

La manutenzione di un veicolo ferroviario in base al monitoraggio dei consumi ed ai ritorni di esperienza

Maintenance of a railway vehicle through consumption monitoring and feedback of field information

Ing. Guglielmo ANASTASI^(*)
Ing. Alessandro BARTOLINI^(**)
Ing. Enrico Pasquale MARINO^(*)
Prof. Ing. Giuseppe SCIUTTO^(**)

Sommario - La ricerca continua di maggiore competitività nel campo della manutenzione di veicoli ferroviari comporta l'affiancamento alla tradizionale manutenzione preventiva, organizzata su scadenze programmate, con le più innovative tecniche di manutenzione su condizione, le quali mediante il monitoraggio continuo e l'introduzione di opportuni contatori forniscono le informazioni sul profilo di missione dei componenti più critici.

La determinazione dei contatori e dei criteri d'intervento per la manutenzione su condizione richiede l'analisi degli input provenienti dal campo estratti dai rapporti degli interventi di manutenzione i quali contengono misure e altri dati "quantitativi" utili a descrivere l'andamento dei consumi.

Questo lavoro è centrato sull'analisi dei consumi dei materiali usurabili che devono essere rabboccati o sostituiti durante ogni intervento manutentivo. È molto importante monitorare il loro tasso di usura in quanto alcuni di questi materiali rappresentano una rilevante voce di costo, inoltre il loro consumo è spesso funzione del profilo di missione del veicolo. La misura dei parametri avviene in occasione degli interventi di ispezione periodica dei veicoli. Si rilevano dati geometrici e meccanici tesi a stabilire se le condizioni di usura sono ancora compatibili con l'esercizio senza anomalia, almeno fino al prossimo intervento programmato. Per svolgere questa analisi sono stati visionati i rapporti di officina relativi a tre anni di manutenzione di 30 locomotive E483 per treni merci impiegate da alcune imprese ferroviarie private. In questo modo sono stati calcolati i consumi medi degli strisciamenti dei pantografi, dell'olio per riduttori, dell'acqua distillata per batterie, della sabbia e del grasso per l'impianto unghibordo.

Summary - Continuous search for greater competitiveness in the field of maintenance of railway vehicles involves the support of traditional preventive maintenance, organised on scheduled dates, with the most innovative state-of-the-art condition-based maintenance techniques, that provide information on the mission profile of the most critical components through continuous monitoring and introduction of appropriate counters.

The determination of the counters and of intervention policies for condition-based maintenance requires the analysis of inputs from the field extracted from maintenance operations reports which contain "quantitative" measures and other data useful to describe the consumption patterns.

This work is centred on the analysis of consumable materials subject to wear and tear that need to be replenished or replaced during any maintenance work. It is very important to monitor their wear rate as some of these materials represent a significant cost item, their consumption is also often a function of vehicle mission profile. The measurement of parameters takes place on the occasion of the periodic vehicle inspection. Mechanical and geometrical data are taken intended to determine whether the conditions of wear are still compatible with operation without anomaly, at least until the next planned intervention. To carry out this analysis, workshop reports have been viewed relating to three years' maintenance of 30 E483 locomotives for cargo trains used by some private railway companies. In this way the average consumption of the pantographs' strips, oil for gear reducers, distilled water for batteries, sand and grease for the wheel flange lubrication system were calculated.

The results obtained allow validating the correctness of

^(*) Bombardier Transportation S.p.A.

^(**) NITEL – DITEN Università di Genova.

^(*) Bombardier Transportation S.p.A.

^{(**) NITEL – DITEN University of Genoa.}

OSSEVATORIO

I risultati ottenuti permettono di validare la correttezza dell'impostazione del piano di manutenzione preventiva e di suggerire modifiche. Inoltre l'analisi del rateo di consumo fornisce informazioni importanti sullo stato di salute di alcuni componenti fondamentali. Infine, mediante l'integrazione di questi risultati con le letture provenienti dal monitoraggio continuo si completa l'evoluzione della trama manutentiva e si sfruttano le informazioni indicanti la vita residua dei componenti direttamente influenzati dall'usura dei materiali analizzati.

1. Introduzione: "stato dell'arte" manutenzione (definizioni e quadro normativo) e piano di manutenzione

La manutenzione è definita, attraverso la norma UNI EN 13306 del 2003, come "combinazione di tutte le azioni tecniche, amministrative e gestionali, previste durante il ciclo di vita di un'entità, destinate a mantenerla o riportarla in uno stato in cui possa eseguire la funzione richiesta" [1].

Una conseguenza della liberalizzazione del mercato ferroviario europeo è stata la nascita di aziende specializzate nella manutenzione.

Quindi le strategie e le politiche manutentive vengono perfezionate e rinnovate di continuo. Tradizionalmente la maggioranza delle azioni di manutenzione è di tipo correttivo o preventivo-programmato [2].

Le strategie manutentive si possono distinguere in due macro-categorie di interventi manutentivi, come si può vedere nella fig. 1:

- manutenzione correttiva;
- manutenzione preventiva.

Le procedure di manutenzione più tradizionali come quelle sopra riportate stanno lasciando il posto a strategie innovative come la manutenzione su condizione o "*Condition Based Maintenance*".

Questa strategia innovativa necessita di un monitoraggio più fitto del sistema per fornire una stima accurata della salute, o dello stato, di ogni componente/sistema su cui basare la decisione di procedere alle attività di intervento. Così facendo è possibile massimizzare lo sfruttamento (attraverso l'aumento della vita utile) dell'intero sistema con conseguenti vantaggi sui costi di manutenzione [3]. Queste attività sono rese possibili sia adottando test non distruttivi e ispezioni visive sia attraverso l'impiego di sistemi per il monitoraggio real-time e di software in grado di processare grandi quantità di dati.

the preventive maintenance plan and suggesting changes. In addition the consumption rate analysis provides important information about the health of some key components. Finally, through the integration of these results with the readings from continuous monitoring, the evolution of the maintenance scheme is completed and the information indicating the remaining life of the components directly affected by the wear of materials analysed is exploited.

1. Introduction: "state-of-the-art" maintenance (definitions and regulatory framework) and maintenance plan

Maintenance is defined through the 2003 UNI EN 13306 standard, as "a combination of all technical, administrative and managerial actions, expected during the life cycle of an entity, with a view to keep it or return it to a condition where it can perform the required function" [1].

Consequence of the liberalisation of the European rail market has been the emergence of companies specialising in maintenance.

Therefore maintenance strategies and policies are refined and updated continuously. Traditionally the majority of maintenance is corrective or preventive-planned maintenance [2].

Maintenance strategies can be divided into two main macro maintenance operation categories, as can be seen in fig. 1:

- corrective maintenance;
- preventive maintenance.

Maintenance – Overall view

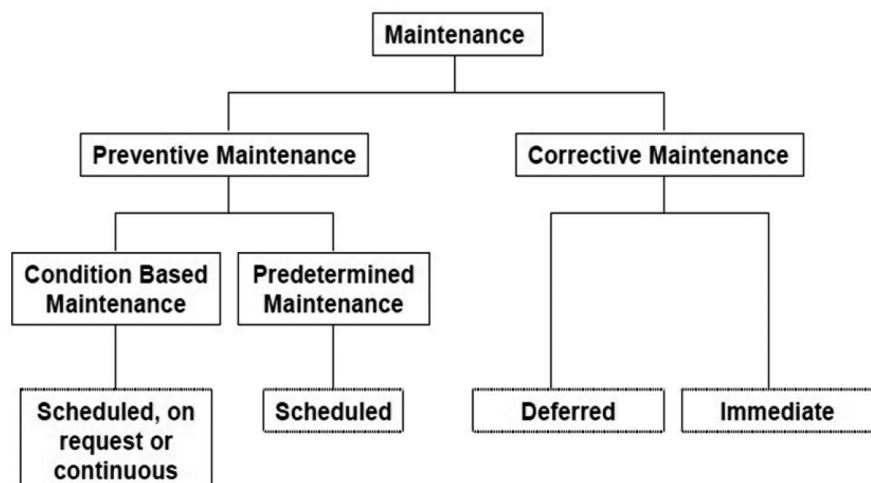


Fig. 1 - Panoramica delle principali strategie manutentive secondo la norma UNI EN 13306.

Fig. 1 - Overview of the main maintenance strategies according to UNI EN 13306 standard.

OSSEVATORIO

Il caso esaminato in questo articolo è quello delle locomotive del gruppo E483 (appartenenti alla famiglia TRAXX 2e DC) che sono sotto contratto di service presso Bombardier.

Il Piano di Manutenzione delle E483 è strutturato nel seguente modo:

- 1) Intervalli di manutenzione a scadenza chilometrica:
 - a) Intervento I1 da eseguire ogni 30.000 km;
 - b) Intervento I2 da eseguire ogni 150.000 km;
 - c) Intervento I3 da eseguire ogni 300.000 km;
 - d) Revisione R1 da eseguire quando la locomotiva raggiunge 1.200.000 km;
 - e) Revisione R2 da effettuare raggiunti i 2.400.000 km.
- 2) Intervalli di manutenzione secondo gli intervalli temporali:
 - a) Intervento T1 da eseguire ogni 6 mesi;
 - b) Intervento T2 da eseguire ogni 12 mesi;
 - c) Intervento T3 da eseguire ogni 4 anni;
 - d) Intervento T4 da eseguire ogni 8 anni;
 - e) Intervento T5 da eseguire ogni 16 anni.

Per ogni scadenza sono previste delle soglie di tolleranza che vanno dal 10% per gli interventi a scadenza chilometrica al 5% per la prima revisione ed allo 0% per gli interventi a scadenza temporale.

Per ogni tipo di scadenza, sia chilometrica sia temporale, è previsto un preciso piano di lavoro con una lista dettagliata di componenti da controllare e di attività da eseguire. Nella tabella 1 è mostrato un estratto del Piano di manutenzione della locomotiva E 483.

L'insieme delle schede di manutenzione preventiva, raggruppate per scadenza (temporale e/o chilometrica) costituiscono il piano di manutenzione del veicolo. Tale piano di manutenzione deve essere validato dall'Agenzia Nazionale per la Sicurezza Ferroviaria (ANSF); infatti secondo la direttiva sulla sicurezza il soggetto responsabile della manutenzione (ECM), deve assicurare che i veicoli, del quale è responsabile siano correttamente manutenuti per mezzo di un sistema di gestione della manutenzione conformemente a quanto riportato nel piano manutenzione, inoltre l'ECM ha il dovere di sviluppare tale piano e mantenerlo continuamente aggiornato coerentemente al profilo di esercizio del veicolo ed al ritorno di esperienza. [4]

Le linee guida dell'ANSF [5] consigliano di suddividere le attività previste nella trama manutentiva del piano di manutenzione in tre categorie in funzione dei possibili effetti di avaria e delle ripercussioni che le stesse possono avere durante la circolazione sull'infrastruttura ferroviaria nazionale:

- S-Sicurezza;

More traditional maintenance procedures such as those above are giving way to innovative strategies such as "Condition Based Maintenance".

