

Evolution lines in the maintenance of rolling stock / Linee evolutive nella manutenzione dei rotabili ferroviari

*Original*

Evolution lines in the maintenance of rolling stock / Linee evolutive nella manutenzione dei rotabili ferroviari / Corfiati, M., DALLA CHIARA, B., Galfrè, M.. - In: INGEGNERIA FERROVIARIA. - ISSN 0020-0956. - STAMPA. - LXVI:n. 9(2011), pp. 751-772.

*Availability:*

This version is available at: 11583/2486981 since:

*Publisher:*

CIFI

*Published*

DOI:

*Terms of use:*

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

*Publisher copyright*

(Article begins on next page)



## Linee evolutive nella manutenzione dei rotabili ferroviari

## Evolution lines in the maintenance of rolling stock

Dott. Ing. Marco CORFIATI<sup>(\*)</sup>, Prof. Ing. Bruno DALLA CHIARA<sup>(\*\*)</sup>, Dott. Ing. Marco GALFRE<sup>(\*\*\*)</sup>

### 1. Premessa

L'articolo propone uno stato dell'arte sulla manutenzione dei rotabili ferroviari, che negli ultimi anni sta evolvendo verso forme e strategie sempre più raffinate ed efficienti, finalizzate a ridurre, se non ad annullare, tempi inattivi e costi superflui. Tali nuove strategie manutentive vanno sempre più affiancandosi a sistemi tecnologici d'ultima generazione, quali sensori potenziati e sistemi d'intelligenza artificiale.

L'articolo definisce le idee-chiave di questa trasformazione, già avvenuta in altri settori, che si sta affacciando anche nel contesto ferroviario con prospettive di sale di tediagnosi da parte dei manutentori del materiale rotabile.

### 2. Introduzione

La manutenzione sta ricevendo un rinnovato impulso ed attenzione, grazie all'accresciuta sensibilità agli aspetti di sicurezza, qualità, efficienza, sostenibilità e conservazione che si stanno positivamente sviluppando nella nostra società. Attualmente il quadro manutentivo europeo è normato, con riferimento all'Italia, dalla UNI EN 13306 (Manutenzione - Terminologia di manutenzione, 2010) che descrive le strategie di manutenzione (fig. 1), alla quale si affiancano le specifiche tecniche STI 2002/730/CE (sottosistema Manutenzione del sistema ferroviario ad alta velocità) per la manutenzione per l'alta velocità.

Per quanto riguarda gli elementi meccanici aventi elevato grado di criticità - quali boccole, riduttori, sale montate - la via che si va prospettando negli ultimi tempi è quella di poter conoscere lo stato del componente avvalendosi di una manutenzione "su condizione"<sup>(1)</sup>, definita come la manuten-

### 1. Abstract

The article describes a state of the art on the maintenance of rolling stock, which - in these last few years - is evolving towards increasingly refined, efficient forms and strategies, aimed at reducing - if not eliminating altogether - any downtime and unnecessary cost. Said new maintenance strategies are progressively being accompanied by technological systems of the latest generation, such as enhanced sensors and artificial intelligence.

This article intends to define the key ideas of this transformation, which has already occurred in other sectors and is now addressing the railway industry as well, through perspectives of remote diagnostic rooms managed by the rolling stock maintenance operators.

### 2. Introduction

Maintenance is receiving new drive and focus, thanks to the increased sensitivity to aspects such as safety, security, quality, efficiency, sustainability and preservation, which are successfully developing in our society. The current European maintenance framework is governed - as related to Italy - by standard UNI EN 13306 (Maintenance - Terminology, 2010) which describes the maintenance strategies (fig. 1), supported by technical specifications TSI 2002/730/EC ("Maintenance subsystem of the trans-European high-speed rail system") for the maintenance of the high-speed trains.

As related to the mechanical parts affected by a high level of criticality, such as bushings, gearboxes and wheel sets, the approach which is recently coming to light focuses on allowing the ascertainment of the component status by means of "on-condition maintenance"<sup>(1)</sup>, i.e. pre-

<sup>(\*)</sup> Politecnico di Torino.

