany regional government (Italy) in the POR FESR 2014-2020 program and developed by the SMEs Comesa, Isertech, and QuestIT, with the scientific support of the Software Technologies Laboratory (STLab) of the University of Florence. Specifically, the research has been inspired by the potential of the amount of data provided by a multifunction electromagnetic treadle designed and built by Comesa S.R.L., which is able to detect one or more axles of rolling stock in transit over it. Each passage over the treadle produces a Gaussian trace, which can be considered as a footprint of the rolling wheel, characterized by wheel features (e.g., metal mass, geometrical shape), by physical train kinetics (e.g., speed and travel direction), and by train composition (i.e., position of the tractor with respect to the other cars). If all the passages of each wheel of a specific train can be univocally identified, the collection and comparison of the obtained waveforms make it possible to estimate the wheel consumption through a heuristic method. The estimated wear values and the knowledge of the expected distance traveled by the vehicle are then used to define an algorithm for prediction of the wheel consumption. Feasibility and performance of the proposed approach are evaluated through laboratory and on-field experiments, showing encouraging results which could be used in the future to support scheduling and optimization of maintenance tasks.

The paper is organized as follows. In Sect. 2, we introduce the main characteristics of the electromagnetic treadle and its typical usage in an axle counter system. In Sect. 3, we illustrate how diagnostic data can be derived from raw data acquired by the treadle. In Sect. 4, we report the experimental results obtained in the context of the INDIGO project. Finally, conclusions are drawn in Sect. 5.

2. Wheel detection sensor: the electromagnetic treadle

The electromagnetic treadle provides a square wave signal with frequency output, whose value varies according to the amount of metal present in its sensitivity zone. In so doing, the treadle is able to perceive disruptions of the electromagnetic field caused by wheel passages, and therefore it can be used as the main sensor to detect an axle of rolling stock in transit. In the following sections, we describe the operating principles of the treadle, detailing hardware composition and main features of acquired data (Sect. 2.1), and we describe how a Gaussian curve related to the passage of an axle over the treadle can be considered as a footprint of the monitored train (Sect. 2.2).

2.1. Operating principles of the multifunction electromagnetic treadle

The basic operating principle of a treadle is to sample the electromagnetic field close to the hardware, using one or

essere utilizzato come sensore principale per rilevare il transito di un asse di un convoglio ferroviario. In questa sezione vengono descritti i principi operativi del pedale, dettagliando la sua composizione hardware e le caratteristiche principali dei dati acquisiti (Sez. 2.1) e descrivendo come la curva gaussiana relativa al passaggio dell'asse sopra il pedale possa essere considerata un'impronta del convoglio osservato (Sez. 2.2).

2.1. Principi operativi del pedale elettromagnetico multifunzione

Il principio di funzionamento di un pedale è quello di campionare il campo elettromagnetico che lo circonda, utilizzando uno o più oscillatori che si comportano come sensori elettronici in grado di rilevare la presenza di materiale conduttivo. Il campo elettromagnetico è generato da un oscillatore e viene variato dal passaggio del bordo della ruota sul sensore stesso, aumentando la frequenza di oscillazione rispetto al caso di binario libero. Un pedale elettromagnetico viene installato su un singolo binario di una tratta ed è in grado di campionare tutti i passaggi delle ruote solamente su un singolo lato del treno, fornendo informazioni sufficienti all'identificazione degli assi (ulteriori dettagli sono descritti in Sez. 2.2). In base a questo principio, pedali installati su tratte ferroviarie sono in grado di monitorare la presenza di convogli ferroviari in transito.

Il pedale elettromagnetico multifunzione sviluppato nell'ambito del progetto INDIGO è costituito da un Doppio Rilevatore di Ruota e da un'Unità di Giunzione, come illustrato in Fig. 1. Per migliorare il rilevamento delle ruote durante la fase di campionamento, il pedale integra due oscillatori con livelli di sensibilità differenti in ridondanza, piazzati lungo la tratta ad una distanza di 133 mm. Questa ridondanza viene sfruttata nell'approccio proposto anche per stimare correttamente la velocità del treno senza bisogno di strumentazione ulteriore (Sez. 3.3.3).

Il pedale campiona una coppia di segnali che oscillano rispettivamente a 1MHz e 1.1MHz, e conta il Numero di Impulsi in un Periodo (NIP - con un periodo di 16ns), che è inversamente proporzionale alla frequenza campionata $f_{ovr}(t)$:

$$NIP = \frac{7.680}{f_{ovr}(t)}$$

more oscillators that act as electronic sensors, sensitive to the presence of conductive materials. The electromagnetic field is provided by an oscillator and varies with the flange of a wheel passing over the sensor, increasing the oscillation frequency with respect to the case of free track. An electromagnetic treadle is installed on a single rail of a track and is able to sample all the wheel passages only on a single side of the train, thus providing sufficient information to identify the train axles (further details are reported in Sect. 2.2). According to this, treadles installed on a railway track can monitor accesses of rolling stock in transit in the section, providing an axle counting occupancy detector.

The multifunction electromagnetic treadle developed in the INDIGO project consists of a Wheel Double Detector and a Junction Unit, as illustrated in Fig. 1. To improve wheel detection during the sampling stage, the treadle embeds 2 oscillators with different sensitivity in redundancy mode, placed along the rail at a distance of 133 mm. As a notable aspect, this redundancy is also exploited in the proposed approach to properly estimate train speed without requiring any additional instrumentation, as discussed in Sect. 3.3.3.

The treadle samples a couple of signals with frequency of 1 MHz and 1.1 MHz, respectively, counting the Number



Figura 1 – Architettura Hardware del pedale elettromagnetico installato sulla linea.

Figure 1 – Hardware architecture of the electromagnetic treadle installed on a track.

La presenza di una massa metallica all'interno del campo elettromagnetico aumenta $f_{OUT}(t)$, dunque diminuisce i NIP rispetto al valore di rotaia libera. La Fig. 2 riassume il concetto, mostrando i NIP misurati per passaggi diversi di varie ruote sul sensore, che portano a curve differenti principalmente a causa delle diverse altezze dei bordini, ma anche a causa delle diverse forme geometriche delle ruote, delle condizioni atmosferiche e dell'effetto dello slittamento.

2.2. Impronta Gaussiana di un treno in transito

Il pedale rileva un asse grazie ai picchi del segnale acquisito, portando ad una collezione di forme d'onda elettromagnetiche. Se assumiamo che sia possibile identificare univocamente ogni singolo treno, allora ogni forma d'onda acquisita può essere associata allo specifico treno che l'ha prodotta. L'insieme delle forme d'onda prodotte costituisce quindi un'impronta del treno stesso e può essere utilizzata come firma a supporto delle seguenti attività di diagnostica:

- rilevamento dell'inversione dei convogli, in modo da identificare univocamente il lato che sta transitando sopra il pedale;
- identificazione delle ruote, in modo da stimare l'altezza del bordino come misura del livello di usura della ruota.

In Fig. 3 viene riportata l'impronta di un treno regionale Vivalto di Trenitalia, che mostra 12 carrelli di carrozze passeggeri, ognuno con due assi, e i due carrelli più vicini del locomotore che spinge il convoglio. Il treno Vivalto ha una composizione asimmetrica, ovvero con un singolo locomotore, di conseguenza risulta più facile riconoscere la posizione del locomotore che può essere testa treno o coda treno se il locomotore rispettivamente traina o spinge il convoglio.

3. Un approccio euristico per la diagnosi dello stato di usura delle ruote

Le forme d'onda generate dal passaggio di una ruota specifica sul pedale forniscono informazioni sul livello di usura della ruota stessa a supporto dell'attività di diagnostica. In particolare, le forme d'onda hanno un andamento gaussiano nel tempo (Sez. 3.1), e vengono sfruttate in un processo di diagnostica e predizione composto dalle seguenti fasi:

- **Filtraggio e estrazione delle feature** (Sez. 3.2): estrazione dei campioni rilevanti dalle forme

of Impulses in one Period (NIP – where Period = 16ns), which are inversely proportional to the sampled frequency $f_{OUT}(t)$:

$$NIP = \frac{7.680}{f_{OUT}(t)}$$

The presence of a metal mass in the electromagnetic field increases $f_{OUT}(t)$ and thus decreases the NIP with respect to the case of free track. Fig. 2 summarizes the conceptual idea, showing the NIP measured in different passages of different wheels over the sensor, which yield different curves mainly due to different wheel flange height, but also due to different shapes of rolling stock materials, atmospheric conditions, and wheel skidding effect.

2.2. Gaussian footprint of a train in transit

The treadle detects an axle for each acquired wave peak, yielding a collection of electromagnetic waveforms. If each train in transit can be univocally identified, each acquired waveform can be related to a specific train. In so doing, the collection of waveforms of a train provides a footprint of the train and can be used to support the following diagnosis activities:

- detection of rolling stock inversions, in order to uniquely identify the side transiting over the treadle;
- identification of wheels, in order to estimate the flange height as a measurement of wheel wear level.

As an example, Fig. 3 shows the footprint of a Trenitalia

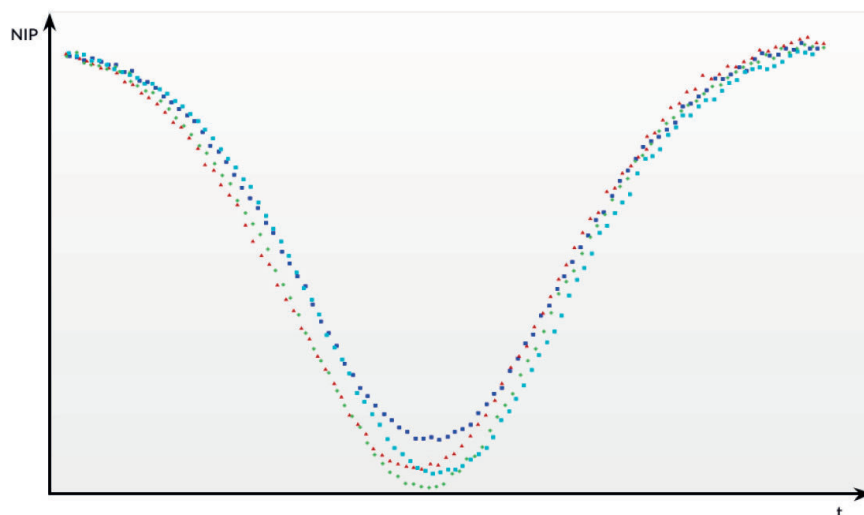


Figura 2 – Valori NIP rilevati dal pedale elettromagnetico in passaggi di ruote differenti (sulle ascisse gli istanti temporali, sulle ordinate i valori NIP). Ogni curva mostra una forma gaussiana.

Figure 2 – The NIP detected by the electromagnetic treadle in different passages of different wheels (time on the x-axis, NIP values on the y-axis). Each curve follows a Gaussian shape.