This innovative strategy needs closer monitoring of the system to provide an accurate estimate of health, or condition, of each component/system on which to base the decision to carry out intervention activities. By doing so the exploitation (through increased useful life) of the entire system can be maximised with consequent advantages on maintenance costs [3]. These activities are made possible either by adopting non-destructive testing and visual inspections or through the use of real-time monitoring systems and software capable of processing large amounts of data.

The case examined in this article is the E483 group locomotives (belonging to the TRAXX 2e DC family) that are under service contract at Bombardier.

The E483 maintenance plan is structured as follows:

- 1) *Mileage maintenance intervals:*
 - a) *Intervention I1 every 30.000 km;*
 - b) *Intervention I2 every 150.000 km;*
 - c) *Intervention I3 every 300.000 km;*
 - d) *Revision R1 to be run when the locomotive reaches 1.200.000 km;*
 - e) *Revision R2 to be run when 2.400.000 km are reached.*
- 2) *Maintenance intervals according to time intervals:*
 - a) *Intervention T1 to be run every 6 months;*
 - b) *Intervention T2 to be run every 12 months;*
 - c) *Intervention T3 to be run every 4 years;*
 - d) *Intervention T4 to be run every 8 years;*
 - e) *Intervention T5 to be run every 16 years.*

Tolerance thresholds are provided for each due date ranging from 10% for mileage interventions to 5% for the first revision and 0% for interventions at time maturity.

For every expiration type, both mileage and temporal, a precise work plan is provided with a detailed list of components to be controlled and of tasks to perform. Table 1 shows an excerpt of the locomotive E483 maintenance Plan.

The set of preventive maintenance cards, grouped by due date (temporal and/or mileage) constitute the vehicle maintenance plan. This maintenance plan must be validated by the Italian National Agency for Railway Safety (ANSF); in fact according to the safety directive the entity in charge of maintenance (ECM) shall ensure that vehicles for which it is responsible are properly maintained by means of a maintenance management system in accordance with the specifications in the maintenance plan, and moreover the ECM has the duty to develop such a plan and keep it continually updated consistently with the operation profile of the vehicle and to the experience feedback. [4]

OSSEVATORIO

TABELLA 1 – TABLE 1

Estratto dal Piano di Manutenzione della locomotiva E 483

Excerpt of the locomotive E483 Maintenance Plan

Attività	Operazioni basate sui km [Migliaia di km]					Operazioni basate sul tempo [anni]					SCR	Numero di guasti	
	L1	L2	L3	R1	R2	T1	T2	T3	T4	T5			
	30	150	300	1200	2400	0,5	1	4	8	16			
Verificare il funzionamento / eseguire la manutenzione dell'SCMT		x	x	x	x	x	x	x	x		S	33	Q-Switches Aux contact failure
Condizionatore: eseguire una prova di funzionamento e una prova a pressione del condizionatore						x	x	x			C	26	SCMT-MMI-pushbottom failure
Comandi elettronici (DCPU - Logica di veicolo - TCMS)												22	Clima Unit general failure
Controllare MOBAD (cambiare la batteria di riserva) e riprogrammare i codici delle apparecchiature						x	x	x			R	20	New DCU board_2074 failure
Ispezionare i dispositivi di comando, gli strumenti indicatori e le segnalazioni luminose	x	x	x	x	x						S	18	Driver's display stays black
Ispezionare i pulsanti e i selettori e verificare se ci sono punti di contatto allentati						x	x	x	x		S	18	Operation panel SPL failure
Caricabatteria: ispezionare se esistono tracce di surriscaldamento o ammaccature						x	x	x	x		R	17	R0012 Luetze Module failure
Comandi elettronici (DCPU - Logica di veicolo - TCMS): cambiare le batterie di supporto						x	x	x	x		R	16	DCPU failure
Impianto ungibordo: Regolare gli ugelli e verificare la lubrificazione	x	x	x	x	x						S	15	No lubrication of the wheel flange
Test di funzionamento dell'Impianto radio del treno	x	x	x	x	x						S	13	GSMR-ETCS lost connection with RBC
Ispezionare tutti i pantografi per rilevare eventuali danni meccanici	x	x	x	x	x						S	11	Pantograph drops directly after lifting
Impianto tergilicristallo	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	S	10	Wiper system motor failure
Controllare selettore di marcia/frenatura												8	Control switch panel failure
Sezionatore												5	Disconnector
Condizionatore						x	x	x			C	5	Air leakage from HVAC connector
Interruttore												4	Circuit breaker blocked

(Fonte - Source: A. BARTOLINI)

- R-Regolarità di esercizio;
- C-Comfort.

Il piano di manutenzione viene stilato durante la progettazione della locomotiva seguendo regole e procedure consolidate. Inoltre, nelle revisioni che si susseguono, il piano di manutenzione può essere modificato in base alle esigenze operative, alle norme, ma soprattutto in base alla consapevolezza, acquisita mediante i ritorni operativi, sulle reali condizioni di degrado che ci si può aspettare per ciascun apparato.

2. Manutenzione su condizione

La manutenzione su condizione (Condition Based Maintenancy) è definita come “manutenzione preventiva basata sul monitoraggio delle prestazioni o dei parametri significativi per il funzionamento della macchina” [6]. Questa strategia di manutenzione è in grado di fornire, oltre alle informazioni aggiornate sullo stato reale del sistema, ovvero capacità diagnostica, anche la stima della sua *vita utile rimanente* (Remaining Useful Life o RUL) capacità che va sotto il nome di prognostica.

Il cuore della manutenzione su condizione è il processo di monitoraggio, detto “*condition monitoring*” (CM), attraverso il quale vengono monitorati con continuità i segnali acquisiti con appositi sensori oppure i segnali derivati dalla lettura di opportuni indicatori.

The ANSF [5] guidelines recommend splitting up the activities planned in the maintenance scheme of the maintenance plan in three categories depending on the possible breakdown effects and repercussions that the same can have during operation of the national railway infrastructure.

- S-Safety;
- R-Regular operation;
- C-Comfort.

The maintenance plan is drawn up during the design of the locomotive following established rules and procedures. Furthermore, in the reviews that follow, the maintenance plan can be modified according to the operational requirements, standards, but mainly based on awareness, gained through operational returns, on the real conditions of degradation that can be expected for each apparatus.

2. Condition-based maintenance

Condition Based Maintenancy is defined as “preventive maintenance based on monitoring of performance or of significant parameters for machine operation” [6]. This maintenance strategy is able to provide, in addition to up-to-date information on the real condition of the system, i.e. diagnostic capability, also the estimate of its remaining useful life or RUL that goes under the name prognostic.

The heart of condition-based maintenance is the “con-

OSSEVATORIO

Il monitoraggio è definito come “un’attività volta ad osservare l’attuale stato di un oggetto-componente” [7]. L’obiettivo principale del CM è fornire una stima in tempo reale delle condizioni dell’equipaggiamento al fine di prendere decisioni sulla manutenzione e di conseguenza ridurre gli interventi manutentivi non necessari e i relativi costi.

Il processo di monitoraggio si può svolgere in due modi: mentre il macchinario è operativo (monitoraggio *on-line*); mentre il macchinario è inattivo (*off-line*) [7].

L’adozione di tecniche di manutenzione su condizione (CBM) promette una potenziale riduzione dei costi rispetto alle strategie manutentive più tradizionali, che è il motivo principale che spinge la ricerca al miglioramento degli approcci manutentivi.

I costi associati a ciascun approccio manutentivo sono presentati in fig. 2.

Si nota come la politica di manutenzione correttiva presenta bassi costi di manutenzione, dovuti alle minime azioni preventive, ma alti costi operativi dovuti ai guasti funzionali che si presentano durante il funzionamento (operational failures). Al contrario, la procedura di manutenzione preventiva presenta generalmente bassi costi operativi, dovuti alla riduzione dei guasti durante il servizio, ma l’uso di criteri molto conservativi nello stimare la probabilità che un componente si guasti comporta un alto costo di manutenzione, a cui va aggiunto il fatto che spesso si sostituisce un componente lontano dalla fine della sua vita utile. Con l’approccio manutentivo su condizione, invece, si riescono a minimizzare entrambi i tipi di costi, ottimizzando così lo sfruttamento delle risorse aziendali.

Lo scopo di questo articolo è valutare l’inserimento di una Estimated Condition Based Maintenance alla gestione della flotta di locomotive E483. Infatti si parla di ECBM in quanto la sensoristica di bordo delle locomotive è stata progettata senza tenere conto di una manutenzione su condizione, quindi l’applicazione di tecniche innovative si scontra con i necessari adattamenti da apportare sia al software diagnostico sia alla parte hardware. Si deve quindi operare sia attraverso nuove release software sia attraverso misure indirette per cercare di monitorare i componenti più importanti.

In [8] e in [9] sono presentati due casi applicativi di tecniche CBM nella manutenzione dei veicoli ferroviari.

In [8] viene presentato un impianto automatizzato realizzato in Inghilterra per rilevare lo stato di usura delle ruote dei veicoli passeggeri tramite la misura del profilo del bordino.

In [9] viene descritto l’impiego di sensori che rilevano la temperatura delle boccole dei veicoli della metropolitana di Hong Kong e, attraverso collegamento radio, inviano le letture ad un centro di controllo, consentendo interventi di manutenzione preventiva nel momento in cui si registrano anomalie.

Un importante strumento impiegato nello sviluppo di

dition monitoring” process (CM), which continuously monitors the signals acquired by means of special sensors or signals derived from the reading of appropriate indicators.

Monitoring is defined as “an activity aimed at observing the current condition of a component object” [7]. CM’s main objective is to provide real-time estimate of the conditions of the equipment in order to make maintenance decisions and consequently reduce the unnecessary maintenance work and the related costs.

The monitoring process can take place in two ways: during machinery operation (on-line monitoring); while the machinery is idle (off-line) [7].

The adoption of condition-based maintenance techniques (CBM) promises a potential cost reduction compared to more traditional maintenance strategies, which is the main reason that leads to the search to improve maintenance approaches.