<sup>(\*\*)</sup> Politecnico di Torino, Dip. DITIC-Trasporti.

<sup>(\*\*\*)</sup> Alstom Ferroviaria.

<sup>(1)</sup> Ovvero *on condition*; il significato è: su condizione, diverso da "condizionale"; su condizione indica una scelta oggettiva, mentre condizionale introduce una discrezionalità dell'operatore che non garantisce riproducibilità. Ovviamente il contributo dell'operatore è fondamentale, ma deve essere messo a sistema.

<sup>(\*)</sup> Politecnico di Torino.

<sup>(\*\*)</sup> Politecnico di Torino, Dip. DITIC-Trasporti.

<sup>(\*\*\*)</sup> Alstom Ferroviaria.

<sup>(1)</sup> *On-condition*; identifies an objective choice, whilst "conditional" would introduce some discretion by the operator and would not guarantee reproducibility. The contribution by the operator is obviously essential, but it has to be entered into the system.

zione preventiva basata sul monitoraggio delle prestazioni di un'entità, o dei parametri significativi per il suo funzionamento, e sul controllo dei provvedimenti conseguentemente presi.

La manutenzione secondo condizione viene definita sulla base di parametri che consentono di capire qual è lo stato effettivo della macchina; questi sono rilevati attraverso una programmata e codificata serie di misure, ispezioni visive, controlli non distruttivi, prove operative o funzionali senza, in genere, dover smontare le componenti del sistema.

Questa strategia di manutenzione non utilizza metodi probabilistici per effettuare una prognosi dei guasti, ma adopera l'andamento antecedente dei parametri monitorati per predire i guasti potenziali. La manutenzione su condizione va quindi intesa come un processo diagnostico che, fornendo indicazioni sullo stato "di salute" della macchina, consente di pianificare interventi di revisione, basandosi sulle reali condizioni delle componenti piuttosto che sul tempo di funzionamento.

È una filosofia manutentiva [1] che, oltre a permettere indubbi vantaggi economici ed operativi, ha anche rilevanti implicazioni sulla progettazione. Infatti, per ridurre al minimo i tempi passivi dovuti ai controlli solitamente più frequenti, è opportuno che il sistema sia dotato di una serie di accessi necessari alla determinazione dello stato di efficienza delle componenti. Pertanto l'individuazione delle parti da sottoporre a revisione, l'identificazione dei parametri significativi nonché la definizione delle frequenze di controllo sono tutte attività che devono essere sviluppate in parallelo all'avanzamento della progettazione tecnica<sup>(2)</sup>.

Come primo effetto, l'adeguamento della progettazione renderà più facilmente accessibili e misurabili le varie componenti. Successivamente, si potrà realizzare un ulteriore affinamento del processo manutentivo avvalendosi di sistemi di "lettura" e "controllo" in tempo reale dei componenti critici in modo automatico e continuativo.

<sup>(2)</sup> In parallelo si ha anche l'attività di *concurrent engineering*, che coinvolge la progettazione (ingegneria di prodotto) e l'ingegneria di produzione.