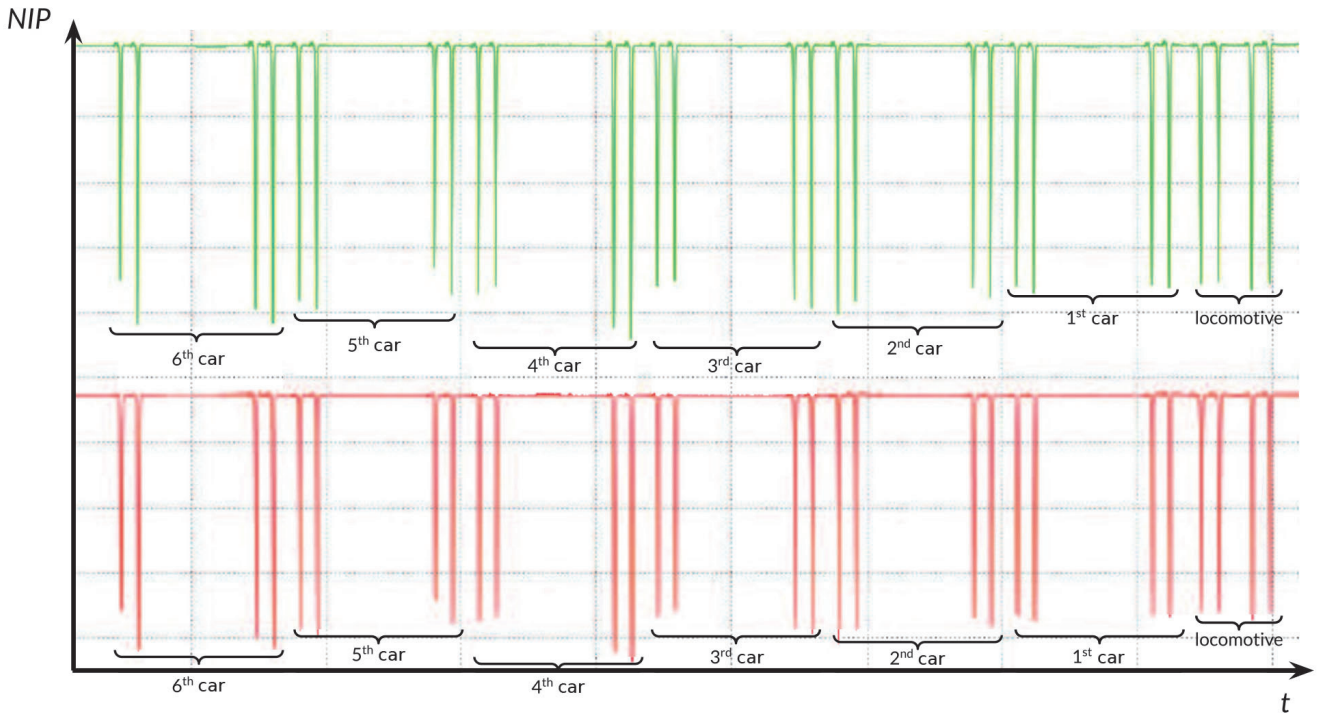


Figura 3 – Impronta di un treno Vivalto, campionata dai due oscillatori del pedale elettromagnetico: la curva rossa è prodotta dal primo oscillatore, mentre quella verde dal secondo oscillatore (l’ascissa riporta il tempo di campionamento, mentre l’ordinata i valori NIP). L’impronta mostra un locomotore coda treno, riconoscibile dalla distanza ridotta fra i carrelli.

Figure 3 – Footprint of a Vivalto train, sampled by the two oscillators of the treadle: the red curve refers to the first oscillator, while the green one refers to the second oscillator (sampling time on the x-axis, NIP values on the y-axis). The footprint shows a trailing locomotive pushing the train, which can be detected by the shorter distance between its bogies.

d’onda prodotte da ciascun oscillatore e associazione con la ruota identificata per generare la curva gaussiana di ogni ruota.

- **Diagnosi del livello di usura attuale** (Sez. 3.3): applicazione di un’euristica per derivare i parametri liberi della curva gaussiana associata ad ogni ruota, fornendo una stima dell’altezza attuale del bordino della ruota.
- **Diagnosi predittiva del livello di usura** (Sez. 3.4): predizione dell’aumento nel tempo dell’altezza del bordino di ogni ruota identificata.

3.1. La legge di rilevazione delle ruote

In presenza di un asse in transito, la frequenza campionata $f_{OUT}(t)$ mostra un andamento gaussiano in accordo con la seguente legge (da qui in avanti chiamata *legge di rilevazione*):

$$f_{OUT}(t) = f_{FT} + amp \cdot e^{-k(t-t_0)^2}$$

$$amp = f_{FT} \cdot s \cdot \left(\frac{h}{h_{REF}}\right)^3$$

Vivalto regional train, highlighting 12 bogies of the passenger cars, each with two axles, and 2 closer bogies indicating the trailing locomotive, which pushes the train. The Vivalto train has an asymmetric composition (i.e., with only one locomotive) facilitating the recognition of the locomotive position, which can be either ahead position or tail position depending on whether the locomotive pulls or pushes, respectively.

3. A heuristic diagnosis approach for wear detection

Waveforms generated by the passage of a specific wheel over the treadle provide information on the wheel wear level, supporting diagnostic and maintenance tasks. Specifically, the waveforms follow a temporal Gaussian trend (Sect. 3.1), and are exploited in a diagnostic and prediction process consisting of the following phases:

- **Filtering and feature extraction** (Sect. 3.2): extraction of relevant samples from the waveforms of each oscillator and association with the identified wheel to generate a Gaussian curve for each wheel.
- **Diagnosis of the current wear level** (Sect. 3.3): application of a heuristics to derive the free parameters of the

$$\Delta = l + 2 \cdot \sqrt{a \cdot d - a^2}$$

$$k = \left(\frac{4v}{\Delta}\right)^2$$

dove:

- t_0 è l'istante temporale in cui la ruota transita sul sensore, metaforicamente premendo il pedale, e la curva acquisita assume il suo massimo locale, ovvero $f_{OUT}(t_0)$;
- amp è l'ampiezza della curva gaussiana e dipende dalla frequenza di oscillazione a rotaia libera (f_{FT}), dalla sensibilità dell'oscillatore (s) e dal rapporto fra l'altezza reale del bordino della ruota (h) e l'altezza reale del bordino di riferimento ideale (h_{REF}); a livello geometrico, amp rappresenta la distanza fra f_{FT} e il punto di massimo locale $f_{OUT}(t_0)$;
- v è la velocità del treno in transito, che deve essere stimata;
- Δ è un parametro che dipende dalla lunghezza del sensore l , dalla massima distanza ruota-sensore per cui la ruota viene rilevata dal sensore stesso (a), e dal diametro della ruota (d);
- k è un parametro dipendente da v e da Δ .

I parametri f_{FT} , s , h_{REF} , l , a e d sono noti e una loro interpretazione geometrica è riportata in Fig. 4.

In seguito, per combinare gli aspetti relativi alla modellazione fisica ideale con gli aspetti legati al comportamento reale, alterneremo considerazioni ed equazioni sia nel dominio della frequenza che in quello del tempo caratterizzato dai valori NIP. L'equazione in Sez. 2.1 consente la trasformazione bidirezionale fra i due domini.

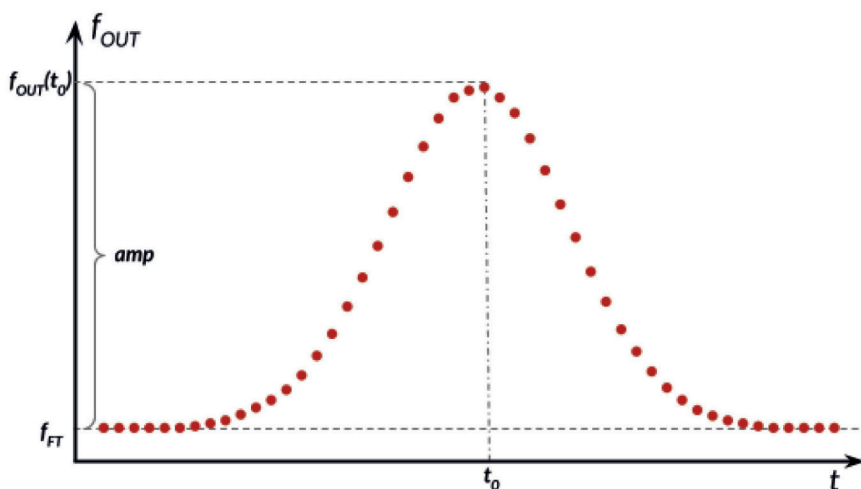


Figura 4 – Interpretazione geometrica, nel dominio della frequenza, dei parametri principali della legge di rilevazione.

Figure 4 – Geometrical interpretation, in the frequency domain, of the main parameters of the detection law.

Gaussian curve associated with each identified wheel, providing an estimate of the current flange height of the wheel.

- **Predictive diagnosis of the wear level** (Sect. 3.4): prediction of the increase over time of the flange height of each identified wheel.

3.1. The wheel detection law

In presence of a transiting axle, the sampled frequency $f_{OUT}^{(t)}$ reveals a Gaussian trend according to the following law (from now on termed detection law):

$$f_{OUT}(t) = f_{FT} + amp \cdot e^{-k(t-t_0)^2}$$

$$amp = f_{FT} \cdot s \cdot \left(\frac{h}{h_{REF}}\right)^3$$

$$\Delta = l + 2 \cdot \sqrt{a \cdot d - a^2}$$

$$k = \left(\frac{4v}{\Delta}\right)^2$$

where:

- t_0 is the time instant at which the wheel transits on the sensor, metaphorically pushing the treadle, and the sampled curve assumes its local maximum, i.e., $f_{OUT}(t_0)$;
- amp corresponds to the amplitude of the Gaussian curve and depends on the oscillation frequency in the case of free track (f_{FT}), on the sensitivity of the oscillator (s), and on the ratio between the actual flange height of the wheel (h) and a reference flange height for an ideal non-worn wheel (h_{REF}). From a geometrical perspective, amp represents the distance between f_{FT} and the local maximum $f_{OUT}(t_0)$;
- v is the speed of the transiting train, which needs to be estimated.
- Δ is a parameter depending on the sensor length (l), the maximum wheel-sensor distance such that the wheel is detected by the sensor (a), and the wheel diameter (d);
- k is a parameter depending on the train speed (v) and on Δ .

Parameters f_{FT} , s , h_{REF} , l , a and d are known and their geometrical interpretation is illustrated in Fig. 4.

In the rest of the paper, to combine aspects related to the ideal physical world with aspects related to the real physical environment, we alternate considerations and equations both in

3.2. Filtraggio ed estrazione delle feature

Il pedale acquisisce un campione ogni 125 μ s, sia quando un treno sta transitando sul pedale che quando il pedale è libero. I campioni acquisiti sono processati in due fasi per estrarre le informazioni da utilizzare durante le fasi di diagnostica successive. In particolare, la prima fase identifica la sequenza di campioni $S = \{NIP_1, NIP_2, \dots, NIP_N\}$ relativa al transito di ogni treno, filtrando il rumore generato da cause differenti (p.e., il passaggio di animali sopra i binari, grandinate). Successivamente, la seconda fase isola i campioni relativi ad ogni ruota all'interno di una sequenza associata al transito di un treno. Per effettuare questi due passi, è stato definito un algoritmo che stima la frequenza di oscillazione in caso di rotaia libera (f_{FT}), che dipende dalle caratteristiche di installazione, dalle condizioni atmosferiche, e dalla sensibilità dell'oscillatore considerato (i valori f_{FT} dei due oscillatori sono differenti e devono essere calcolati in maniera indipendente). In particolare, in riferimento alla rappresentazione in NIP della f_{FT} ($NIP_{FT} = 7680/f_{FT}$), i campioni NIP sono classificati come segue per ognuno dei due oscillatori:

- Un campione è detto *rilevante* se il suo valore NIP è inferiore al 99,5% del valore stimato NIP_{FT} :

$$NIP_{RELEVANT} := \{NIP_i \mid NIP_i < 0,995 \cdot NIP_{FT}\};$$

- Due campioni rilevanti NIP_i, NIP_j con NIP_j successivo a NIP_i sono detti *consecutivamente rilevanti* se sono separati da un massimo di H campioni tutti *irrilevanti*, dove H è detta *soglia di irrilevanza* ed è pari a 3 nei nostri esperimenti:

$$NIP_i, NIP_j \in S_{WHEEL} \Leftrightarrow NIP_i, NIP_j \in NIP_{RELEVANT} \wedge |j - i| \leq H \wedge \forall k : i < k < j, NIP_k \notin NIP_{RELEVANT};$$

- Un campione è detto *attivatore* quando il suo valore NIP è inferiore al 98% del valore stimato NIP_{FT} :

$$NIP_{ACTIVATOR} := \{NIP_i \mid NIP_i < 0,980 \cdot NIP_{FT}\}.$$

In particolare, $NIP_{ACTIVATOR}$ è l'insieme dei campioni che identificano l'inizio della sequenza di campioni di una ruota, che è composta da tutti i campioni consecutivamente rilevanti rilevati prima e dopo il campione attivatore. Per questo motivo, il minimo locale della forma d'onda è incluso nella sequenza. In questo modo, la fine della sequenza dei campioni di una ruota viene identificata quando la soglia di irrilevanza viene superata: NIP_M è l'ultimo elemento di:

$$S_{WHEEL} = \{NIP_1, NIP_2, \dots\} \Leftrightarrow NIP_M \in S_{WHEEL} \wedge \exists j > M : NIP_j \in NIP_{RELEVANT} \wedge j - M \leq H$$

Durante questo passo, il valore NIP_{FT} , che inizialmente è impostato al valore corrispondente a quello raggiunto in condizione di rotaia libera, viene aggiornato dinamica-

mente nel dominio della frequenza e in quello inversamente proporzionale, caratterizzati dai valori NIP. Queste due domini permettono trasformazioni bidirezionali attraverso l'equazione presentata in Sect. 2.1.