Costs associated with each maintenance approach are presented in fig. 2.

It should be noted how the corrective maintenance policy presents low maintenance costs due to minimum preventive actions, but high operational costs due to malfunctions that occur during operation (operational failures). On the contrary, the preventive maintenance procedure generally has low operating costs, due to less failures during service, but the use of very conservative criteria in estimating the probability that a component breaks down implies high maintenance costs, to which the fact that often a component is replaced far from the end of its useful life must be added. Through the condition-based maintenance approach, on the other hand, both types of costs can be minimised, thus optimising the use of company resources.

The purpose of this article is to consider including an Estimated Condition Based Maintenance in the fleet man-

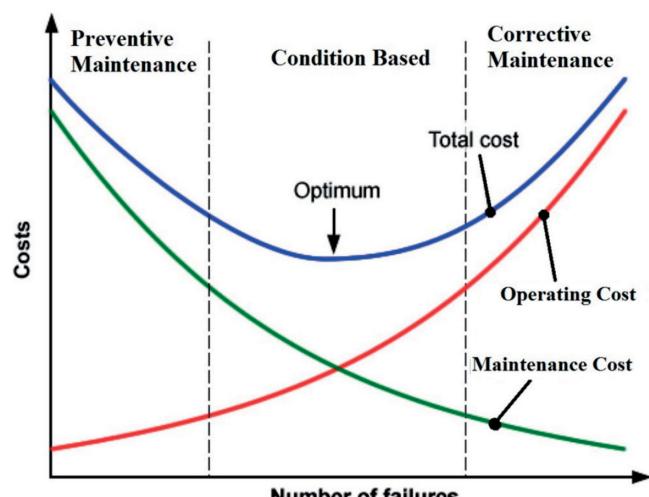


Fig. 2 - Costi associati alle principali politiche manutentive.
Fig. 2 - Costs associated with major maintenance policies.

OSSEVATORIO

un sistema di diagnostica è la *FMECA* (acronimo dell'inglese *Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis* - Analisi dei modi, degli effetti e della criticità dei guasti).

L'analisi *FMECA*, che viene utilizzata nei settori più diversi, propone i modi di guasto più probabili e con conseguenze più gravi, mettendo in evidenza i punti di debolezza di un progetto, sui quali occorre intervenire con adeguate modifiche tese ad elevarne l'affidabilità.

Un'applicazione di tale strumento è riportata in [10] dove, a seguito dell'analisi delle principali cause di guasto alle porte di un treno passeggeri delle ferrovie scozzesi, viene presentata una revisione delle procedure di manutenzione.

3. Monitoraggio on-line dei veicoli Bombardier

L'adozione di un approccio manutentivo su condizione, CBM, è reso possibile da un monitoraggio giornaliero delle locomotive, che è esteso all'intera flotta attraverso un sistema di "telediagnostica" [11].

Questo sistema permette di avere accesso da remoto a tutte le informazioni provenienti dalla diagnostica di bordo. Inoltre, il sistema implementato da Bombardier consente di generare report statistici e di inviare autonomamente i dati diagnostici rilevati a un database esterno permettendo di tracciare la storia operativa dei componenti presenti a bordo della locomotiva.

Attraverso l'analisi in tempo "reale" delle informazioni provenienti dalla diagnostica di bordo è possibile ottimizzare la manutenzione correttiva e, soprattutto, migliorare la manutenzione preventiva adottando tecniche di CBM.

La diagnostica che è implementata all'interno della logica di veicolo si basa sulla generazione e sulla memorizzazione di eventi riconducibili sia a condizioni di normale funzionamento, sia a condizioni di degrado o di guasto [12]. Equipaggiando le locomotive con un modem GSM, chiamato MOXA, si possono trasmettere a terra i dati diagnostici provenienti dalla logica del veicolo.

Oltre alla tradizionale diagnostica è possibile trasferire a terra lo stato operativo di alcune specifiche apparecchiature, che vengono così monitorate durante il loro lavoro quotidiano. I dati raccolti sono sia di tipo booleano che analogico; si realizza così un monitoraggio on-line delle letture provenienti dai sensori di bordo.

Ogni 24 ore, i segnali campionati vengono elaborati in modo da produrre un insieme aggregato: cioè il report contenente gli indicatori consuntivi di utilizzo chiamati "*Key Performance Index*" (*KPI*), che sono i parametri chiave da monitorare. In questo modo si ha un consolidamento dei dati di interesse per la manutenzione.

Inoltre, attraverso la rete aziendale, è possibile caricare i file KPIs sul database del software "Asset Manager" che aggiorna automaticamente le informazioni sugli asset installati a bordo delle locomotive della flotta monitorata, permettendo, così, di tenere traccia della storia ope-

gement of E483 locomotives. In fact we talk about E-CBM as on-board sensors of the locomotives were designed without taking into account a condition-based maintenance, therefore the application of innovative techniques collides with the necessary adaptations to be made both to the diagnostic software and to the hardware. Operation must therefore be through new software releases and through indirect measures in order to try monitoring the most important components.

Two application cases of CBM techniques in the maintenance of railway vehicles are presented in [8] and [9].

[8] shows an automated system built in England to detect the degree of wear of passenger vehicle wheels by measuring the wheel flange profile.

[9] describes the use of sensors that detect the temperature of the axle boxes of Hong Kong's underground vehicles and send readings to a control centre, through radio link, allowing for preventive maintenance when anomalies are recorded.

An important tool used in the development of a diagnostic system is the *FMECA* (acronym of *Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis*).

FMECA analysis, which is used in the most diverse areas, offers the most likely failure modes and with more serious consequences, highlighting the weaknesses of a project, on which we must intervene with appropriate changes to increase reliability.

An application of this instrument can be found in [10] where a review of maintenance procedures is presented, following the analysis of the main causes of failure at the doors of a passenger train of Scottish railways.

3. On-line monitoring of Bombardier vehicles

The adoption of the condition-based maintenance approach, CBM, is possible by daily monitoring of locomotives, which is extended to the entire fleet through a "Remote Access Diagnostics" system [11].

This system provides remote access to all information coming from on-board diagnostics. Furthermore, the system implemented by Bombardier allows generating statistic reports and sending diagnostic data detected autonomously from an external database allowing to track down the operational history of the components on board the locomotive.

Through the real time analysis of information from the on-board diagnostics, corrective maintenance and most importantly, preventive maintenance can be optimised adopting CBM techniques.

Diagnostics that are implemented within the vehicle logic are based on the generation and storage of events attributable to both normal operating conditions, and deterioration or breakdown [12]. By fitting a GSM modem, called MOXA, on the locomotive, diagnostic data from the vehicle logic can be transmitted to the ground.

OSSERVATORIO

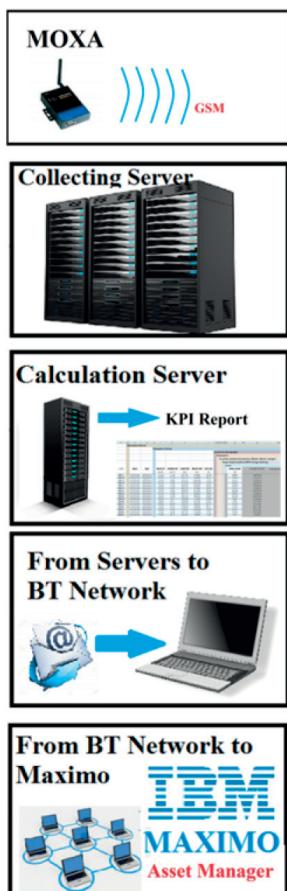


Fig. 3 - Schema a blocchi del sistema di monitoraggio on-line dei veicoli Bombardier.

Fig. 3 - Block diagram of the on-line Bombardier vehicles monitoring system. Legenda: MOXA: On board GSM modem who, every 20 minutes, transmits the diagnostic data to the ground. Collecting Server: External server for collecting data. Calculation Server: A second server to process raw data and produces every 24 hours an aggregate set who contains a report with the actual usage indicators called "Key Performance Index (KPI)", which are the key parameters to be monitored. From Servers to BT Network: Daily report about the monitored fleet come into the intranet network. From BT Network to Maximo: Through the corporate network the KPIs are read by the software that contains the diagnostic history of the major components.

rativa di ogni LRU (Line Replaceable Unit). Nella fig. 3 vediamo riportato lo schema a blocchi del sistema di monitoraggio sopra descritto.

La costruzione di una serie di indicatori predittivi di vita residua relativi ai componenti più importanti della locomotiva permette di tradurre l'esperienza manutentiva in soglie di valori per i contatori che permettono di generare avvisi di manutenzione con un anticipo tale da permettere sia di programmare il fermo in officina sia di preparare i materiali di ricambio e il programma preciso di interventi da fare senza bisogno di effettuare le ispezioni, i controlli o le verifiche necessarie a decidere se realizzare o meno una sostituzione.

Modem GSM installato a bordo dei veicoli che, ogni 20 minuti, trasmette i pacchetti di dati diagnostici verso terra.

Server esterno che svolge la funzione di serbatotoio per la raccolta dei dati.

Un secondo server è dedicato all'elaborazione dei dati dispersi per produrre, ogni 24 ore, un insieme aggregato contenente i contatori relativi ai parametri chiave che si vuole monitorare.

Il report che contiene le informazioni aggiornate è stato chiamato KPI (Key Performance Indicator).

I report giornalieri relativi alla flotta monitorata confluiscono nella rete intranet aziendale tramite dominio FTP.

Attraverso la rete aziendale i KPIs i vengono letti dal database del software Asset Manager che contiene la storia delle informazioni diagnostiche relative ai principali componenti.

In addition to traditional diagnostics the operational status of some specific equipment can be transferred to the ground, which is monitored during daily operation. The collected data are both Boolean and analogue type; thus an on-line monitoring of readings from sensors on board is achieved.

Every 24 hours, sampled signals are processed to produce an aggregate set: that is the report that contains the actual usage indicators called "Key Performance Index (KPI)", which are the key parameters to be monitored. In this way there is a consolidation of the data of interest to maintenance.

In addition, through the corporate network, the KPI files can be loaded on the "Asset Manager" software database that automatically updates the information on assets installed on board the fleet of locomotives monitored, thus allowing tracking the operational history of each LRU (Line Replaceable Unit). Fig. 3 shows the block diagram of the above-mentioned monitoring system.

The construction of a number of predictive indicators of remaining life relating to the most important components of the locomotive can translate maintenance experience into value thresholds for counters that allow generating maintenance alerts in advance so as to both schedule the downtime in the workshop and prepare the spare parts and the precise intervention schedule to be performed without needing to carry out inspections, controls or verifications necessary to decide whether or not to fulfil a replacement.