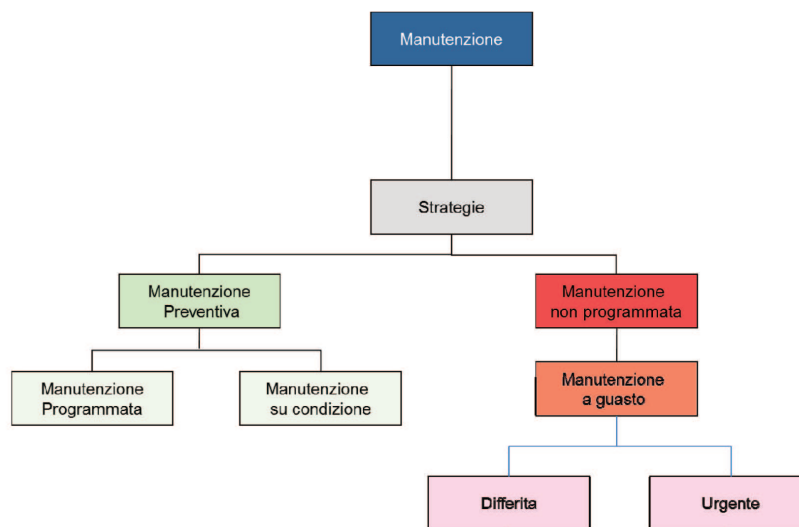


Fig. 1 - Strategie manutentive in base alle norme tecniche vigenti. *Maintenance strategies on the basis of the technical standards in force [translation in the fig. 13].*

ventive maintenance based upon monitoring the performance of a unit, or of those parameters which are significant for its operation, as well as on the verification of the measures which would be subsequently taken.

On-condition maintenance is defined on the basis of parameters which allow understanding the actual status of the machinery; said parameters are detected through a programmed, codified set of measurements, visual inspections, non-destructive checks, operational or functional tests with no need - in general - to strip off the components from the system.

This maintenance strategy does not resort to any probabilistic methods to develop some sort of prognosis; it rather uses the previous trend of the monitored parameters in order to forecast the potentially forthcoming failures. On-condition maintenance is therefore to be looked at as a diagnostic process which - providing indications on the "health" status of the machinery - enables to plan overhaul actions on the basis of the actual conditions of the components rather than on their length of service.

It is a maintenance philosophy [1] which - besides allowing for obvious savings and operational advantages - has also a significant impact on the engineering: in order to minimize the downtime due to usually more frequent checks, the system needs to be provided with accesses required to determine the status of efficiency of the components. Subsequently, the identification of the parts to be overhauled - as well as the definition of the checking frequencies - are activities which must be developed parallel to the progress of the engineering design<sup>(2)</sup>.

As a first result, the design is to be developed so that the different components will be easily accessible and measurable. The maintenance process can then be further refined by relying to real-time "reading" and "monitoring" systems of the components in an automatic continuous way.

<sup>(2)</sup> This activity is developed in parallel with the so-called *concurrent engineering*, which involves both product and production engineering.

Si limita così l'incremento del margine di rischio che una manutenzione su condizione potrebbe, se non correttamente concepita, portare con sé rispetto alla più diffusa manutenzione programmata.

È altresì chiaro come le nuove strategie manutentive richiedano di operare sul singolo oggetto, rendendo quindi necessaria la *tracciabilità* delle singole parti. Tuttavia, il cambiamento comporterà vantaggi a lungo termine in termini di riduzione dei ritardi nei tempi connessi alla logistica, all'ottimizzazione delle scorte, alla riduzione degli sprechi e dei guasti casuali.

### 3. Manutenzione su condizione

L'assunto di partenza della manutenzione su condizione è che solo raramente un componente giunge al guasto in modo improvviso [2]; nella maggioranza dei casi - soprattutto per sistemi meccanici, idraulici, pneumatici - il guasto costituisce il punto d'arrivo di un deterioramento progressivo, deterioramento che si può schematizzare con la curva P-F (fig. 2).

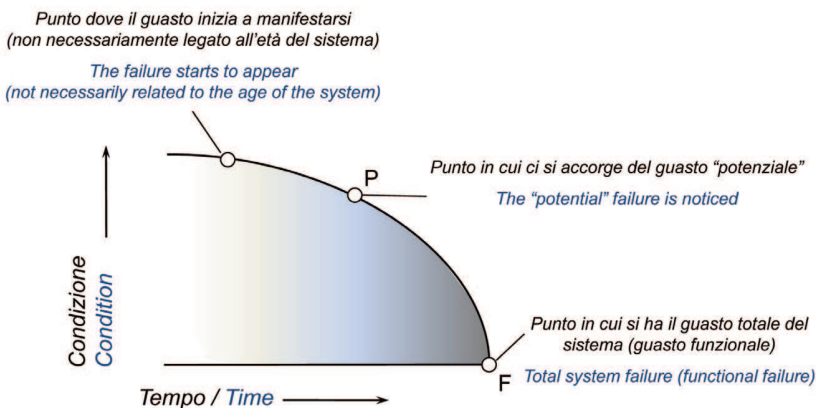


Fig. 2 - Curva P-F (BENGTSSON, 2002 [2]). P-F Curve (BENGTSSON, 2002 [2]).