3.2. Filtering and feature extraction

The treadle acquires a sample every 125 μ s, both while a train is in transit and while the track is free. Two steps are performed to process the acquired samples and extract information to be used in the next diagnosis phases. Specifically, a first step identifies the sequence of samples $S = \{NIP_1, NIP_2, \dots, NIP_N\}$ related to each train transit, discarding noise generated by different causes (e.g., animals passing over the rail, hailstorm events). Then, a second step isolates the samples related to each wheel within each sequence associated with a train transit. To perform these steps, an algorithm is defined that estimates the oscillation frequency in the case of free track (f_{FT}), which depends on installation characteristics, weather conditions, and sensitivity of the considered oscillator (the values f_{FT} of for the two oscillators are different and should be computed independently). Specifically, referring to the NIP representation of f_{FT} (i.e., $NIP_{FT} = 7680/f_{FT}$), the NIP samples are classified as follows (for each of the two oscillators):

- A sample is termed *relevant* when its NIP value is lower than the 99.5% of the actual estimated value NIP_{FT} :

$$NIP_{RELEVANT} := \{NIP_i \mid NIP_i < 0,995 \cdot NIP_{FT}\};$$

- Two samples are termed *consecutively relevant* if they are separated by a maximum of H irrelevant samples, where H is termed *irrelevance threshold* and set to 3 in our experiments:

$$NIP_i, NIP_j \in S_{WHEEL} \Leftrightarrow NIP_i, NIP_j \in NIP_{RELEVANT} \wedge |j - i| \leq H \wedge \forall k : i < k < j, NIP_k \notin NIP_{RELEVANT};$$

- A sample is termed *activator* when its NIP value is lower than the 98% of the actual estimated NIP_{FT} value:

$$NIP_{ACTIVATOR} := \{NIP_i \mid NIP_i < 0,980 \cdot NIP_{FT}\}.$$

In particular, $NIP_{ACTIVATOR}$ is the set of samples that identify the beginning of the sample sequence of a wheel, which is composed by all the consecutively relevant samples after and before an activator sample. For this reason, the local minimum of the waveform is included in the sequence. In so doing, the end of the sample sequence of a wheel is identified when the irrelevance threshold is exceeded: NIP_M is the last element of:

$$S_{WHEEL} = \{NIP_1, NIP_2, \dots\} \Leftrightarrow NIP_M \in S_{WHEEL} \wedge \exists j > M : NIP_j \in NIP_{RELEVANT} \wedge j - M \leq H$$

mente. In particolare, un campione è classificato come *utile* se non è rilevante ed è separato da un altro campione utile da al più U campioni irrilevanti (la soglia U è pari a 4 nei nostri esperimenti). Infine, ogni volta che un campione NIP viene processato e classificato, il valore NIP_{FT} viene aggiornato calcolando il valor medio dei campioni utili correnti.

3.3. Valutazione del livello di usura attuale

In questa sezione, presentiamo un algoritmo che stima l'altezza del bordino di una ruota sulla base della forma d'onda gaussiana (Sez. 3.3.1). Per far ciò, sono definiti due algoritmi che consentono di stimare l'istante t_0 in cui la ruota effettivamente transita sul pedale (Sez. 3.3.2) e la velocità del convoglio (Sez. 3.3.3).

3.3.1. Algoritmo per la stima dell'altezza del bordino della ruota

Come già detto, il livello di usura della ruota può essere stimato a partire dall'altezza del suo bordino, che aumenta all'aumentare dello stato di usura. Il processo di usura, infatti, agisce sulle parti rotanti riducendo il diametro della ruota, calcolato come distanza dal centro della superficie rotabile. Nel far ciò, poiché il bordino non è affetto da consumo verticale in condizioni di servizio normali, tende a essere più prominente nel tempo come mostrato in Fig. 5.

Il primo passo dell'algoritmo stima il parametro che contiene informazioni riguardanti l'altezza del bordino. A tale scopo, viene utilizzato il metodo della discesa del gradiente che minimizza la seguente funzione di errore:

$$\begin{aligned} \sum_i MSE_i &= \sum_i (f_{SAMPLE(i)} - f_{OUT}(t_i))^2 \\ &= \sum_i (f_{SAMPLE(i)} - f_{FT} - \widehat{amp} \cdot e^{-k(t_i-t_0)^2})^2 \end{aligned}$$

dove t_0 può essere stimato come spiegato in Sez. 3.3.2, e k dipende da costanti e dalla velocità v del treno, che può essere stimata come verrà spiegato in Sez. 3.3.3. La funzione obiettivo calcola l'errore tra la stima temporanea della frequenza (calcolando direttamente l'equazione sulla stima \widehat{amp} di amp) e il suo valore campionato (acquisito dal pedale elettromagnetico).

Il secondo passo dell'algoritmo consiste nel ribaltare l'equazione presentata in Sez. 2.2 per stimare l'altezza del bordino \hat{h} sostituendo ad amp il valore \widehat{amp} calcolato al passo precedente, il valore della frequenza di oscillazione in caso di binario libero (f_{FT}), la sensibilità degli oscillatori che

During this step, the value of NIP_{FT} , which is initially set to the value attained in the condition of free track, is dynamically updated. Specifically, a sample is classified as useful if it is not relevant and it is separated from another useful sample by at most U irrelevant samples (where U is set to 4 in our experiments). Then, every time a NIP sample is parsed and classified, NIP_{FT} is updated and set equal to the mean value of the current useful samples.

3.3. Diagnosis of the current wear level

In this section, we present an algorithm to estimate the flange height of a wheel based on the obtained Gaussian waveforms (Sect. 3.3.1). To this end, we define two algorithms to estimate the time instant t_0 at which the wheel transits on the treadle (Sect. 3.3.2) and to estimate the train speed (Sect. 3.3.3).

3.3.1. Estimation algorithm for the wheel flange height

The wear level of a wheel can be estimated from the height of its flange, which actually increases with the wheel wear. In fact, the wear process mainly acts on the rolling part, reducing the diameter of the wheel, calculated as the distance from the center to the rolling surface. In so doing, since the flange is not affected by vertical rubbing under regular operating conditions, it tends to be more prominent over time, as shown in Fig. 5.

The first step of the algorithm estimates the parameter, which subsumes information about the flange height. To this end, the gradient descent optimization method is applied, exploiting the convexity of the following error function:

$$\sum_i MSE_i = \sum_i (f_{SAMPLE(i)} - f_{OUT}(t_i))^2$$

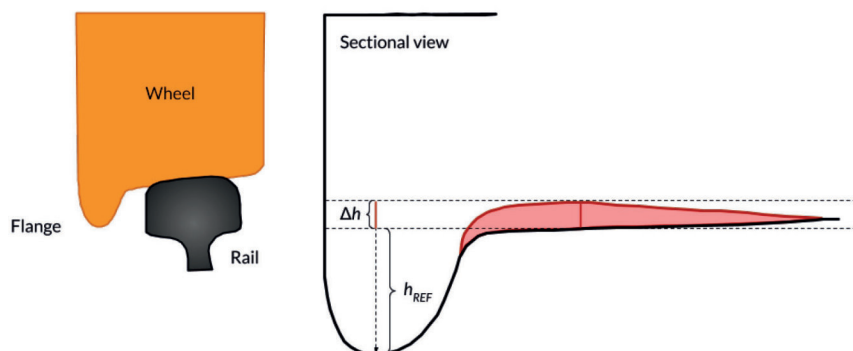


Figura 5 – La figura a sinistra mostra il processo di rotolamento della ruota lungo il binario. La figura a destra evidenzia in rosso il risultato del processo di usura che provoca un aumento Δh dell'altezza del bordino.

Figure 5 – The left picture depicts the rolling process of the wheel over the rail. The right picture highlights in red the wear process of the rolling surface, which causes a Δh increase of the flange.

campionano la curva (s), e l'altezza del bordino ideale (h_{REF}):

$$\begin{aligned} \widehat{amp} &= f_{FT} \cdot s \cdot \left(\frac{h}{h_{REF}}\right)^3 \Rightarrow \hat{h} \\ &= h_{REF} \cdot \sqrt[3]{\frac{\widehat{amp}}{f_{FT} \cdot s}} \end{aligned}$$

3.3.2. Algoritmo di stima dell'istante di tempo t_0

Il parametro t_0 rappresenta l'istante di tempo in cui il centro della ruota considerata è allineato verticalmente rispetto all'oscillatore a cui ci si riferisce. Allo stesso tempo t_0 è anche l'istante di tempo in cui la curva nel dominio della frequenza raggiunge il suo valore massimo che viceversa corrisponde all'istante di tempo in cui la stessa curva rappresentata nel dominio del tempo sui valori NIP raggiunge il valore minimo.

Tuttavia, i campioni NIP rappresentano una sequenza di dati periodici e discreti, soggetti a un errore intrinseco dovuto al periodo di campionamento, ed esacerbato sia da limitazioni hardware che dalla presenza di rumore. Per questo t_0 non può essere stimato in maniera diretta, e per ovviare a ciò, sono stati definiti due diversi metodi di stima che chiameremo nel seguito strategia A e strategia B e di cui in Fig. 6 è mostrata un'interpretazione geometrica. In particolare, la strategia A assegna a t_0 l'istante di tempo corrispondente al campione NIP con valore minimo. Invece la strategia B assegna a t_0 il valor medio delle ascisse dei due punti di intersezione di una retta di soglia ($y_{THRESHOLD}$) posizionata a distanza uguale da NIP_{FT} e da $\arg \min_t (NIP(t))$, ovvero,

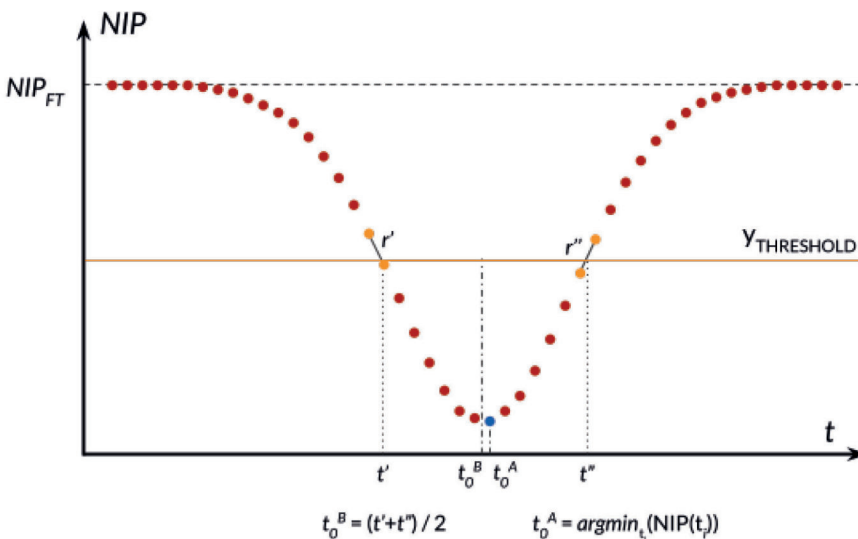


Figura 6 – Strategie per la stima di t_0 : la strategia A imposta t_0 a t_0^A , mentre la B a t_0^B .

Figure 6 – t_0 estimation strategies in action: the A strategy sets t_0 to t_0^A , while the B strategy sets t_0 to t_0^B .

$$= \sum_i (f_{SAMPLE(i)} - f_{FT} - \widehat{amp} \cdot e^{-k(t_i - t_0)^2})^2$$

where t_0 can be estimated as explained in Sect. 3.3.2, and k depends on constants and on the train speed v , which can be estimated as it will be discussed in Sect. 3.3.3. The objective function allows to quantify the error between a temporary estimation of the frequency (directly from the mathematical equation over the estimated value \widehat{amp} of amp) and its sampled value (acquired from the functioning electromagnetic treadle).