Through the readings of the usage indicators (KPIs) the conditions of the components can be monitored and a condition of deterioration can be spotted before the fault occurs besides preventing the effects on the system in terms both of induced failures on other components, and reduced reliability and security conditions.

4. Estimates of consumption of preventive maintenance materials

During each preventive maintenance intervention that locomotives undergo the staff responsible fills in a report containing, in addition to all the activities on the locomotive, even a section that lists all the consumables used.

From the analysis of these reports, the final consumption balance can be calculated of:

OSSEVATORIO

Attraverso le letture degli indicatori di utilizzo (KPI) si può monitorare lo stato dei componenti e risulta possibile individuare una condizione di degrado prima che si manifesti il guasto e anche prevenire gli effetti sul sistema in termini sia di guasti indotti sugli altri componenti, sia di riduzione dell'affidabilità e delle condizioni di sicurezza.

4. Stima dei consumi dei materiali di manutenzione preventiva

Durante ogni intervento di manutenzione preventiva cui sono sottoposte le locomotive il personale addetto compila un report che contiene, oltre a tutte le attività svolte sulla locomotiva, anche una sezione con l'elenco di tutti i materiali di consumo utilizzati.

Dall'analisi di questi report è possibile consuntivare i consumi di:

- strisciante dei pantografi, che vengono misurati ogni volta che la locomotiva viene presa in carico dal personale dell'officina;
- pastiglie freno;
- olio per riduttori;
- acqua distillata per batterie;
- sabbia;
- grasso per l'impianto ungibordo.

I quattro aspetti di usura presi in esame rappresentano quelli che hanno maggiore impatto sul LCC e, alcuni di essi, rappresentano delle voci di costo rilevanti nel bilancio delle risorse destinate alla manutenzione delle locomotive.

Nel database aziendale sono presenti i report relativi agli interventi di manutenzione svolti sull'intera flotta Traxx. L'analisi effettuata ha preso in considerazione 450 report di 30 locomotive E.483, operanti in Italia nelle flotte di Oceanogate, DB Schenker, GTS, RTC e Autorità Portuale di Savona, nel periodo compreso tra fine 2013 e primo semestre 2016.

Le locomotive oggetto di studio svolgono servizio cargo sulla rete RFI per conto di vari operatori su tratte molto eterogenee, ma queste differenze sono rese "blande" dagli errori di misura e dalla periodicità fissa degli interventi manutentivi (mediamente ogni 2 mesi la locomotiva entra in officina).

Compilando una tabella con i consumi globali di ogni locomotiva nell'arco dei tre anni monitorati, considerando una percorrenza media di 400.000 km, si sono evidenziati i consumi medi dei materiali riportati nella tabella 2.

Per determinare l'andamento del consumo degli strisciante dei pantografi è stato elaborato un modello introducendo alcune approssimazioni. Per prima cosa si assume che la locomotiva abbia un solo pantografo sempre in presa avente uno strisciante fittizio di spessore doppio, ovvero 90 mm, rispetto alla realtà: questa semplificazione è necessaria perché bisogna considerare il consumo glo-

- pantograph strips, which are measured whenever the locomotive is taken over by the workshop employees;
- brake pads;
- gear reducers;
- distilled water for batteries;
- Sand;
- grease for the wheel flange lubrication system.

The four aspects of wear surveyed represent those that have greater impact on the LCC and, some of them represent substantial cost item entries in the resources budget allocated to maintenance of the locomotives.

The company database contains reports relating to maintenance performed on the entire Traxx fleet. The analysis took into account 450 reports of 30 E.483 locomotives, operating in Italy in the fleets of Oceanogate, DB Schenker, GTS, RTC and the Port of Savona Authority, in the period between the end of 2013 and the first half of 2016.

The locomotives being studied perform cargo service on the RFI network on behalf of several operators on very heterogeneous routes, but these differences are "bland" due to measurement errors and fixed maintenance schedule operations (on average every 2 months the locomotive is in the workshop).

Filling in a table with the overall consumption of each locomotive over the three years monitored, considering an average travel distance of 400.000 km, the average consumptions of the materials listed in table 2 were highlighted.

A model was developed to determine the consumption trend of the pantograph shoegears by introducing some ap-

TABELLA 2 – TABLE 2

Consumi medi di una generica locomotiva gruppo E.483
Average consumption of a group E.483 generic locomotive

LOCOMOTIVA E.483.000 E.483.000 LOCOMOTIVE		
Percorrenza considerata <i>Travelled distance considered</i>	400.000 km	
Consumi <i>Consumption</i>	Per 3 anni <i>For 3 years</i>	Per Mkm <i>For Mkm</i>
Coppia di strisciante <i>Carbon strip</i>	6	19
Pastiglie <i>Pads</i>	1	2
Olio per riduttori (kg) <i>Oil for gear reducers (kg)</i>	18	60
Acqua batterie (l) <i>Battery water (l)</i>	26	87
Sabbia (kg) <i>Sand (kg)</i>	4831	16 (kg/Tkm)
Grasso ungibordo (kg) <i>Wheel flange lubrication grease (kg)</i>	78	237

(Fonte - Source: A. BARTOLINI, G. ANASTASI)

OSSEVATORIO

bale di tutti gli striscianti montati sui due pantografi e ciò si ottiene sommando i consumi, ovvero la differenza dello spessore (parametro Delta_H) misurato nella mezzeria degli striscianti dei due pantografi, attraverso la differenza tra due misurazioni consecutive effettuate in occasione di ogni intervento in officina e riportate nelle note dei report di manutenzione.

Si verifica il consumo delle pastiglie dei freni considerando la differenza di chilometraggio tra una sostituzione e l'altra.

Si procede in modo analogo anche per le altre grandezze, riportando le quantità di materiale di consumo rabboccato o rinnovato ad ogni intervento di manutenzione.

Va poi calcolata la percorrenza (o parametro Delta_km) attraverso la differenza tra i chilometraggi della locomotiva riportati in due interventi di manutenzione consecutivi.

Si associa a ciascun intervallo di percorrenza il consumo dei vari materiali e si può calcolare una grandezza chiamata *Rateo di consumo*, sulla quale si effettuerà l'analisi statistica.

La grandezza *Rateo di consumo*, esprimibile in [mm/km] o [kg/km], indica quanti millimetri di strisciatore oppure quanti chilogrammi di materiale si consumano per ogni chilometro percorso dalla locomotiva; tale valore viene scalato a 10.000 km (1.000 km nel caso della sabbia) per avere le cifre più significative nella porzione intera del numero. Questi valori rappresentano i campioni di dati che possono essere analizzati tramite la distribuzione di Weibull dei dati raccolti, con lo scopo di trovare i valori di consumo che hanno la maggiore probabilità di verificarsi.

Infatti, interpolando i dati con la distribuzione di Weibull è possibile individuare una funzione rappresentativa dell'andamento del consumo.

La distribuzione di Weibull è una distribuzione di probabilità continua definita sui numeri reali positivi e descritta da due parametri α (parametro di scala) e β (parametro di forma) e la sua funzione di densità di probabilità cumulata è (1):

$$f(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta\right] \text{ with } 0 \leq x \quad (1)$$

Attraverso il valore dei parametri alfa e beta, inoltre può essere adattata anche a distribuzioni di valori asimmetriche.

È da notare l'importanza che riveste l'affidabilità dei dati. Infatti, è stato creato un algoritmo per filtrare, dal totale dei campioni, quelli in cui è presente un errore di misura evidente oppure quelli in cui è mancante la misura (cosa frequente nel caso di sostituzione degli striscianti per i quali manca la misura a fine vita); così facendo si ottiene un campione di dati "pulito" di circa 300 valori, rispetto ai 421 iniziali, libero dagli errori e dalle approssi-

proximations. First, it is assumed that the locomotive has always only one pantograph constantly engaged with a false double thickness carbon strips, 90 mm, compared to reality: this simplification is necessary because we must consider the global consumption of all carbon strips mounted on two pantographs and this is achieved by summing consumption, which is the difference of the thickness (parameter Delta_H) measured at the centre line of the two pantograph carbon strips, through the difference between two consecutive measurements taken at the time of each intervention in the workshop and reported in the notes of the maintenance report.

Brake pad wear is verified considering the difference in mileage between one replacement and the other.

This is also the case for the other sizes, by reporting the amount of consumable material that has been refilled or renovated at every maintenance operation.

The distance (or Delta_km parameter) is then calculated through the difference between the mileage of the locomotive reported in two consecutive maintenance operations.

The consumption of the various materials is associated with each travel interval and a magnitude called Consumption rate can then be calculated, on which statistical analysis will be performed.

The Consumption rate magnitude, expressed in [mm/km] or [kg/km], indicates how many millimetres of shoegear or how many kilograms of material consumed per kilometre travelled by the locomotive; this value is scaled to 10.000 km (1,000 km in the case of sand) to have the most significant figures in the whole portion of the number. These values represent data samples that can be analysed through the Weibull distribution of the collected data, in order to find the consumption values that are most likely to occur.

In fact, by interpolating the data with the Weibull distribution, a representative function of the consumption trend can be identified.

The Weibull distribution is a continuous probability distribution defined on positive real numbers and described by two parameters α (scale parameter) and β (shape parameter) and its function of cumulated probability density is (1):

$$f(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta\right] \text{ with } 0 \leq x \quad (1)$$

Through the value of alpha and beta parameters, it can also be adapted to distributions of asymmetric values.

The importance of data reliability is worth noting. In fact, an algorithm was created to filter, from the total of the samples, those with a clear measurement error or those in which the measurement is missing (which is common in the case of replacement of the shoegears for which the measurement is missing at the end life); doing so a "clean" data sample of about 300 values, compared to the initial 421, is obtained free of errors and rougher approximations. A threshold value was also introduced on the travelled distances to eliminate values related to maintenance opera-

mazioni più grossolane. Inoltre è stato introdotto un valore di soglia sulle percorrenze per eliminare i valori collegati a interventi manutentivi troppo ravvicinati che possono determinare dei valori di rateo di consumo dispersi.

Per calcolare una distribuzione di Weibull che approssimi la distribuzione dei campioni bisogna assegnare un valore a due parametri: α (parametro di scala) e β (parametro di forma), dai quali dipende la forma, il picco e l'ampiezza della curva, in maniera che lo scarto tra i dati della misura e la curva sia il minimo possibile. Utilizzando una funzione del foglio di calcolo che assegna una matrice di valori ad α e β è possibile trovare una coppia di valori in grado di minimizzare lo scarto.