The second step of the algorithm applies the reverse detection law (see Sect. 2.2) to estimate the flange height \hat{h} by substituting amp the optimal value (\widehat{amp}), the oscillation frequency in the case of free track (f_{FT}), the sensitivity of the oscillator sampling the curve (s), and the reference flange height (h_{REF}):

$$\begin{aligned} \widehat{amp} &= f_{FT} \cdot s \cdot \left(\frac{h}{h_{REF}}\right)^3 \Rightarrow \hat{h} \\ &= h_{REF} \cdot \sqrt[3]{\frac{\widehat{amp}}{f_{FT} \cdot s}} \end{aligned}$$

3.3.2. Estimation algorithm for the time instant t_0

The parameter t_0 represents the time instant when the center of the considered wheel is vertically aligned over the considered oscillator, on an ideal line orthogonal to the plane where the treadle is installed. At the same time, t_0 is also the time instant when the curve in the frequency domain reaches its maximum value and, vice versa, the time instant when the ideal curve composed by the NIP values should reach the minimum value.

However, sampled NIP values represent a periodic and discrete data sequence, subject to an intrinsic error imposed by the sampling period, further exacerbated by hardware limits and noise. Therefore, t_0 cannot be directly estimated as the time when the minimum NIP value is attained. To overcome the issue, two different estimation methods are defined for t_0 , which are based on two strategies termed A and B, respectively, for which Fig. 6 shows a geometrical interpretation. Specifically, the A strategy sets t_0 to the time instant of the NIP sample with minimum value. Conversely, the B strategy sets t_0 to the mean value of the abscissas of the two points of intersection of a threshold line ($y_{THRESHOLD}$)

$$= NIP_{FT} - \left(\frac{Y_{THRESHOLD} (NIP_{FT} - \arg \min_{t_i} (NIP(t_i)))}{2} \right)$$

con due segmenti ottenuti da interpolazione lineare tra punti consecutivi nella curva di campioni NIP. Questi segmenti sono rispettivamente identificati come la rampa di discesa r' e quella di salita r'' . Formalmente:

$$\begin{aligned} r' &= m' \cdot t + m' \cdot t_i + NIP(t_i) \\ r'' &= m'' \cdot t + m'' \cdot t_j + NIP(t_j) \end{aligned}$$

dove:

$$m' = \frac{NIP(t_{i+1}) - NIP(t_i)}{t_{i+1} - t_i}$$

con tale che:

$$\begin{aligned} NIP(t_i) &> Y_{THRESHOLD} \\ \wedge NIP(t_{i+1}) &< Y_{THRESHOLD} \end{aligned}$$

e:

$$m'' = \frac{NIP(t_{j+1}) - NIP(t_j)}{t_{j+1} - t_j}$$

con tale che:

$$\begin{aligned} NIP(t_j) &< Y_{THRESHOLD} \\ \wedge NIP(t_{j+1}) &> Y_{THRESHOLD} \end{aligned}$$

Notare che $(t_{i+1} - t_i)$ e $(t_{j+1} - t_j)$ corrispondono al periodo di campionamento del pedale, $m' < 0$, e $m'' > 0$.

3.3.3. Stima della velocità di transito

Per quanto riguarda la stima della velocità di transito dobbiamo considerare che il tempo necessario per acquisire i campioni relativi ad una ruota è molto breve, di solito dell'ordine di pochi ms; per questa ragione, consideriamo che la velocità sia un parametro costante, e che gli effetti di accelerazione e decelerazione siano in tale intervallo trascurabili. In particolare, la stima si ottiene come il rapporto tra la distanza che intercorre tra i centri dei due oscillatori ($dist_{1,2}$) e l'intervallo di tempo necessario a percorrere tale tratto ($t_0^{osc2} - t_0^{osc1}$):

$$v_{est} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dist_{1,2}}{(t_0^{osc2} - t_0^{osc1})}$$

Il valore di $dist_{1,2}$ è noto, e nella nostra installazione corrisponde a una distanza di 133 mm. Poiché la stima della velocità dipende dalla stima dell'istante t_0 , si ottengono valori diversi a seconda della strategia scelta, come descritto in Sez. 3.3.2.

defined to be equally distant from NIP_{FT} and $\arg \min_{t_i} (NIP(t_i))$, i.e.,

$$= NIP_{FT} - \left(\frac{Y_{THRESHOLD} (NIP_{FT} - \arg \min_{t_i} (NIP(t_i)))}{2} \right)$$

with two segments obtained through linear interpolation of consecutive points in the sampled NIP curve. These segments are, respectively, identified in the descending straight line r' and in the rising straight line r'' . In detail:

$$\begin{aligned} r' &= m' \cdot t + m' \cdot t_i + NIP(t_i) \\ r'' &= m'' \cdot t + m'' \cdot t_j + NIP(t_j) \end{aligned}$$

where

$$m' = \frac{NIP(t_{i+1}) - NIP(t_i)}{t_{i+1} - t_i}$$

with i so that

$$\begin{aligned} NIP(t_i) &> Y_{THRESHOLD} \\ \wedge NIP(t_{i+1}) &< Y_{THRESHOLD} \end{aligned}$$

and

$$m'' = \frac{NIP(t_{j+1}) - NIP(t_j)}{t_{j+1} - t_j}$$

with j so that

$$\begin{aligned} NIP(t_j) &< Y_{THRESHOLD} \\ \wedge NIP(t_{j+1}) &> Y_{THRESHOLD} \end{aligned}$$

Note that $(t_{i+1} - t_i)$ and $(t_{j+1} - t_j)$ are the sampling periods of the treadle, $m' < 0$, and $m'' > 0$.

3.3.3. Estimation algorithm for the transit speed

The time needed by the treadle to acquire the samples related to a wheel is very short, usually in the order of some ms. As a consequence, the transit speed is assumed to be constant, given that acceleration and deceleration effects would be negligible. Specifically, it is estimated as the ratio of the distance between the centers of the sensors of the two oscillators (i.e., $dist_{1,2}$) and the time interval needed to transit from the first center to the second one (i.e., $t_0^{osc2} - t_0^{osc1}$):

$$v_{est} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dist_{1,2}}{(t_0^{osc2} - t_0^{osc1})}$$

The value of $dist_{1,2}$ is known (factory settings: 133 mm). Moreover, the transit speed estimation also depends on the adopted estimation strategy for the time instant t_0 as discussed in Sect. 3.3.2.

3.4. Diagnosi predittiva del livello di usura

Possiamo predire l'attuale altezza del bordino ricavandola interpolando linearmente i dati raccolti nei passaggi precedenti della ruota sul pedale (ovvero, utilizzando le stime prodotte nel tempo dal metodo di diagnostica proposto). In particolare, modelliamo il processo di usura facendo l'assunzione di un rapporto costante tra l'aumento di altezza del bordino e il numero di chilometri percorsi, senza tener conto né delle collisioni laterali dovute ad esempio alle curve presenti sulla tratta, che potrebbero istantaneamente dar luogo ad aree appiattite, né delle condizioni atmosferiche, che potrebbero accelerare o rallentare il fattore di degrado.

Formalizzando, andiamo a risolvere il seguente problema di ottimizzazione:

$$\arg \min_{\hat{h}_i} \sum_i MSE_i = 1/N \sum_i (h_{SAMPLE(i)} - \hat{h}_i)^2$$

dove $\hat{h}_i = \hat{m} t_i + \hat{q}$, $h_{SAMPLE(i)}$ è l'i-esima altezza del bordino considerata, h_i è l'i-esima altezza del bordino predetta, t_i è l'istante in cui l'i-esima altezza è stata valutata, e N è il numero di valori predetti. Nel far ciò, \hat{m} e \hat{q} definiscono la "retta di predizione", e l'altezza futura predetta è l'ordinata h_{PRED} del punto di ascissa t_{PRED} :

$$h_{PRED} = \hat{m} \cdot t_{PRED} + \hat{q}$$

4. Sperimentazione

Nell'ambito del progetto INDIGO è stata condotta una sperimentazione, in cui l'installazione originale del pedale è stata estesa in modo da svolgere anche le funzionalità di diagnostica dello stato di usura delle ruote. Il sistema comprende il pedale e tre componenti hardware/software¹:

1. una fotocamera con Optical Character Recognition (OCR), installata a fianco del binario, che permette di leggere la marcatura uniforme UIC di ogni veicolo in transito;
2. un'unità Central Logic Unit (CLU) che processa i dati acquisiti dal pedale, e li invia al server attraverso il collegamento Ethernet;
3. un'applicazione remota Remote Application Server (RAS), che esegue gli algoritmi di diagnostica e predizione (descritti in Sez. 3).

In riferimento alla normativa Italiana, per lo più equivalente a normative europee, assegniamo ai parametri sotto elencati i seguenti valori:

- il diametro ruota d è impostato al valore di una ruota nuova, ovvero, 890 mm;

¹ Ogni componente è stato sviluppato dai partner del consorzio INDIGO: OCR da QuestIT; CLU da Comesa e Isertech, RAS dal Software Technologies Lab of UNIFI-DINFO.

3.4. Predictive diagnosis of the wear levels

We predict the current height of a wheel flange by fitting its historical data (i.e., estimates provided over time by the proposed diagnosis method) with a linear function. Specifically, we model the wear process by assuming a constant ratio between the flange height increment and the number of traveled kilometers, discarding lateral wheel collisions for instance due to curves on the line, which may instantly produce flattened areas, and weather conditions, which may accelerate or decelerate the overall degradation factor. In so doing, we solve the following least squares problem:

$$\arg \min_{\hat{h}_i} \sum_i MSE_i = 1/N \sum_i (h_{SAMPLE(i)} - \hat{h}_i)^2$$

where $\hat{h}_i = \hat{m} t_i + \hat{q}$, $h_{SAMPLE(i)}$ is the i -th diagnosed flange height, h_i is the i -th predicted flange height, t_i is the time at which the i -th diagnosis is emitted, and N is the number of diagnosed/predicted values. In so doing, \hat{m} and \hat{q} define the "prediction line", and thus the predicted height is the ordinate value h_{PRED} of the point whose abscissa is the time instant t_{PRED} of interest:

$$h_{PRED} = \hat{m} \cdot t_{PRED} + \hat{q}$$

4. Experimentation

An experimentation has been conducted in the context of the INDIGO project. To this end, the original hardware prototypal installation of the electromagnetic treadle has been extended to act also as a diagnostic system about wear levels of train wheels. The system includes the treadle and three hardware/software components¹:

1. an Optical Character Recognition (OCR) camera, mounted aside of the track, reading the UIC Identification marking of each transiting vehicle;
2. a Central Logic Unit (CLU) processing the data acquired by the treadle, equipped with an Ethernet switch able to send data to the remote application server;
3. a Remote Application Server (RAS), executing the diagnosis and predictive estimation algorithms (described in Sect. 3), through specific software module implementations.

We consider the following parameter values, referring to the current Italian railway norms which are mostly compatible with the European norms:

- the wheel diameter d is set to the value of a new wheel, i.e., 890 mm;

¹ Each component developed by a partner of the INDIGO consortium: OCR by QuestIT; CLU by Comesa and Isertech; RAS by UNIFI-DINFO-STLab.

- l'altezza di riferimento per il bordino è h_{REF} pari a 28 mm;
- la distanza verticale a è pari a 48 mm.

Altri parametri dipendono dalle specifiche caratteristiche del pedale:

- Frequenza a rotaia libera f_{FT} e sensitività dipendono dalle caratteristiche degli oscillatori e quindi potrebbero variare da un oscillatore all'altro.
- La lunghezza l del sensore dipende da caratteristiche geometriche di costruzione e nel nostro caso ha un valore di 85 mm.

Si noti che l'approccio proposto può essere applicato anche con valori differenti dei parametri.

La fase di sperimentazione si è svolta inizialmente in laboratorio con un prototipo e un'installazione ad hoc (Sez. 4.1) per poi proseguire in campo in una tratta della Regione Toscana (Sez. 4.2).

4.1. Esperimenti in laboratorio

Gli esperimenti in laboratorio sono stati effettuati usando un'installazione ad hoc costituita da un pedale multifunzione elettromagnetico e un componente meccanico per la simulazione del transito di una ruota (Fig. 7). In particolare, sono stati simulati 44 passaggi usando una ruota in condizioni ottimali (ovvero, con un bordino alto h_{REF}) e 4 transiti usando una ruota con bordino consumato di altezza 31 mm, ottenendo in questo modo un database sintetico di campioni. Questi dati sono stati usati per validare l'approccio proposto di stima del livello di usura (presentato in Sez. 3.3). Non sono stati, invece, utilizzati per validare la tecnica di predizione (presentata in Sez. 3.4), dato che, per motivi tecnici, la simulazione in laboratorio (come atteso, per migliaia di chilometri percorsi) non era fattibile. L'approccio è stato dunque validato con prove in campo.

Inoltre, i transiti realizzati manualmente sull'installazione di laboratorio sono più lenti di quelli reali perciò permettono di ottenere forme d'onda gaussiane a granularità più fine e quindi una stima migliore di t_0 . Di conseguenza, non è stato necessario utilizzare entrambe le strategie di stima, che sono invece state utilizzate solo nell'ambito degli esperimenti in campo. Per quanto riguarda le prove in laboratorio è stata adottata la strategia più semplice, cioè la strategia A.

Nelle Tab. 1 e 2 sono riportati i risultati ottenuti da ciascun oscillatore utilizzando rispettivamente la ruo-

- the flange height h_{REF} is set to 28 mm;
- the vertical distance a is set to 48 mm.

Other parameters depend on the intrinsic characteristics of the treadle:

- the free track frequency f_{FT} and the sensitivity s depend on the oscillator characteristics and thus may vary from oscillator to oscillator;
- the sensor length l depends on the geometric characteristics of the oscillator and is set to 85 mm.

Notably, the proposed approach can be used with different parameter values as well.

Experiments have been performed first in laboratory using an ad hoc prototypal installation (Sect. 4.1) and then on-field considering a regional line in Tuscany (Sect. 4.2).

4.1. Laboratory experiments

Laboratory experiments have been performed using an ad hoc installation, including a specific multifunction electromagnetic treadle equipped with a mechanic component to manually perform a wheel transit (Fig. 7). Specifically, we have performed 44 transits using a wheel in optimal conditions (i.e., with a flange height equal to h_{REF}) and 4 transits using a worn wheel with a fixed flange height of 31 mm, obtaining a synthetic data set of samples. Such data have been used to validate the approach proposed in Sect. 3.3 for the diagnosis of the current wear level. Conversely, they have not been used to validate the proposed prediction technique (presented in Sect. 3.4), given that, for technical



Figura 7 – Prototipo di laboratorio.
Figure 7 – Laboratory prototype.

Tabella 1 – Table 1

Valor medio, deviazione standard e intervalli di confidenza stimati per l'altezza del bordino di una ruota con bordino alto 28 mm

Mean, standard deviation, and confidence intervals estimated for the flange height of a wheel with actual flange height equal to 28 mm

	Oscillatore I (mm) <i>Oscillator I (mm)</i>	Oscillatore II (mm) <i>Oscillator II (mm)</i>
μ	28.09	27.27
σ	0.39	0.33
Confidenza <i>Confidence</i>	Intervalli di confidenza <i>Confidence intervals</i>	
90%	[27.99, 28.19]	[27.20, 27.36]
95%	[27.97, 28.21]	[27.18, 27.37]
99%	[27.93, 28.25]	[27.14, 27.41]

ta nuova con bordino di 28 mm e quella consumata con bordino di 31 mm. Complessivamente, per entrambi gli oscillatori, l'approccio porta a intervalli di confidenza di ampiezza submillimetrica (stimati con distribuzione t di Student). Con il primo oscillatore si ottengono buoni risultati, caratterizzati da una deviazione standard molto bassa e intervalli di confidenza di ridotta ampiezza centrati sulla reale altezza del bordino. I risultati ottenuti con il secondo oscillatore sono invece meno accurati, e ciò può essere dovuto a una polarizzazione causata da un errore nella stima della sensitività dell'oscillatore, come descritto in Sez. 4.2.1.

4.2. Sperimentazione in campo

Gli esperimenti in campo sono stati realizzati utilizzando un pedale elettromagnetico multifunzione installato per un periodo di due mesi in un tratto rettilineo di una linea a doppio binario (in cui i treni transitano sul pedale prevalentemente in una direzione). In un'installazione ideale, l'installazione avrebbe dovuto essere dotata di un sistema video OCR che permette di riconoscere la marcatura che identifica i veicoli, in modo da poter identificare la ruota a cui corrispondono i dati rilevati. Tuttavia, essendo il sistema di riconoscimento OCR in fase di sviluppo al momento della sperimentazione, 16 transiti sono stati identificati manualmente selezionando una direzione di marcia ed estraendo ed incrociando dati dei passaggi giornalieri (gentilmente forniti da Trenitalia) sulla tratta di interesse, escludendo dati ambigui o non verificabili così come quelli relativi a cambi di veicoli. Il treno selezionato è un treno regionale Vivalto (mostrato in Fig. 8) che, per la sua configurazione asimmetrica, facilita il processo di riconoscimento di inversione della composizione, come descritto in Sez. 2.2. Il treno è composto dalla motrice E464.683 in spinta o al traino di sei carrozze passeggeri. I transiti sono distribuiti nella finestra temporale febbraio-marzo 2018.

Tabella 2 – Table 2

Valor medio, deviazione standard e intervalli di confidenza stimati per l'altezza del bordino di una ruota con bordino alto 31 mm

Mean, standard deviation, and confidence intervals estimated for the flange height of a wheel with actual flange height equal to 31 mm

	Oscillatore I (mm) <i>Oscillator I (mm)</i>	Oscillatore II (mm) <i>Oscillator II (mm)</i>
μ	30.94	30.44
σ	0.35	0.49
Confidenza <i>Confidence</i>	Intervalli di confidenza <i>Confidence intervals</i>	
90%	[30.57, 31.32]	[29.92, 30.96]
95%	[30.46, 31.43]	[29.76, 31.12]
99%	[30.14, 31.75]	[29.31, 31.56]

reasons, laboratory emulation of a realistic wear process (as expected for thousands of traveled kilometers) was not viable. The overall approach has been validated instead by means of on-field experiments.

Moreover, manual transits generated over the ad hoc laboratory equipment are slower than real transits over a railway track, yielding higher-granularity Gaussian waveforms and, consequently, producing a better estimation of t_0 (i.e., the time instant at which the wheel transits on the sensor). This makes ineffective and useless the comparison between the two strategies for t_0 estimation, which is thus performed through on-field experiments only. For laboratory experiments, we have adopted the simpler estimation strategy, i.e., the A strategy.

Tabs. 1 and 2 report the results obtained for each oscillator using the wheel with flange height equal to 28 mm and the worn wheel with flange height equal to 31 mm, respectively. Overall, for both oscillators, the approach yields confidence intervals of sub-millimetric width (estimated through the Student's t-distribution). On the one hand, very positive results are achieved for the first oscillator, with very low standard deviation and narrow confidence intervals almost centered around the actual flange height. Conversely, less accurate results are obtained for the second oscillator, which can be ascribed to a bias caused by an error on the estimation of the oscillator sensitivity, as it will be discussed in Sect. 4.2.1.

4.2. On-field experiments

On-field experiments have exploited a prototypal multi-function electromagnetic treadle installed for a limited time period on a two-track line (implying that trains are mainly going in one direction when passing over the treadle). In the ideal designed system, the installation should have been equipped with an OCR camera able to recognize the identification marking of locomotives and wagons in order to



Figura 8 – Treno regionale Vivalto spinto dal locomotore E464.683 (28 assi).

Figure 8 – Trenitalia Vivalto push-pull regional train consist, pushed by locomotive E464.683 (28 axles).

Il sistema di campionamento consiste di un singolo pedale elettromagnetico multifunzione installato su un binario che permette di misurare la massa metallica delle ruote da un solo lato del treno in transito. La posizione della motrice, di spinta in coda o di traino in testa, identifica univocamente il lato campionato (vedi Fig. 9). Le ruote sono etichettate con A e B a seconda che la locomotiva fosse in testa o in coda, rispettivamente. Per prima cosa, la posizione della motrice è identificata ad ogni passaggio analizzando l'impronta del treno, composta dai campioni NIP (come nell'esempio in Fig. 3 di Sez. 2.2). Poi, sono considerati solo i transiti effettuati con locomotrice in coda (in numero maggiore), quindi considerando solo le ruote etichettate con B (ovvero, B1, B2, B3 e B4 in Fig. 9).

4.2.1. Valutazione dello stato d'usura attuale

La valutazione dello stato di usura di ogni ruota dal lato B del locomotore considerato (B1, B2, B3 e B4 in Fig. 9) è effettuata come descritto in Sez. 3.3, utilizzando entrambe le strategie (A e B) nella stima dell'istante di tempo t_0 (Sez. 3.3.2) e della velocità (Sez. 3.3.3). Le Tab. 3 e 4 riportano il valor medio dell'altezza del bordino (in mm) stimata rispettivamente utilizzando la strategia A e la B. Come atteso, si nota un generale aumento dei valori nella finestra temporale considerata.

Le Tab. 5 e 6 contengono il valor medio, la deviazione standard e l'intervallo di confidenza al 90% del valore della stima dell'altezza del bordino calcolato per i transiti del locomotore nel mese di febbraio 2018 usando rispettivamente la strategia A e la strategia B. In maniera simile le Tab. 7 e

identify the wheel which sensed data should be associated to. However, the OCR camera identifier was under development when the experimentation was carried out. For this reason, we manually identified 16 transits with the same travel direction of a selected train by extracting and cross-referencing daily train data (kindly provided by Trenitalia) on the route of interest, discarding ambiguous and unverifiable data as well as rolling stock exchanges. The selected train was a Vivalto regional train (see Fig. 8), which, thanks to its asymmetric configuration, simplifies the process of recognizing rolling stock reversals, as described in Sect. 2.2. The train is composed by six passenger wagons led by the E464.683 single push-pull locomotive, transiting in the time window February-March 2018.

The sampling system consists of a single multifunction electromagnetic treadle installed on a rail, able to perceive metal mass of wheels from a single side of the transiting train. The position of the locomotive, pushing from the tail or pulling from the head, univocally identifies the sampling side (see Fig. 9). We have tagged the wheels passing over the treadle with A or B depending on whether the leading locomotive was pulling or pushing the train, respectively. First, we have identified the locomotive position at each passage by analyzing the train footprint, composed by the NIP samples (as in Fig. 3 in Sect. 2.2). Then, we have considered only transits with a trailing locomotive (providing a larger number of significative footprints), thus taking into account only the wheels tagged with B (i.e., B1, B2, B3 and B4 in Fig. 9).

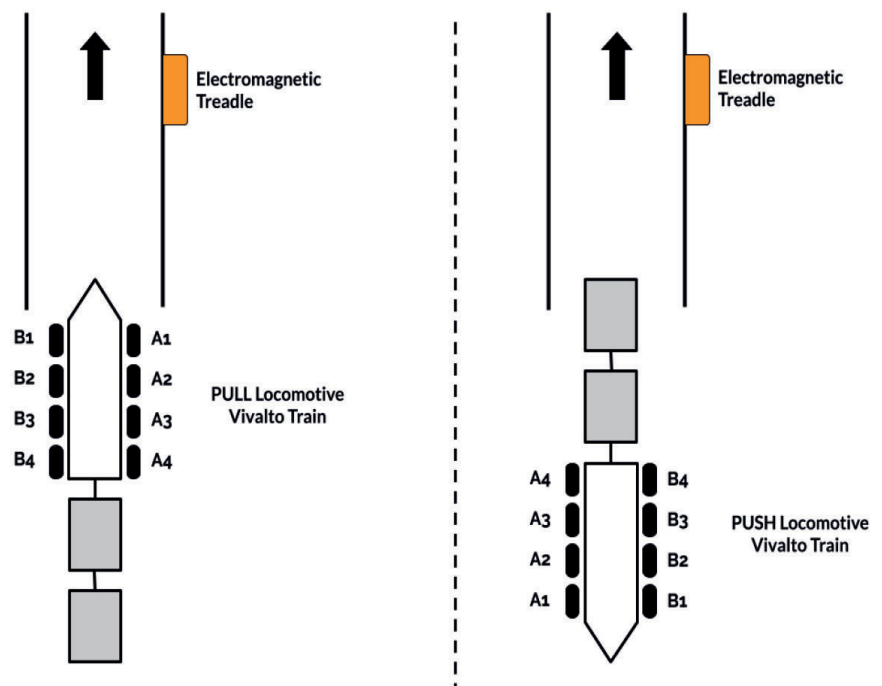


Figura 9 – Direzioni di marcia rispetto alla posizione della motrice e all'installazione in campo del pedale.