Tramite un istogramma si visualizza la percentuale di probabilità associata a ciascun campione e sopra di essi si traccia la curva che ne approssima l'andamento probabilistico.

La validità delle curve è stata poi verificata tramite il "test del χ^2 quadro", che attraverso il raffronto tra i dati ottenuti, suddivisi in undici intervalli equiprobabili, e quelli attesi permette di verificare se la distribuzione di Weibull possa essere rappresentativa.

Nella tabella 3 sono stati riportati i valori del rateo di consumo che attraverso i calcoli sono risultati avere la maggiore probabilità di verificarsi. Tramite questi valori è possibile elaborare una stima dei materiali necessari durante un normale intervento di manutenzione, come riportato nella colonna a destra.

4.1. Consumo degli strisciante dei pantografi

Le locomotive E.483 sono dotate di due pantografi monobraccio Schunk WBL85 ciascuno dei quali è dotato di una coppia di strisciante in grafite omologati per l'impegno sulle linee italiane.

La vita media degli strisciante dei pantografi si attesta su 100.000 km, però con notevoli differenze tra una locomotiva e l'altra e una notevole dispersione dei dati. Alcune cause legate ai consumi anomali possono essere ricercate nelle diverse velocità medie che ciascun pantografo si trova ad avere, nella diversa pressione di contatto esercitata sulla linea aerea (ci può essere una cattiva taratura nell'impianto pneumatico che regola la spinta contro il filo di contatto), nello stato di manutenzione della linea aerea e nelle condizioni di assorbimento della corrente.

Lo strisciante di grafite di ogni pantografo da nuovo misura 45 mm di spessore compreso di porta strisciante. Quando in officina viene rilevato uno spessore minore o uguale a 32 mm lo strisciante viene sostituito in quanto le probabilità che raggiunga lo spessore massimo di usura prima del successivo intervento programmato sono considerevoli; infatti se il materiale dello strisciante si assottiglia troppo, di solito intorno ai 29 mm, si verifica l'intervento di un sistema di emergenza (ADD) che provoca l'abbassamento rapido del pantografo rendendolo inutilizzabile. Di

tions too close together that can determine dispersed consumption rate values.

To calculate a Weibull distribution which approximates the distribution of samples a two-parameter value must be assigned: α (scale parameter) and β (shape parameter), on which the shape, the peak and the amplitude of the curve depend, so that the difference between the measurement data and the curve is as little as possible. Through the use of a spread-sheet numerical function that assigns a values matrix to α and β , a pair of values can be found able to minimise the deviation.

Using a histogram the percentage of probability associated with each sample is shown and the curve that approximates probabilistic trends is outlined above them.

The validity of the curves was then verified using the " χ^2 squared test", which through the comparison between the data obtained, divided into eleven equally probable intervals, and those expected allows verifying if the Weibull distribution can be representative.

Table 3 reports the consumption rate values that through the calculations were found to have the greatest probability of occurrence. Through these values an estimate of the necessary materials during routine maintenance can be elaborated, as listed in the column to the right.

4.1. Consumption of the pantograph strips

E.483 locomotives are equipped with two single-arm Schunk WBL85 pantographs, each of which is equipped with a pair of graphite shoegears approved for use on the Italian lines.

The average life of carbon strips is about 100.000 km, but with notable differences between a locomotive and an-

TABELLA 3 – TABLE 3

Risultati dell'analisi dei consumi e stima dei materiali necessari durante un normale intervento di manutenzione

Results of the consumption analysis and estimate of the materials necessary during routine maintenance

Rateo di consumo più probabile <i>Most probable consumption rate</i>	Consumo ogni 30.000 km <i>Consumption every 30.000 km</i>
Strisciante <i>Carbon strips</i>	2.40 mm/10k km
Olio riduttori <i>Gear reducers oil</i>	0.7 kg/10k km
Acqua distillata batterie <i>Distilled water for batteries</i>	0.3 l/10k km
Sabbia <i>Sand</i>	16 kg/1k km
Grasso ungibordo <i>Wheel flange lubrication system</i>	2.63 kg/10k km
	7.2 mm
	2.1 kg
	0.9 l
	480 kg
	7.9 kg

OSSEVATORIO

conseguenza lo spessore utile dello strisciante è limitato (16 mm), per cui si pone l'obiettivo di costruire una funzione che indichi, con ragionevole precisione, quanti millimetri di spessore dello strisciante si consumano ogni dieci-mila chilometri di percorrenza della locomotiva.

Il risultato dei calcoli indica che il rateo di consumo con la maggior probabilità si concentra nella fascia tra 1 e 2,9 mm/10.000 km, con un picco di campioni in corrispondenza di 1,9 mm ogni 10.000 km come riportato in fig. 4.

Considerando il valore medio globale il rateo di consumo si attesta su 2,40 mm ogni 10.000 km, a cui corrisponde una percorrenza di circa 110.000 km relativa al consumo totale del cosiddetto strisciante fittizio che è stato definito prima. Considerando il consumo di una sola delle coppie di striscianti di cui è dotata ogni locomotiva la percorrenza media è di circa 54.000 km, quindi ampiamente compresa tra due interventi manutentivi.

Si nota come la media globale dei consumi sia sensibilmente superiore al valore del rateo di consumo che presenta la maggiore probabilità di verificarsi, questo è dovuto alla presenza significativa di valori di consumo superiori ai margini prima individuati dovuti a casi particolari in cui il rateo di consumo ha presentato valore pari o superiore a 4 mm ogni 10.000 km.

Svolgendo il "test del χ^2 quadro" suddividendo il campione in 11 intervalli equiprobabili si ottiene un valore di distribuzione di χ^2 che corrisponde a una buona probabilità di approssimazione (>40%) della Weibull avente $\alpha=1,79$ e $\beta=2,58$.

other and a significant dispersion of the data. Some causes related to abnormal consumption can be searched in the different average speeds that each pantograph is found to have, in different contact pressure exerted on the airline (there may be a bad calibration in the pneumatic system that adjusts the thrust against the contact wire) in the airline's maintenance condition and in the current absorption conditions.

The carbon strip of every new pantograph is 45 mm thick including the carbon strip holder. When a thickness less than or equal to 32 mm is found in the workshop, the carbon strip is replaced as the odds it reaches maximum thickness of wear before the next planned intervention are considerable; in fact if the carbon strip becomes too thin, usually around 29 mm, there is the intervention of an emergency system (ADD) that causes rapid lowering of the pantograph making it unserviceable. Consequently, the useful thickness of the carbon strip is limited (16 mm), there is therefore an objective to create a function indicating, with reasonable accuracy, how many millimetres of carbon strip thickness are consumed every ten thousand kilometres of travelled distance of the locomotive.

The result of calculations indicates that the rate of consumption with greater likelihood focuses in the range between 1 and 2.9 mm/10.000 km, with a peak of samples at 1.9 mm every 10.000 km as shown in fig. 4.

Considering the global average value, the consumption rate amounts to 2.40 mm every 10.000 km, which corresponds to a travelled distance of about 110.000 km on the total consumption of so-called false carbon strip that was

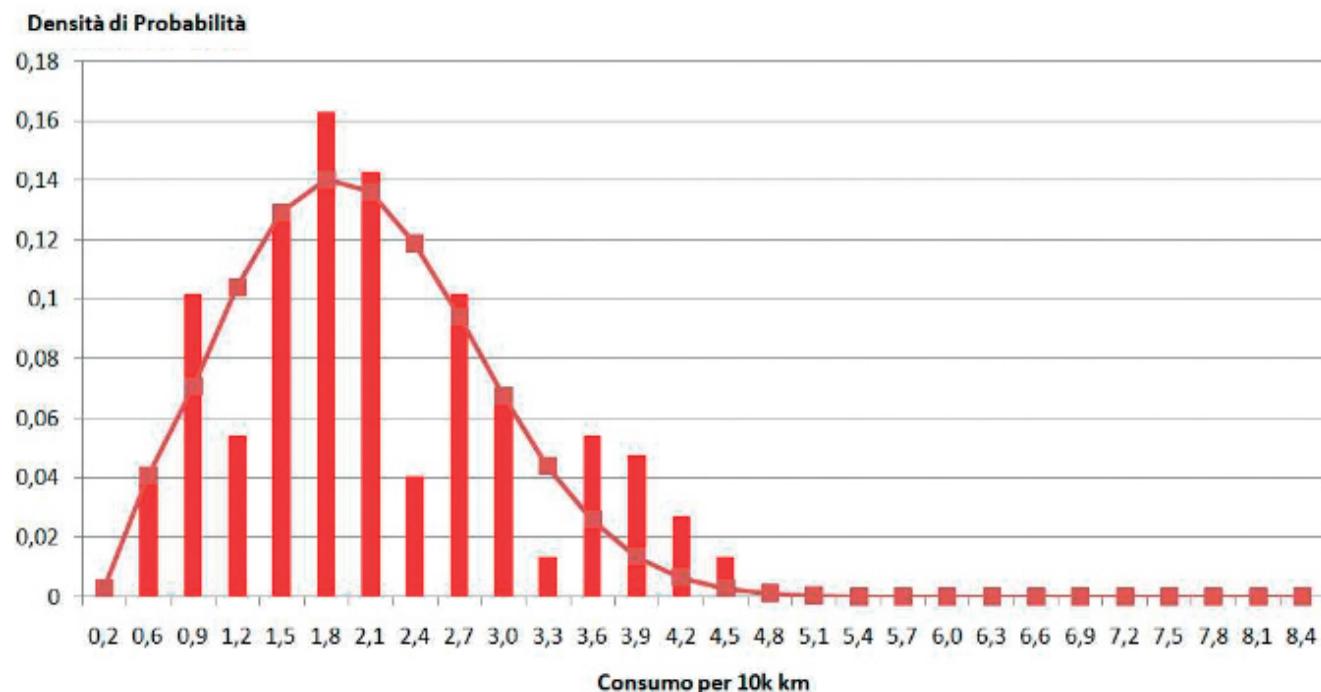


Fig. 4 - Probabilità del rateo di consumo degli striscianti.

Fig. 4 - Consumption rate probability of the shoegears.