Figure 9 – Train directions, with respect to pull-push locomotive, and electromagnetic treadles in the on-field installation.

Tabella 3 – Table 3

Stime dell'altezza del bordino in mm effettuate utilizzando la strategia A
Estimation of the flange height in mm obtained using the A strategy

#	Giorno (Ora) Time Day (H)	Ruota B1 Osc I # Osc II (mm) Wheel B1 Osc I # Osc II (mm)		Ruota B2 Osc I # Osc II (mm) Wheel B2 Osc I # Osc II (mm)		Ruota B3 Osc I # Osc II (mm) Wheel B3 Osc I # Osc II (mm)		Ruota B4 Osc I # Osc II (mm) Wheel B4 Osc I # Osc II (mm)	
1_	2018-02-02 (16:41)	34.19 # 34.04	33.91 # 33.88	34.59 # 34.47	34.19 # 34.24				
2_	2018-02-02 (20:40)	34.57 # 34.31	34.23 # 34.07	34.47 # 34.31	34.19 # 34.15				
3_	2018-02-03 (09:40)	34.49 # 34.21	34.28 # 34.00	34.55 # 34.22	34.26 # 34.05				
4_	2018-02-03 (14:43)	34.01 # 33.93	34.41 # 34.16	34.14 # 33.98	34.03 # 33.80				
5_	2018-02-03 (19:11)	34.21 # 34.17	34.26 # 34.02	34.34 # 34.25	34.25 # 33.98				
6_	2018-02-07 (13:44)	34.54 # 34.34	34.08 # 33.93	34.56 # 34.39	34.31 # 34.18				
7_	2018-02-07 (17:45)	34.56 # 34.35	34.00 # 33.82	34.24 # 34.04	34.37 # 34.14				
8_	2018-02-07 (21:42)	34.22 # 34.03	34.45 # 34.18	34.55 # 34.41	34.41 # 34.21				
9_	2018-02-10 (13:42)	34.71 # 34.59	34.55 # 34.36	34.57 # 34.53	34.03 # 33.86				
10_	2018-02-19 (18:14)	34.20 # 34.00	34.07 # 33.87	34.58 # 34.50	34.15 # 33.94				
11_	2018-03-07 (10:33)	35.04 # 34.85	34.96 # 34.71	35.13 # 34.89	34.28 # 34.16				
12_	2018-03-15 (19:12)	34.86 # 34.64	34.58 # 34.44	34.43 # 34.26	34.59 # 34.38				
13_	2018-03-16 (10:32)	34.97 # 34.84	34.70 # 34.56	34.46 # 34.42	34.60 # 34.58				
14_	2018-03-16 (14:33)	34.49 # 34.47	34.48 # 34.29	34.71 # 34.64	34.41 # 34.37				
15_	2018-03-27 (16:02)	34.82 # 34.57	34.49 # 34.36	34.70 # 34.58	34.79 # 34.69				
16_	2018-03-28 (08:03)	34.52 # 34.47	34.72 # 34.59	34.63 # 34.52	34.29 # 34.22				

8 contengono le stesse misure calcolate per i passaggi avvenuti nel mese di marzo 2018 usando rispettivamente la strategia A e la B.

Per entrambi gli oscillatori e nel periodo di tempo considerato, la strategia B ha risultati migliori in termini di deviazione standard rispetto alla strategia A, il che dipende ragionevolmente da una stima più accurata dell'istante di tempo t_0 e, di conseguenza, della velocità del treno.

Inoltre, gli intervalli di confidenza di ampiezza ridotta

4.2.1. Diagnosis of the current status

Diagnosis of the wear level of each wheel on the B side of the considered locomotive (i.e., in Fig. 9, wheels B1, B2, B3, and B4) has been performed as described in Sect. 3.3, exploiting both the A and B strategies to estimate the time instant t_0 (Sect. 3.3.2) and the train speed (Sect. 3.3.3). Tabs. 3 and 4 report the mean value of the flange height (expressed in mm) estimated through the two oscillators using the A strategy and the B strategy, respectively, showing, as expected, an overall increasing trend in the considered time interval.

Tabs. 5 and 6 report mean, standard deviation, and 90% confidence interval of the flange height estimations computed for the locomotive passages in February 2018 using the A strategy and the B strategy, respectively. Similarly, Tabs. 7 and 8 report the same measures computed for the locomotive passages in March 2018 using the A strategy and the B strategy, respectively. Note that, for both oscillators and the considered months, the B strategy achieves lower standard deviation than the A strategy, which can be interpreted as a consequence of a more accurate estimation of the time instant t_0 and, consequently, of the train speed.

Furthermore, the narrow confidence intervals indicate that the treadle is able to accurately perceive the metallic mass of the flange, overcoming disturbance signals (e.g., random noise) as well as horizontal oscillation effects of the wheels. To validate this hypothesis, for each wheel and for each estimation strategy, we have computed the mean value and the standard deviation of the difference between the flange height estimations obtained through the two oscillators. Tabs. 9 and 10 report the results for the A strategy and

the B strategy, respectively, showing for all the wheels mean values ranging from 0.14 mm to 0.18 mm and a standard deviation in the order of 0.1 mm.

As a further proof of the bias affecting the estimates derived through the two oscillators, we evaluate the SPEARMAN'S Rank [6] for the difference between the flange height estimates obtained through the two oscillators: the Spearman's Rank provides a measure of the correlation among the obtained estimate sequences. Tab. 11 reports results for both the A strategy and the B strategy, pointing out a very

indicano che il pedale è in grado di rilevare in modo accurato la massa metallica del bordino nonostante possibili disturbi (p.e., rumore bianco) così come risultano trascurabili gli effetti oscillatori orizzontali della ruota. Per validare questa ipotesi, per ogni ruota e per ogni strategia di stima, sono calcolati il valor medio e la deviazione standard della differenza tra le altezze del bordino calcolate dai due oscillatori. Le Tabb. 9 e 10 riportano i risultati nel caso delle due strategie (A e B rispettivamente) e mostrano per tutte le ruote un valor medio tra 0.14 mm to 0.18 mm con una deviazione standard inferiore a 0.1 mm.

Come prova ulteriore della polarizzazione presente tra le stime dei due oscillatori, calcoliamo l'indice SPEARMAN [6] sulle differenze delle altezze del bordino rilevate dai due oscillatori. L'indice di SPEARMAN costituisce una misura della correlazione tra le sequenze di stime effettuate. In Tab. 11 è riportato il risultato per le strategie A e B; si può notare una forte correlazione (da 0.83 a 0.98) su tutte le ruote e per entrambi le strategie. Di conseguenza possiamo concludere che i risultati attesi sono influenzati da un bias tra le stime derivate dai campioni rilevati da ognuno dei due oscillatori, con stime maggiori per il primo oscillatore e minori per il secondo. Questa differenza è dovuta ad un errore nel processo di calibrazione della sensitività degli oscillatori (si ricorda che la sensitività è uno dei valori costanti utilizzati per il calcolo dell'ampiezza della funzione gaussiana e di conseguenza per la stima dell'altezza del bordino). Il processo di calibrazione degli oscillatori è avvenuto infatti in laboratorio, senza tener conto delle caratteristiche di installazione in campo come ad esempio le caratteristiche ambientali.

4.2.2. Diagnostica predittiva dello stato di usura

Assumiamo che i chilometri percorsi dal treno in un intervallo di tempo di durata data siano costanti nel tempo. Questa è un'assunzione ragionevole per i treni regionali sulla rete italiana, in particolare per periodi di tempo di media o lunga durata, dato che le tratte dei treni sono solitamente ripetute nel corso della settimana. Di conseguenza assumiamo che l'usura delle ruote sia lineare e aumenti nel

Tabella 4 – Table 4

Stime dell'altezza del bordino in mm effettuate utilizzando la strategia B
Estimation of the flange height in mm obtained using the B strategy

#	Giorno (Ora) Time Day (H)	Ruota B1 Osc I # Osc II (mm) Wheel B1 Osc I # Osc II (mm)		Ruota B2 Osc I # Osc II (mm) Wheel B2 Osc I # Osc II (mm)		Ruota B3 Osc I # Osc II (mm) Wheel B3 Osc I # Osc II (mm)		Ruota B4 Osc I # Osc II (mm) Wheel B4 Osc I # Osc II (mm)	
1_	2018-02-02 (16:41)	34.46 # 34.32	34.37 # 34.35	34.60 # 34.48	34.17 # 34.21				
2_	2018-02-02 (20:40)	34.60 # 34.33	34.29 # 34.12	34.61 # 34.44	34.38 # 34.33				
3_	2018-02-03 (09:40)	34.62 # 34.33	34.40 # 34.13	34.71 # 34.37	34.43 # 34.21				
4_	2018-02-03 (14:43)	34.47 # 34.40	34.36 # 34.11	34.62 # 34.47	34.32 # 34.08				
5_	2018-02-03 (19:11)	34.20 # 34.16	34.19 # 33.95	34.43 # 34.34	34.13 # 33.86				
6_	2018-02-07 (13:44)	34.56 # 34.36	34.36 # 34.22	34.55 # 34.39	34.32 # 34.19				
7_	2018-02-07 (17:45)	34.45 # 34.25	34.50 # 34.29	34.72 # 34.51	34.39 # 34.17				
8_	2018-02-07 (21:42)	34.54 # 34.36	34.49 # 34.22	34.60 # 34.46	34.36 # 34.17				
9_	2018-02-10 (13:42)	34.71 # 34.59	34.50 # 34.30	34.63 # 34.60	34.28 # 34.10				
10_	2018-02-19 (18:14)	34.49 # 34.28	34.28 # 34.10	34.55 # 34.46	34.48 # 34.25				
11_	2018-03-07 (10:33)	34.74 # 34.55	34.67 # 34.42	34.86 # 34.61	34.54 # 34.41				
12_	2018-03-15 (19:12)	34.75 # 34.53	34.64 # 34.49	34.70 # 34.52	34.59 # 34.39				
13_	2018-03-16 (10:32)	35.03 # 34.91	34.70 # 34.57	34.85 # 34.81	34.73 # 34.72				
14_	2018-03-16 (14:33)	34.64 # 34.62	34.66 # 34.46	35.03 # 34.95	34.66 # 34.62				
15_	2018-03-27 (16:02)	34.96 # 34.71	34.58 # 34.44	34.81 # 34.69	34.96 # 34.47				
16_	2018-03-28 (08:03)	34.66 # 34.61	34.50 # 34.39	34.81 # 34.70	34.66 # 34.45				

strong correlation (ranging from 0.83 to 0.98) for all the wheels and for both strategies. Therefore, we conclude that the obtained results are affected by a bias error between the estimates derived from the samples of the two oscillators, causing estimates derived through the first oscillator to be larger than those derived through the second one. We expect and explain this difference as an error in the calibration process of the sensitivity of the oscillators, which is one of the constant parameters relating the estimated amplitude of the Gaussian curve with the estimated flange height. In-

Tabella 5 – Table 5

Valore medio, deviazione standard e intervallo di confidenza al 90% delle stime dell'altezza del bordino (in mm) per i transiti avvenuti in febbraio 2018, ottenuti usando la strategia A

Mean, standard deviation and 90% confidence interval of the flange height estimations (expressed in mm) for passages in February 2018, obtained using the A strategy

	Ruota B1 Osc I # Osc II Wheel B1 Osc I # Osc II	Ruota B2 Osc I # Osc II Wheel B2 Osc I # Osc II	Ruota B3 Osc I # Osc II Wheel B3 Osc I # Osc II	Ruota B4 Osc I # Osc II Wheel B4 Osc I # Osc II
μ	34.37 # 34.20	34.22 # 34.03	34.46 # 34.31	34.22 # 34.05
σ	0.23 # 0.20	0.21 # 0.17	0.16 # 0.19	0.13 # 0.15
Intervallo di confidenza 90%	[34.24, 34.50] #	[34.10, 34.34] #	[34.36, 34.55] #	[34.15, 34.29] #
Confidence interval 90%	[34.08, 34.31]	[33.93, 34.15]	[34.20, 34.42]	[33.97, 34.15]