OSSEVATORIO

4.2. Consumo delle pastiglie freno

In 400'000 km di percorrenza media le locomotive hanno necessitato, mediamente, di un solo cambio di pastiglie freno, questo rivela la buona durata delle stesse e la scarsa incidenza di costo tale da non giustificare un'analisi CBM. Si noti che i dati analizzati sono riferiti a locomotive per treni merci il cui profilo di missione tipico prevede una velocità di 90-100 km/h e poche fermate; diverso sarebbe il discorso per treni passeggeri ad alta velocità dove le frenate sono molto più frequenti e le condizioni di esercizio dell'impianto frenante sono molto più gravose.

Inoltre un importante ausilio all'impianto frenante pneumatico è rappresentato dalla frenatura elettrica reostatica di cui sono dotate le E483.

4.3. Consumo di olio per riduttori

Le locomotive in esame sono dotate di un riduttore che collega ciascun motore all'assile sottostante, in totale ci sono 4 riduttori. Ogni riduttore ha il compito di trasmettere la coppia motrice alle ruote adeguando il regime di rotazione del motore a quello della sala. Il riduttore è costituito da una coppia di ingranaggi sempre in presa, lubrificati mediante olio contenuto in un'apposita coppa. Ogni coppa ha la capacità di 4 kg di olio, per un totale di 16 kg di olio per locomotiva.

Sul carter di ogni riduttore è presente una specola trasparente che permette di vedere il livello dell'olio, questo controllo è previsto per ogni 30.000 km. Sul piano di manutenzione è previsto che, dopo un periodo di rodaggio di 20.000 km venga effettuato un cambio completo di olio. Successivi rabbocchi sono previsti in base al livello indicato dalla specola. Ricambi completi dell'olio sono previsti ogni 300.000 km. Infatti, esaminando i rapporti di manutenzione, il maggior numero di interventi non riporta il rabbocco dell'olio dei riduttori, a parte alcuni casi sporadici in cui si sono verificati frequenti trafileamenti di olio probabilmente dovuti a difetti nelle guarnizioni.

In occasione del cambio di olio un campione d'olio di 100 ml, prelevato da ciascun riduttore, viene inviato ad un laboratorio di analisi che analizza il contenuto in metallo. Contenuti eccessivi possono essere sintomo di un degrado del rotismo e dei suoi cuscinetti.

Si effettua lo stesso tipo di analisi prima descritta per gli strisciamenti e si trova il valore del rateo di consumo dell'olio espresso in chilogrammi per diecimila chilometri avente la maggiore probabilità.

Il rateo di consumo più probabile dell'olio si attesta ad un valore molto basso, come è giusto che sia, pari a 0,7 kg ogni 10.000 km.

In occasione dei normali interventi di manutenzione, svolti ogni 30.000 km, è frequente il rabbocco di 2 kg di olio, ovvero 0,5 kg per riduttore; tale valore risulta essere in linea con il consumo rilevato sperimentalmente.

defined above. Considering the consumption of a single carbon strip pair that every locomotive is equipped with, the average distance travelled is about 54.000 km, hence broadly between two maintenance interventions.

It should be noted that the average global consumption is significantly higher than the value of the consumption ratio with greater probability of occurrence; this is due to the significant presence of consumption values higher than the margins previously identified due to particular cases where the consumption rate has returned a value equal to or higher than 4 mm every 10.000 km.

Running the “ χ^2 squared test” by splitting the sample into 11 equally probable ranges, a distribution value of χ^2 is obtained which corresponds to a good chance of approximation (>40%) of the Weibull with $\alpha = 1.79 >$ and $\beta = 2.58$.

4.2. Brake pads consumption

Over 400.000 km of average distance travelled, locomotives required, on average, just one change of brake pads, this shows the good duration of the same and the scarce cost incidence to the extent that a CBM analysis is not justified. Note that the data analysed refer to locomotives for freight trains whose typical mission profile provides a speed of 90-100 km/h and a few stops; that would not be the case for high-speed passenger trains where braking occurs much more frequently and the operating conditions of the braking system are much more burdensome.

Moreover, an important aid to the pneumatic braking system is represented by the rheostatic electric braking system that E.483s are fitted with.

4.3. Consumption of oil for gear reducer

The locomotives under study are equipped with a gear reducer that connects each engine to the underlying axle, there are a total of 4 speed reducers. Each speed reducer has the task of transmitting the engine torque to the wheels adapting the rotation regime to that of the wheel set. The speed reducer consists of a pair of gears that are always engaged, lubricated with oil contained in a specific sump. Each sump has a 4 kg oil capacity, for a total of 16 kg of oil per locomotive.

On each gear reducer casing there is a transparent sight glass that allows seeing the oil level, this control is scheduled every 30.000 km. The maintenance plan provides a complete change of oil after a 20.000 km run-in period. Subsequent top-ups are scheduled according to the level indicated by the sight glass. Complete oil changes are planned every 300.000 km. In fact, examining the maintenance reports, most interventions do not report oil top-ups of the reducers, apart from some sporadic cases in which frequent oil leakage occurred probably due to defects in the seals.

At the change of oil, a 100 ml oil sample taken from each reducer, is sent to a laboratory that analyses the metal

OSSEVATORIO

Volendo prendere un intervallo di rilevamento più ampio si trova che il consumo medio di olio si attesta su 60 kg per un milione di chilometri, ma tale dato contiene anche i valori anomali che si sono riscontrati su alcune locomotive con difetti nella tenuta delle guarnizioni.

4.4. Consumo di acqua distillata per batterie

Le locomotive E.483 sono dotate di una batteria da 110 V per l'alimentazione dei servizi ausiliari, come luci, centraline di diagnostica e sistema di comunicazione. Le batterie impiegate sono del tipo piombo-acido, comunemente montate a bordo dei veicoli, e sono formate da più celle connesse in serie. Ogni cella è costituita da anodo e catodo in piombo immersi in una soluzione elettrolitica acquosa contenente acido solforico.

La manutenzione delle batterie è prevista ogni 30.000 km oppure ogni sei mesi e prevede l'ispezione visiva, la pulizia, la misura della tensione di celle campione e il controllo del livello di liquido elettrolitico per ogni cella. In occasione di interventi manutentivi svolti ogni quattro anni è previsto il controllo della capacità della batteria e la sua sostituzione qualora non rispondesse ai requisiti richiesti.

Il rabbocco del livello di liquido elettrolitico è molto importante in quanto l'elettrolita deve sempre coprire le piastre, altrimenti se le piastre rimanessero scoperte nella parte superiore ci sarebbe un'ossidazione causata dall'ossigeno dell'aria. Inoltre, poiché l'abbassamento del livello di elettrolita è dovuto all'evaporazione dell'acqua, la parte inferiore delle piastre si troverebbe a contatto con un liquido molto più acido che causerebbe lo sfaldamento delle piastre. Tale sfaldamento può determinare la caduta, sul fondo della batteria, di materiale conduttivo che può arrivare a cortocircuitare l'elemento stesso della batteria rendendolo inutilizzabile. Per il rabbocco bisogna utilizzare solo acqua distillata, senza mai aggiungere acido.

La quantità di acqua distillata che richiede la batteria installata sulle TRAXX E.483 è pari a 12 litri per un cambio completo.

Svolgendo la stessa analisi dei consumi illustrata in precedenza si ricava il consumo medio che si attesta su meno di 0,3 litri ogni 10.000 km.

Solitamente durante gli interventi di manutenzione si rabbocciano circa 2 litri di acqua distillata ogni 60.000 km. È da notare che per una batteria in buone condizioni e non soggetta a forti stress termici non si dovrebbe manifestare la necessità di un rabbocco.

4.5. Consumo di sabbia

A bordo dei mezzi di trazione su rotaia sia ferroviari che tranvieri viene impiegata sabbia per aumentare l'aderenza delle ruote sui binari durante l'avviamento soprattutto quando la superficie di rotolamento è umida. La sabbia viene contenuta in contenitori, detti sabbiere, posti nel sottocassa o sui carrelli. Apposite tubazioni

content. Excessive content can be a symptom of degradation of the gearing and its bearings.

The same analysis as described above is performed for the carbon strip and the oil consumption ratio value is found expressed in kilograms for ten thousand kilometres with greater likelihood.

The most likely oil consumption ratio amounts to a very low value, equal to 0.7 kg every 10.000 km.

During the normal maintenance performed every 30.000 km, topping up with 2 kg of oil, or 0.5 kg per reducer is frequent; this value is in line with the consumption detected experimentally.

Wanting to take a larger detection range it is found that the average consumption of oil is about 60 kg per one million kilometres, but this figure also contains the abnormal values that were found on some locomotives with faults in tightness of the gaskets.

4.4. Consumption of distilled water for batteries

E.483 locomotives are fitted with a 110 V battery to power auxiliary services, such as lights, diagnostic and communications system. Batteries used are the lead-acid type, commonly fitted on board vehicles, and are formed by a number of cells connected in series. Each cell consists of anode and cathode immersed in an aqueous electrolytic solution containing sulphuric acid.

Battery maintenance is scheduled every 30.000 km or every six months and involves visual inspection, cleaning, sample cell voltage measurement and the electrolyte liquid level control for each cell. On the occasion of maintenance performed every four years, control of the capacity of the battery is scheduled and replacement if it does not meet the requirements.

Topping up of the electrolyte liquid level is very important as the electrolyte should always cover the plates, otherwise if the plates were uncovered at the top there would be an oxidation caused by oxygen in the air. Furthermore, because the lowering of the level of electrolyte is due to evaporation of water, the bottom of the plates would be placed in contact with a much more acidic liquid and cause the exfoliation of the plates. Exfoliation can cause conductive material to fall on the bottom of the battery that can short-circuit the battery element itself making it unserviceable. Only distilled water must be used for topping up, never add acid.

The amount of distilled water that the battery installed on the TRAXX E.483 requires is 12 litres for a complete change.

The average consumption is obtained performing the same consumption analysis as above that amounts to less than 0.3 litres every 10.000 km.

2 litres of distilled water every 60.000 km are usually used to top up during routine maintenance. It should be

OSSEVATORIO

terminanti con ugelli sagomati provvedono a distribuire la sabbia per gravità o mediante spinta pneumatica sulla superficie della rotaia immediatamente davanti alla ruota.

Sulle Traxx sono presenti otto sabbiere, una per ogni ruota, contenenti complessivamente 800 kg di sabbia che deve essere rabboccata periodicamente. Il piano di manutenzione prevede il controllo e il rabbocco delle sabbiere ogni 30.000 km.

Mediamente il valore del rateo di consumo della sabbia più probabile, ricavato dalle checklist di manutenzione, è compreso tra 13 e 22 kg ogni 1.000 km. Il valore medio è compreso tra 13,27 e 17,70 kg/1000km, come si può vedere dalla fig. 5.