Tabella 6 – Table 6

Valore medio, deviazione standard e intervallo di confidenza al 90% delle stime dell'altezza del bordino (in mm) per i transiti avvenuti in febbraio 2018, ottenuti usando la strategia B

Mean, standard deviation and 90% confidence interval of the flange height estimations (expressed in mm) for passages in February 2018, obtained using the B strategy

	Ruota B1 Osc I # Osc II Wheel B1 Osc I # Osc II	Ruota B2 Osc I # Osc II Wheel B2 Osc I # Osc II	Ruota B3 Osc I # Osc II Wheel B3 Osc I # Osc II	Ruota B4 Osc I # Osc II Wheel B4 Osc I # Osc II
μ	34.51 # 34.34	34.37 # 34.18	34.60 # 34.45	34.33 # 34.16
σ	0.14 # 0.11	0.10 # 0.12	0.08 # 0.07	0.11 # 0.13
Intervallo di confidenza 90%	[34.43, 34.59] #	[34.31, 34.43] #	[34.55, 34.65] #	[34.30, 34.39] #
Confidence interval 90%	[34.27, 34.40]	[34.11, 34.25]	[34.41, 34.50]	[34.10, 34.23]

Tabella 7 – Table 7

Valore medio, deviazione standard e intervallo di confidenza al 90% delle stime dell'altezza del bordino (in mm) per i transiti avvenuti in marzo 2018, ottenuti usando la strategia A

Mean, standard deviation and 90% confidence interval of the flange height estimations (expressed in mm) for passages in March 2018, obtained using the A strategy

	Ruota B1 Osc I # Osc II Wheel B1 Osc I # Osc II	Ruota B2 Osc I # Osc II Wheel B2 Osc I # Osc II	Ruota B3 Osc I # Osc II Wheel B3 Osc I # Osc II	Ruota B4 Osc I # Osc II Wheel B4 Osc I # Osc II
μ	34.78 # 34.64	34.65 # 34.50	34.67 # 34.55	34.50 # 34.40
σ	0.23 # 0.18	0.18 # 0.16	0.25 # 0.21	0.20 # 0.20
Intervallo di confidenza 90%	[34.59, 34.97] #	[34.51, 34.81] #	[34.47, 34.88] #	[34.33, 34.66] #
Confidence interval 90%	[34.50, 34.78]	[34.36, 34.62]	[34.37, 34.72]	[34.2, 34.57]

deed, the calibration process of the oscillators took place in laboratory and did not take into account installation features and inaccuracies peculiar to the railway field, such as environmental physical characteristics.

4.2.2. Predictive diagnosis

We assume that the kilometers traveled by the train in a time interval of a given duration are constant over time, which is a reasonable assumption for regional trains in the Italian railway network, especially for medium and long periods of time, given that train paths are usually repeated every week. Therefore, we assume that wheel wear linearly increases with time. According to this, the proposed prediction technique performs a linear interpolation of historical diagnostic data over time, considering the first 14 transits as the training set and the last 2 transits as the test set to be compared with the set of predicted values. Fig. 10 shows the prediction results for the wheels on the B side of the E464.683 locomotive, highlighting the difference between the predicted flange heights and the corresponding test set values. As a major result, all the interpolated lines in Figs. 2-9 have a positive linear coefficient, pointing out the ability to perceive wear levels of a wheel even in the order of some decimal of mm.

Tab. 12 reports the absolute error between the predicted flange heights and the corresponding test set values (note that given the temporal proximity of the predicted time events, the error measure has been calculated between the predicted value, which is almost the same for the two tested instants, and the mean of the test set values). Tab. 12 also reports the Root Mean Square Error (RMSE) calculated for the overall set of wheels for each oscillator and each strategy. Notably, the RMSE is never larger than 0.2 mm, providing a relevant result that, if confirmed in a wider experimentation, would enable the applicability of the technique within decision support tools. Moreover, also in this case, experimental results show better performance in terms of RMSE for the B strategy with respect to the A strategy.

tempo. In accordo con questa assunzione, la tecnica di predizione proposta si basa sull'interpolazione lineare di dati diagnostici storici, considerando cioè i primi 14 transiti come training set e gli ultimi 2 come test set su cui verificare i valori predetti. In Fig. 10 si mostrano i risultati della predizione per le ruote del lato B del locomotore E464.683. Si evidenzia la differenza tra il valore predetto e il corrispondente valore nel test set. Inoltre, tutte le rette di interpolazione hanno un coefficiente angolare positivo e ciò è dovuto alla capacità di rilevare il livello di usura della ruota anche se dell'ordine di pochi decimi di mm.

In Tab. 12 è contenuto l'errore assoluto tra il valore predetto dell'altezza del bordino e il valore corrispondente nel test set (notare che data la vicinanza nel tempo degli eventi predetti l'errore è stato calcolato tra il valore stimato e il valore medio dei due valori nel test set). In Tab. 12 viene mostrato anche il Root Mean Square Error (RMSE) calcolato per l'intero insieme delle ruote per ogni oscillatore e su ognuna delle due strategie. Da notare che RMSE non è mai superiore a 0.2 mm, il che rappresenta un ottimo risultato che, se confermato in una sperimentazione di scala più ampia, abilita l'applicabilità della tecnica all'interno di strumenti di

Tabella 8 – Table 8
Valore medio, deviazione standard e intervallo di confidenza al 90% delle stime dell'altezza del bordino (in mm) per i transiti avvenuti in marzo 2018, ottenuti usando la strategia B

Mean, standard deviation and 90% confidence interval of the flange height estimations (expressed in mm) for passages in March 2018, obtained using the B strategy

	Ruota B1 Osc I # Osc II Wheel B1 Osc I # Osc II	Ruota B2 Osc I # Osc II Wheel B2 Osc I # Osc II	Ruota B3 Osc I # Osc II Wheel B3 Osc I # Osc II	Ruota B4 Osc I # Osc II Wheel B4 Osc I # Osc II
μ	34.80 # 34.65	34.62 # 34.46	34.84 # 34.71	34.60 # 34.51
σ	0.16 # 0.14	0.07 # 0.06	0.11 # 0.15	0.08 # 0.13
Intervallo di confidenza 90% Confidence interval 90%	[34.66, 34.93] # [34.54, 34.77]	[34.56, 34.68] # [34.41, 34.51]	[34.75, 34.93] # [34.59, 34.84]	[34.53, 34.66] # [34.40, 34.62]

On the one hand, on-field experiments subtend some threats to validity:

- i) Relatively small training and test sets.
- ii) A short-lived experimental phase implying wear levels in the order of some decimal of mm.
- iii) Lack of a ground truth consisting of real measurements of wheels flange heights.
- iv) Biased diagnoses of actual flange heights (due to calibration errors for the evaluation of sensitivities of oscillators).

Other threats to validity lie in the assumptions of linearity of wheel wear and absence of lateral flange wear.

On the other hand, the fact that the approach can be put into practice even if monitored trains are not subject to recurrent measurements permits anyway to assess feasibility and effectiveness of the proposed solution. Moreover, the obtained results appear promising and encourage further investigation and experimentation, which are undoubtedly necessary in order to comprehensively validate the proposed approach.

Tabella 9 – Table 9

Valore medio e deviazione standard delle differenze delle stime dell'altezza del bordino ottenute con i due oscillatori usando la strategia A, ovvero, $(\hat{h}_A^{osc_1} - \hat{h}_A^{osc_2})$
Mean value and standard deviation of the difference between the flange height estimations obtained through the two oscillators using the A strategy, i.e., $(\hat{h}_A^{osc_1} - \hat{h}_A^{osc_2})$

	Ruota B1 Wheel B1	Ruota B2 Wheel B2	Ruota B3 Wheel B3	Ruota B4 Wheel B4
μ	0.16 mm	0.18 mm	0.14 mm	0.14 mm
σ	0.08 mm	0.06 mm	0.07 mm	0.09 mm

Tabella 10 – Table 10

Valore medio e deviazione standard delle differenze delle stime dell'altezza del bordino ottenute con i due oscillatori usando la strategia B, ovvero, $(\hat{h}_B^{osc_1} - \hat{h}_B^{osc_2})$
Mean value and standard deviation of the difference between the flange height estimations obtained through the two oscillators using the B strategy, i.e., $(\hat{h}_B^{osc_1} - \hat{h}_B^{osc_2})$

	Ruota B1 Wheel B1	Ruota B2 Wheel B2	Ruota B3 Wheel B3	Ruota B4 Wheel B4
μ	0.16 mm	0.18 mm	0.14 mm	0.17 mm
σ	0.08 mm	0.07 mm	0.08 mm	0.12 mm

Tabella 11 – Table 11

Indice di SPEARMAN calcolato per la differenza tra l'altezza del bordino valutata dai due oscillatori utilizzando le strategie A e B

SPEARMAN's Rank computed for the difference between the flange height estimations obtained through the two oscillators

	Ruota B1 Wheel B1	Ruota B2 Wheel B2	Ruota B3 Wheel B3	Ruota B4 Wheel B4
Strategia A A strategy	0.93	0.98	0.92	0.84
Strategia B B strategy	0.87	0.93	0.83	0.89

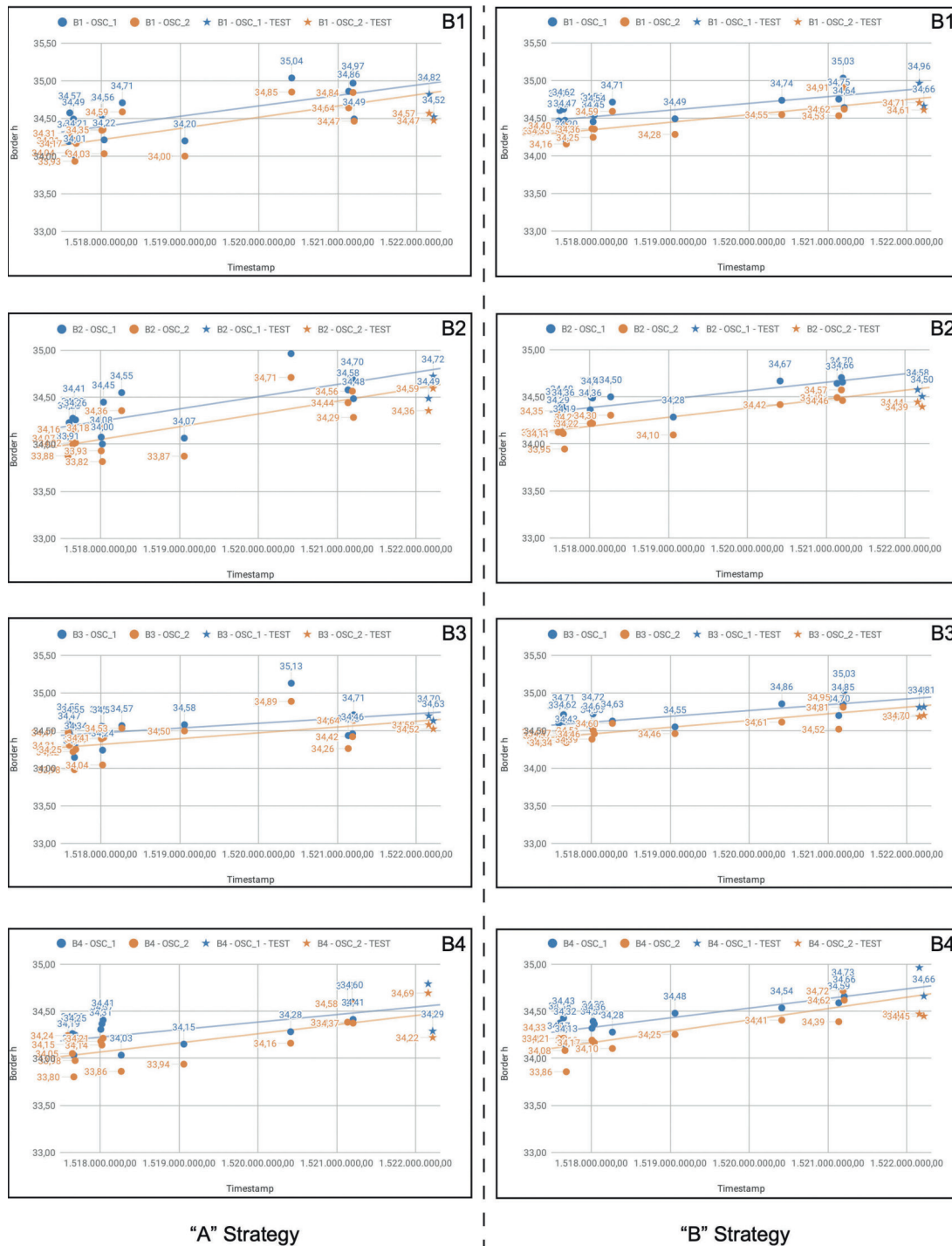


Figura 10 – Risultati di predizione: sulle ascisse gli istanti di tempo dei transiti rilevati; sulle ordinate le altezze del bordo predette; in blu i dati dall'oscillatore 1 e in arancione quelli dell'oscillatore 2; i punti neri rappresentano i campioni di training; le stelle rappresentano i campioni di test; la retta di interpolazione sulla base della quale è effettuata la predizione è disegnata sui dati di training; la distanza verticale tra la retta di interpolazione e i campioni di test è la misura dell'errore.