Durante i normali interventi di manutenzione, ovvero per percorrenze di almeno 30.000 km, viene usualmente rabboccata una quantità di sabbia compresa tra 200 e 500 kg.

4.6. Consumo di grasso ungibordo

L'impianto ungibordo ha la funzione di spruzzare un velo di grasso lubrificante sul bordino della ruota ferroviaria, lubrificandone la superficie che sfrega contro la rotaia, allo scopo di ridurre l'usura, la produzione di calore e il rumore dovuto al contatto tra le due superfici in acciaio.

Le locomotive TRAXX sono dotate di un impianto ungibordo sviluppato dalla ditta DELIMON che è costituito da due pompe dosatrici pneumatiche che pressurizzano il fluido e lo inviano, tramite un sistema di tubi, fino agli ugelli che spruzzano il grasso sul bordino della ruota. L'impianto regola il numero delle spruzzate in base al numero di giri delle ruote.

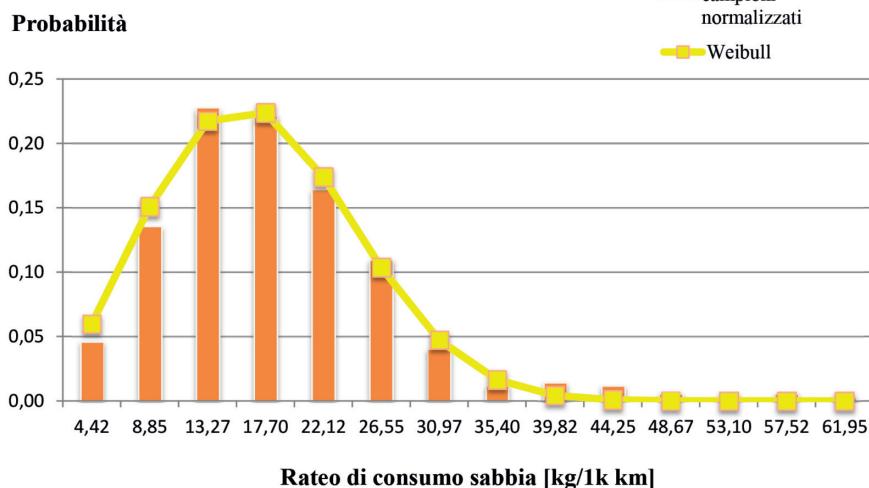


Fig. 5 - Distribuzione di probabilità del consumo di sabbia.
Fig. 5 - Distribution of sand consumption probability.

noted that for a battery in good condition and not subject to strong thermal stress there should be no need for topping up.

4.5. Sand consumption

Sand is used on board both railway and tram traction vehicles to increase the grip of the wheels on the tracks during the engine start, especially when the rolling surface is moist. The sand is contained in containers, called sandboxes, placed in the underbody or on bogies. Special pipes terminating in shaped nozzles distribute the sand by gravity or by pneumatic thrust on the rail surface immediately in front of the wheel.

The Traxx has eight sandboxes, one for each wheel, containing a total of 800 kg of sand that needs to be topped up periodically. The maintenance plans provides for the verification and topping up of sandboxes every 30.000 km.

On average the most likely sand consumption rate value, inferred from the maintenance checklists, is between 13 and 22 kg every 1.000 km. The average value is between 13,27 and 17,70 kg/1000, as can be seen in fig. 5.

During normal maintenance operations, that is to say, travelled distances of at least 30.000 km, an amount of sand ranging between 200 and 500 kg is usually topped up.

4.6. Wheel flange lubrication consumption

The wheel flange lubrication system's function is to spray a thin layer of grease on the railway wheel trim, lubricating the surface thereof that rubs against the track, in order to reduce wear, heat and noise due to the contact between the two steel surfaces.

TRAXX locomotives are equipped with a wheel flange lubrication system developed by the company DELIMON that consists of two pneumatic metering pumps that pressurise the fluid and send it through a piping system, up to the nozzles that spray the grease on the wheel flange. The system adjusts the number of sprays depending on the speed of the wheels.

On the occasion of preventative maintenance, the maintenance plan requires:

- replenishment of the lubricant as necessary, at each intervention;
- verification every 30.000 km that the nozzles are tight and there is no damage and checking the spray form, the frame above the nozzles of the wheel flange lubrication system, tubing, the bogie frame and the brake steering should also be inspected to make sure there are no grease deposits;

OSSERVATORIO

In occasione degli interventi di manutenzione preventiva il piano di manutenzione prescrive di:

- rabboccare il lubrificante se necessario, a ogni intervento;
- ogni 30.000 chilometri verificare che gli ugelli siano ben saldi e non ci siano danni e verificare la forma dello spruzzo, inoltre bisogna ispezionare il telaio sopra gli ugelli dell'impianto ungibordo, le tubazioni, il telaio del carrello e la timoneria del freno per controllare che non ci siano depositi di grasso;
- con periodicità semestrale si devono ispezionare i serbatoi di lubrificante per verificare se presentano danni o perdite di grasso e se sono stabilmente fissati;
- ogni anno va verificato il funzionamento del rubinetto di chiusura;
- ogni anno si controlla la tenuta dei tubi flessibili;
- ogni quattro anni si puliscono le pompe di dosaggio;
- ogni otto anni si sostituiscono le pompe di dosaggio, le elettrovalvole, le scatole dei conduttori, i distributori e ugelli con componenti nuovi o revisionati;
- infine quando viene eseguita una riprofilatura delle ruote bisogna regolare gli ugelli e verificare la forma dello spruzzo.

Dal numero di interventi elencato e dalla loro frequenza si nota l'importanza che assume la funzionalità dell'impianto e le complicazioni che presenta la sua corretta manutenzione.

Dai dati ricavati dalle checklist di manutenzione il consumo di grasso ungibordo si attesta mediamente su 2,63 kg per diecimila chilometri, infatti i valori del rateo di consumo con la maggiore probabilità sono vicini a 2,5 kg/10k km.

Nei normali intervalli di manutenzione, che sono pari a 30.000 km, è frequente il rabbocco di una quantità di grasso compresa tra 3 e 5 kg, in linea con il consumo medio rilevato.

5. Ottimizzazione dei costi di manutenzione

Attraverso il calcolo del rateo di consumo dei più importanti materiali usurabili è possibile effettuare una prima correzione della stima dei costi di manutenzione che aiuta a quantificare con maggior attendibilità i costi di manutenzione nella preparazione di offerte.

Infatti, il costo della manutenzione viene, solitamente, preventivato in fase di offerta basandosi sul piano di manutenzione del veicolo e su assunzioni da verificare attraverso l'analisi dei dati rilevati sul campo. In fig. 6 è mostrato lo schema a blocchi del processo volto a determinare il costo della manutenzione preventiva che in genere viene proposto ai clienti con tariffe espresse in Euro al chilometro.

Lo strumento impiegato per definire i costi di manu-

- biannual inspection of the lubricant tanks to see if there is damage or loss of grease and if they are firmly fixed;
- the annual check of the stopcock operation;
- the annual check of the flexible tubes tightness;
- cleaning of the dosing pumps every four years;
- replacement of the dosing pumps, solenoid valves, conduit boxes, distributors and nozzles every eight years with new or reconditioned components;
- finally when a re-profiling the wheels, the nozzles must be adjusted and the spray pattern must be checked.

The importance of system functionality and the complications that its proper maintenance shows can be noted from the number of interventions listed and their frequency.

From the data obtained from the maintenance checklists, the wheel flange lubrication grease consumption amounted on average to 2.63 kg per ten thousand kilometres; in fact the values of the most likely consumption rate are close to 2.5 kg/10k km.

In regular maintenance intervals, which are 30.000 km, topping up of grease between 3 and 5 kg is frequent, in line with the average consumption detected.

5. Optimisation of maintenance costs

By calculating the consumption rate of the most important consumable materials, a first maintenance cost estimate correction can be made that helps estimating the maintenance costs more reliably in the preparation of quotations.

In fact, the cost of maintenance is usually budgeted at the time of the offer based on the vehicle maintenance plan and assumptions to be verified by analysing field data. Fig. 6 shows the block diagram of the process designed to determine the cost of preventive maintenance that is generally offered to customers with rates expressed in Euro per kilometre.

The tool used to define maintenance costs is the Maintenance Cost Model, which is a detailed numeric model that contains all the activities provided by the Maintenance Plan; each activity is associated with a consumable material with the relative cost, periodicity with which it must be



Fig. 6 - Schema a blocchi riportante la procedura per la definizione dei costi di manutenzione preventiva.

Fig. 6 - Block diagram showing the procedure for defining preventive maintenance costs.

OSSErvatorio

tenzione è il Modello del Costo di Manutenzione che è un modello numerico dettagliato contenente tutte le attività previste dal Piano di Manutenzione; ad ogni attività è associato un materiale di consumo con il relativo costo, la periodicità con la quale deve essere rabboccato o rinnovato, la quantità media presente a bordo e la durata attesa del contratto di manutenzione.

Le attività vengono raggruppate in interventi a cui è associato un costo di manodopera.

L'applicazione delle tecniche CBM permette di incrociare i dati sui consumi, ottenuti dai rapporti degli interventi di manutenzione, con i dati contenuti nei report KPI elaborati dal monitoraggio giornaliero. In questo modo si possono sfruttare i contatori per individuare la vita residua dei componenti direttamente influenzati dall'usura dei materiali sopra analizzati.

Attualmente i report KPI sono stati costruiti per acquisire dalla locomotiva un'ampia gamma di grandezze relative alla cinematica del veicolo e dei pantografi, sull'utilizzo dell'impianto pneumatico di frenatura e degli impianti ausiliari e dati sul consumo energetico.

Si prevede l'implementazione anche di contatori relativi ad altre grandezze già presenti nella logica del veicolo, tramite una nuova versione del software di monitoraggio, e, anche, di rivedere la sensoristica di bordo per rendere possibile il monitoraggio di apparecchiature che attualmente ne sono prive.

Tramite le tecniche di CBM, operanti in sinergia con il monitoraggio continuo dei parametri di interesse, è possibile massimizzare la resa di ogni singola unità di materiale di consumo. Inoltre la consapevolezza delle condizioni di usura reale comporta una maggiore efficienza nella manutenzione, che si può concentrare su interventi mirati, e offre un considerevole vantaggio rispetto ad altri competitor che si affacciano sul mercato.

Infatti l'adozione di tecniche innovative come quelle presentate permette di:

- revisionare i costi di manutenzione;
- affiancare i nuovi strumenti al piano di manutenzione (fig. 7) per adeguare gli interventi al reale stato di salute degli asset, ovvero di quei componenti critici di elevato costo che dispongono di un'identificazione univoca tramite un numero seriale.

Appare evidente come la notevole quantità di dati raccolti e il coinvolgimento del personale nella gestione della manutenzione su condizione, portino ad un significativo aumento delle conoscenze sulle caratteristiche della propria componentistica e dei propri macchinari garantendo una solida base in grado di rendere la funzione di manutenzione più efficiente.

Vengono citati due esempi applicativi di queste tecniche.

Nel primo caso la variante della piattaforma TRAXX omologata per la velocità di 160 km/h è dotata di accele-

refilled or renewed, the average quantity on board and the expected duration of the maintenance contract.

Activities are grouped into interventions that are associated with labour costs.

The application of CBM techniques allows crossing the data on consumptions, obtained from maintenance service reports, with the data contained in KPI reports processed by day-to-day monitoring. This way, the counters to find the residual life of the components directly affected by the wear of the materials analysed above can be exploited.

Currently KPI reports have been built to acquire a wide range of magnitudes relating to vehicle and pantograph kinematics sizes, on the use of the pneumatic braking system and auxiliary systems and energy consumption data from the locomotive.

It is also planned to implement counters for other magnitudes already present in the vehicle logic, through a new version of the monitoring software, and also to review the on-board sensor to allow the monitoring of equipment that is currently lacking the same.

The yield of each single unit of consumable material can be maximised, using the CBM techniques working in synergy with continuous monitoring of the parameters of interest. In addition, awareness of real wear conditions entails increased maintenance efficiency, which can focus on targeted interventions, and offers a significant advantage over other competitors that are appearing on the market.

In fact, the adoption of innovative techniques such as those presented allows:

- reviewing maintenance costs;
- placing new tools side by side the maintenance plan (fig. 7) to adapt interventions to the real health conditions of assets, or those expensive critical components that have an unambiguous identification through a serial number.



Fig. 7 - Attraverso il ritorno di esperienza dal campo si correggono le assunzioni presenti nel Modello del Costo della Manutenzione e si applica la revisione del Piano di manutenzione per adeguare gli interventi al reale stato degli asset.

Fig. 7 - Through feedback from the field, the assumptions in the Maintenance Cost Model are corrected and the revision of the Maintenance Plan is revised to adjust interventions to the actual conditions of the assets.

rometri posizionati sui carrelli aventi la funzione di monitorarne il centraggio durante la marcia. Attraverso i rilevamenti di questi sensori è possibile avere informazioni sullo stato del rodiggio, in quanto un eventuale usura comporta anomalie nelle letture, è stato così possibile diradare il controllo e la misura delle ruote dagli interventi di manutenzione programmata. Tuttavia si nota che l'aggiunta dei sensori sui carrelli ha reso necessario includere anche un controllo periodico di integrità degli stessi.

Un'altra implementazione recente riguarda la torre di raffreddamento delle ultime varianti della TRAXX nella quale sono stati posizionati dei pressostati aggiuntivi per monitorare e misurare lo stato dei ventilatori che presentano criticità soprattutto sull'usura dei cuscinetti. In questo modo è possibile diradare i controlli in occasione degli interventi manutentivi mantenendo comunque sotto controllo un componente critico della catena di trazione.

6. Conclusioni

In questo articolo sono state presentate alcune caratteristiche dell'implementazione di un approccio innovativo alla gestione della manutenzione come il monitoraggio più fitto dei componenti delle locomotive, gli studi per elaborare opportuni contatori, valori di soglia e sistemi di monitoraggio e l'analisi dei consumi di materiali usurabili per prevederne la durata e le necessità di rabbocchi o sostituzioni.

Si sottolinea come lo sforzo ingegneristico richiesto per l'adozione di queste innovazioni comporta benefici sia per l'azienda responsabile della manutenzione sia per il cliente (acquirente del veicolo).

L'azienda responsabile della manutenzione beneficia delle maggiori conoscenze acquisite sul prodotto che, rimanendo entro il perimetro aziendale, costituiranno un vantaggio competitivo importante e di un miglioramento dei ricavi attraverso l'aggiornamento dei costi di manutenzione alle reali necessità operative. Inoltre, adeguando gli interventi manutentivi allo stato degli asset, è possibile variare la trama manutentiva originale.

Per il cliente (acquirente del veicolo) le ricadute economiche sono molteplici: per prima cosa un veicolo tenuto in piena efficienza in tutte le sue parti presenta ridotti rischi di fermate in linea dovute ad avarie (ricordiamo che tali fermate sono sanzionabili dal gestore della rete); inoltre la riduzione degli interventi di manutenzione correttiva aumenta la disponibilità del veicolo i cui fermi manutentivi possono essere programmati; infine il valore residuo del bene costituito dal veicolo degrada molto più lentamente se viene correttamente manutenuto.

In conclusione è possibile affermare che investimenti nella direzione della Condition Based Maintenance e del monitoraggio continuo dei più importanti parametri operativi, vanno aumentando in più realtà industriali in

It is evident that the vast amount of data collected and the involvement of personnel in condition-based maintenance management lead to a significant increase in knowledge on the characteristics of their components and machinery, ensuring a solid foundation that can make the maintenance function more efficient.

Two application examples of these techniques are quoted.

In the first case, the variant of the TRAXX platform approved for 160 km/h speed is equipped with accelerometers positioned on the bogies with the function of monitoring centring during running. Through the detections of these sensors it is possible to obtain information about the status of the wheel arrangement, as possible wear involves anomalies in the readings; it was thus possible to space out the control and measurement of the wheels by scheduled maintenance. However, it is noteworthy that the addition of the sensors on the bogies also required a periodic check of their integrity.

Another recent implementation concerns the cooling tower of the latest variants of the TRAXX in which additional pressure switches have been placed to monitor and measure the conditions of fans that are critical especially on the wear of bearings. In this way, controls during the maintenance work can be reduced while still maintaining a critical component of the traction chain under control.

6. Conclusions

This article presents some features of the implementation of an innovative approach to maintenance management such as more intense monitoring of locomotive components, studies for processing appropriate counters, threshold values and monitoring systems, and analysis of consumption of consumable materials to anticipate the duration thereof and the need for top ups or replacements.

It should be noted how the engineering effort required to adopt these innovations entails benefits both for the maintenance company and for the customer (vehicle purchaser).

The maintenance company benefits from the increased knowledge of the product that, remaining within the business scope, will be an important competitive advantage and revenue improvement through the upgrade of maintenance costs to real operating requirements. Additionally, by adjusting the maintenance interventions to the condition of the assets, the original maintenance scheme can be modified.

For the customer (purchaser of the vehicle), there are many economic relapses: firstly, a fully maintained vehicle in all its parts has reduced risk of online stops due to failures (remember that such stops are sanctioned by the network operator); moreover, the reduction of corrective maintenance work increases the availability of the vehicle whose maintenance downtime can be programmed; finally, the residual value of the vehicle asset degrades much more slowly if it is properly maintained.

In conclusion, it can be affirmed that investments in the direction of Condition Based Maintenance and the con-

OSSErvatorio

quanto le ricadute a medio e a lungo termine possono dare degli importanti ritorni economici.

Ulteriore aspettativa si ripone nell'adozione generalizzata di queste tecniche e nella crescita della consapevolezza, ottenuta dal ritorno delle informazioni dal campo, sul comportamento e le prestazioni dei singoli componenti. Continuando gli studi in questo campo sarà possibile rivedere i fondi posti a copertura di eventi inattesi, cioè quelli destinati a gestire e mitigare il rischio, con lo scopo di ridurne la consistenza e garantire, comunque, la massima sicurezza e la piena disponibilità dei veicoli.

tinuous monitoring of the most important operational parameters are increasing in several industrial realities, as the medium and long-term effects can yield significant economic returns.

Further expectations lie in the general adoption of these techniques and in the growth of awareness, obtained from feedback from the field, on the behaviour and performance of the individual components. Continuing studies in this area, will allow reviewing the funds covering unexpected events, i.e. those designed to manage and mitigate the risk, with the aim of reducing consistency and however ensuring maximum safety and full availability of vehicles.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] UNI EN 13306, "Manutenzione - Terminologia di manutenzione", Agosto 2010.
- [2] MARTIN A., "CBM, la manutenzione che predice il futuro", Automazione e Strumentazione, 11-10-2012, 44-47.
- [3] A. K.S. JARDINE, D. LIN, D. BANJEVIC, "A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance", Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 20, Issue 7, October 2006, 1483-1510.
- [4] Decreto ANSF n. 4/2012 del 09 Agosto 2012 - Emanazione delle "Attribuzioni in materia di sicurezza della circolazione ferroviaria".
- [5] ANSF, "Linee guida inerenti la documentazione relativa alla manutenzione dei veicoli", Rev.A, 23-06-2015.
- [6] CORFIATI M., DALLA CHIARA B., GALFRÈ M., "Linee evolutive nella manutenzione dei rotabili ferroviari Evolutionlines in the maintenance of rolling stock", 2011 Ingegneria Ferroviaria, 66(9),751-772.
- [7] AHMAD R., KAMARUDDIN S., "An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application", Computer & Industrial Engineering, 2012, 63, 135-149.
- [8] CAVIGLIA A., CASARZA MAGRO M., PINCETI P., ANTONELLI M., DE PAOLA E., MARINO E., "Methods, techniques and algorithms for condition based maintenance of railway vehicles", 14th IMEKO TC10 Workshop Technical Diagnostics, 2016, Milan (I).
- [9] LEE K.K.H., KONG W.D., "Condition based monitoring in railway", Journal of International Council on Electrical Engineering (2012), 2, 99-103.
- [10] DINMOHAMMADI F., ALKALI B., SHAFIEE M., BÉRENGUER C., LABIB A., "Risk Evaluation of Railway Rolling Stock Failure Using FMEA Technique: A Case of Study of Passenger Door System", Urban Rail Transit, 9-17-2016.
- [11] AGNOLI A., DEL GOBBO G., ROMANO F., ZAVARELLA M., "The benefits of using Trenitalia's Tele-diagnostic system while operating and during maintenance of the E464 fleet", 2014, Ingegneria Ferroviaria, 5 (69), 461-471.
- [12] DEL GOBBO G., GIOVANNUZZI M., ROMAIRONE M., MASINI P., RIZZO S., ROMANO F., ROMEO M., "Il sistema di Telediagnistica per le flotte E464 ed E405 di Trenitalia", 2012, Ingegneria Ferroviaria, 2,137-160.