Figure 10 – Prediction results: the x-axis reports the time of the detected passages; the y-axis reports the estimated wheel flange height; blue is used for oscillator 1 and orange for oscillator 2; black points represent training samples; stars represent test samples; the interpolation line which the prediction is based on is depicted on the training data; the vertical distance from the interpolation line to the test samples represents the error.

supporto alle decisioni. Infine, anche in questo caso, i risultati sperimentali sono migliori in termini di RMSE per la strategia B rispetto alla strategia A.

Da una parte, alcuni aspetti attenuano la validità dei risultati della sperimentazione sul campo, in particolare:

- i) training e test set relativamente piccoli;
- ii) fase sperimentale breve con conseguente usura limitata;
- iii) mancanza di confronto con valori reali delle altezze del bordino;
- iv) bias di diagnosi delle altezze rilevate (dovuto a calibrazione non ottima).

Altre minacce alla validità risiedono nelle ipotesi di linearità dell'usura delle ruote e di assenza di usura laterale delle flange.

Dall'altra parte, gli esperimenti condotti validano le ipotesi di lavoro, e il fatto che l'approccio possa essere applicato anche quando i treni monitorati non sono sottoposti a misurazioni ricorrenti aggiunge valore, e permette di attestare la fattibilità e l'efficacia della soluzione proposta. I risultati ottenuti incoraggiano ulteriori investigazioni e sperimentazioni, che indubbiamente appaiono necessari per una piena validazione dell'approccio proposto.

5. Conclusioni e sviluppi futuri

Questo articolo ha presentato una tecnica per la stima del livello di usura delle ruote di treni non strumentati con sensori ad hoc. A tal scopo, è stato considerato un dispositivo che estende il sistema di terra a basso costo e basso impatto di installazione. Il dispositivo ha la funzione primaria di rilevazione dello stato di libero della tratta, ma rileva e utilizza dati estratti dai transiti del materiale rotabile. In particolare, ad ogni transito viene estratta una sequenza di campioni che formano una forma d'onda gaussiana dalla quale è possibile estrarre informazioni sull'altezza del bordino delle ruote, parametro utile alla stima dello stato di usura di queste ultime. La relazione lineare tra l'altezza del bordino e la distanza in chilometri percorsa dal treno permette di definire un algoritmo per la predizione dell'usura delle ruote. Sono state effettuate due fasi di sperimentazione, una in laboratorio e l'altra sul campo, con risultati incoraggianti che dimostrano la possibilità di rilevare variazioni sullo stato di usura delle ruote anche da aumenti submillimetrici dell'altezza del bordino.

Questi risultati portano a ritenere necessarie ulteriori sperimentazioni sul campo, che permetterebbero di costruire un ampio insieme di campioni associati alle corrispondenti altezze del bordino, e di validare a pieno le ipotesi di lavoro, in particolare quella circa la linearità dell'usura rispetto ai chilometri percorsi, che appare comunque ragionevole nel contesto d'uso (non linearità si presentano tipicamente in condizioni di usura elevata). Un simile insieme di impronte potrebbe essere in futuro utilizzato anche per identificare il singolo treno, senza bisogno di alcun sistema esterno di riconoscimento. In una

Tabella 12 – Table 12
RMSE calcolato per ogni oscillatore usando le strategie A e B
RMSE calculated for each oscillator using the A strategy and the B strategy

	A Strategia Strategy A		B Strategia Strategy B	
	Oscillatore I Oscillator I	Oscillatore II Oscillator II	Oscillatore I Oscillator I	Oscillatore II Oscillator II
Ruota B1 Wheel B1	0.30	0.32	0.08	0.11
Ruota B2 Wheel B2	0.19	0.14	0.22	0.17
Ruota B3 Wheel B3	0.07	0.09	0.12	0.13
Ruota B4 Wheel B4	0.02	0.02	0.06	0.21
RMSE RMSE	0.18	0.18	0.14	0.16

5. Conclusions and future work

This paper addresses a technique for the estimation of the wear level of wheels of non-instrumented trains. To this end, a wayside system for axle detection is extended with low cost and low installation impact. This device exploits data produced by passages of rolling stock over a multifunction electromagnetic treadle. Specifically, passages of wheels over the treadle generate Gaussian train footprints providing information about wheel flange height, which can be used to estimate wheel wear level. Then, the linear relation between the wheel flange height and the distance traveled by the train enables the definition of an algorithm for prediction of the wheel consumption. Laboratory and on-field experiments have achieved encouraging results, showing the ability to perceive the actual and future wear levels of train wheels, also in a sub-millimetric order.

This outcome stimulates further investigations through a wider on-field experimentation in order to collect a larger and supervised data set (containing wheel samples associated with the corresponding wheel flange height) and to comprehensively validate the considered assumptions, in particular the linearity of wheel wear with respect to the travelled distance, which anyhow appears reasonable for the context of use (non-linearity typically appears with severe worn conditions). As a future development, such footprint database could be exploited to identify each train from a sampled trace, avoiding external train recognition systems. Moreover, to minimize the detected biased error, on-field calibration of the sensitivity of the oscillators should be performed.

futura campagna sperimentale sarà inoltre importante effettuare una calibrazione in campo della sensitività degli oscillatori così da ridurre il bias tra le due rilevazioni.

Il potenziale di mercato della soluzione proposta deriva dalle caratteristiche intrinseche del dispositivo sviluppato, che può funzionare allo stesso tempo come conta-assi e come modulo hardware/software economico e flessibile. L'assunzione di saper identificare ogni ruota transite rende questa soluzione particolarmente adatta a linee locali chiuse, come linee periferiche, metro e tranvie, dove circola sempre lo stesso materiale rotabile, facilmente identificabile, sugli stessi binari. Inoltre, in questo segmento di mercato sono particolarmente diffusi sistemi di terra conta-assi, basati su pedali come quello illustrato. I pedali installati a scopo di rilevazione di occupazione di tratte ferroviarie sono tipicamente certificati con Safety Integrity Level (SIL) 4: semplicemente raccogliendo in parallelo i campioni NIP si potrà supportare la predizione dello stato di usura delle ruote, senza impatto sulla certificazione della safety dei pedali.

6. Ringraziamenti

Si ringraziano la Direzione Tecnica e la Direzione Regionale Toscana di Trenitalia per aver gentilmente concesso dati sui transiti avvenuti sulla linea. Si ringraziano Andrea RINDI e Enrico MELI per i loro utili suggerimenti.

Questo lavoro è stato finanziato dalla Regione Toscana nell'ambito del progetto POR FESR 2014-2020 INDIGO "Sviluppo di un dispositivo INtelligente per la DIagnosi e il monitoraGiO di sistemi ferroviari".

The market potential of the proposed scheme derives from the intrinsic features of the electromagnetic treadle, which can act at the same time as a multifunction electromagnetic treadle and as a diagnostic hardware/software module, thus enabling low-cost, flexible, and suitable solutions to support just-in-time maintenance techniques also on non-instrumented trains. The needed assumption to be able to know the identity of each passing wheel makes this solution particularly suitable for "closed" local lines, such as secondary lines, metros, and tramway lines, where the same, easily identifiable, consists pass over and over on the same tracks. Moreover, the proposed solution appears more promising for this market segment also due to the fact that such lines typically already rely on trackside systems equipped with axle counters, based on sensors like the considered electromagnetic treadle. Existing treadles, already installed for occupancy detection, are devices typically certified for Safety Integrity Level (SIL) 4: they can be easily instrumented to collect data for diagnostic analysis, with no interference on safety certification.

6. Acknowledgements

We thank the Trenitalia Technical Direction and the Trenitalia Tuscany Region Direction for the availability of data on passages of trains. We thank Andrea RINDI and Enrico MELI for their valuable remarks.

This work has been funded by the Tuscany Region project POR FESR 2014-2020 INDIGO "Development of an intelligent device for diagnosis and monitoring of railway systems".

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] J. MOUBRAY, (1997), "Reliability centered maintenance". Industrial Press.
- [2] E. RUJITERS, D. GUCK, M. VAN NORT, M. STOELINGA, (2016), "Reliability-centered Maintenance of the Electrically Insulated Railway Joint via Fault Tree Analysis: A practical experience report".
- [3] A. ALEMI, F. CORMAN, G. LODEWIJKS, (2017), "Condition monitoring approaches for the detection of railway wheel defects". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 231(8) 961-981.
- [4] M. HÖJER, E. BERGSETH, U. OLOFSSON, R. NILSSON, Y. LYU, "A Noise Related Track Maintenance Tool for Severe Wear Detection of Wheel-Rail Contact".
- [5] J. DE ARIZON, O. VERLINDEN, P. DEHOMBREUX, (2007), "Prediction of wheel wear in urban railway transport: comparison of existing models".
- [6] L. MYERS, M. J. SIROIS, (2004), "SPEARMAN correlation coefficients, differences between". Encyclopedia of statistical sciences, 12. 2004.
- [7] <http://www.selectravision.com/wheels.php>.
- [8] C. PENNINGTON, O. EVSTAFYEVA, (2020), "Towards 'Intelligent Infrastructure'", Tramways and Urban Transport, pp. 15-19.
- [9] B.O. KAMPER, (2006), "Prédiction de l'usure du profil des roues", Le Rail, 125, 30-32. 2006.
- [10] J.P. BAUMGARTNER, (2001), "Prices and costs in the railway sector". Ecole Polytechnique Federale de Lausanne.

- [11] B. GIRSTMAIR, A. HAIGERMOSER, J. ROSCA, (2017), “*Combination of Data-driven Feature Selection Methods with Domain Knowledge for Diagnosis of Mechanical Systems*”.
- [12] A. LUGARÀ, (2018), “*La manutenzione predittiva ferroviaria ed il ruolo abilitante dell’“Internet of Things” - The railway predictive maintenance and the enabling role of the “Internet of Things”*”. *Ingegneria Ferroviaria*, 434-463, 5.
- [13] A. SHEBANI, S. IWNICKI, (2018), “*Prediction of wheel and rail wear under different contact conditions using artificial neural networks*”. *Wear*, 406, 173-184.
- [14] G. TAO, Z. WEN, X. ZHAO, X. JIN, (2016), “*Effects of wheel–rail contact modelling on wheel wear simulation*”. *Wear*, 366, 146-156.
- [15] T. JENDEL, (2002), “*Prediction of wheel profile wear - comparisons with field measurements*”. *Wear*, 253(1-2), 89-99.
- [16] F. VELLETRANI, R. LICCIARDELLO, M. BRUNER, (2020), “*Intelligent wheelsets for the trains of the future. The role of in-service wheel-rail force measurement*”. *Ingegneria Ferroviaria*, 701-725, 10.
- [17] A. LUGARÀ, A. BRUCIAFREDDO, (2019), “*La manutenzione predittiva dei ponti ferroviari attraverso un framework basato sull’Internet of Things. Una proposta di implementazione - The predictive maintenance of railway bridges through an Internet of Things framework*”. *Ingegneria Ferroviaria*, 743-782, 10.