Questa curva mostra come un guasto inizi ed evolva fino al punto nel quale sia possibile rilevarlo: il punto P è quello di un guasto *potenziale*. Successivamente, se il guasto non è stato rilevato e non sono state prese le opportune contromisure per arginarlo, esso continuerà ad evolvere portando ad un deterioramento maggiore: si ha un degrado delle condizioni nel tempo; di solito questo degrado avviene più velocemente rispetto al tempo pregresso, finché non si raggiunge il guasto funzionale (punto F).

Nella pratica ci sono molti modi per determinare se i guasti sono in procinto di verificarsi: ad esempio, vibrazioni che possono indicare un imminente guasto di cuscinetti, un aumento del livello di contaminanti nell'olio lubrificante che indica un imminente guasto alle parti lubrificate, ecc. Le azioni volte al rilevamento dei guasti potenziali sono note come azioni del *condition monitoring*.

Se un guasto potenziale viene rilevato tra il punto P e il punto F, può essere ancora possibile intervenire per prevenire il guasto funzionale o, al più, per limitarne i danni.

This allows limiting the increased margin of risk that on-condition maintenance - if not devised as appropriate - might entail versus the more conventional scheduled maintenance.

It is also obvious that such new maintenance strategies need to operate on the specific object, and this calls for the traceability of the different parts. Nevertheless, the change shall generate long-term advantages as related to reducing the delays generated by logistics, optimizing the inventory, reducing both waste and accidental failures.

### 3. On-condition maintenance

The starting assumption of on-condition maintenance is that only rarely a component does fail all of a sudden [2]; in most cases - mainly for mechanical, hydraulic and pneumatic systems - the failure is the point of arrival of progressive deterioration, which can be schematized through the P-F curve (fig. 2).

This curve shows that a failure starts and evolves up to the point where it can be detected: point P is the one of a potential failure. Then, if the failure is not detected and the appropriate countermeasures to stop it are not taken, it will keep on evolving, thus generating greater deterioration: the conditions decay throughout time - usually faster than the time that elapsed before - until the functional failure (point F) is reached.

In practice, there are several ways to determine whether failures are about to occur: for instance, vibrations which may indicate an imminent crash of bearings, increased level of contaminants in the lubrication oil which would generate an imminent failure of the lubricated parts, and so on. The actions aimed at detecting such potential failures are known as *condition monitoring*.

If a potential failure is detected between points P and F, the functional failure can still be prevented or, at least, the damage it may generate can be limited.

The P-F interval affects the frequency on which predictive maintenance should be carried out [3]. The interval for the inspections of on-condition maintenance must be significantly shorter than the P-F interval, so that the potential failure can be detected before it turns into a functional one.

A CBM (*Condition Based Maintenance*) program consists of three essential stages, namely (fig. 3):

- *data acquisition* (information collection), in order to obtain relevant data for the correct operation of the system, performed through sensors of different nature in compliance with the monitored parameters;

L'intervallo P-F condiziona la frequenza con la quale la manutenzione predittiva andrebbe effettuata [3]. L'intervallo per le ispezioni della manutenzione su condizione deve essere significativamente inferiore all'intervallo P-F se si desidera rilevare il guasto potenziale prima che diventi un guasto funzionale.

Un programma di manutenzione CBM (*Condition Based Maintenance*) si compone di tre fasi fondamentali (fig. 3):

- *di acquisizione dati* (raccolta di informazioni), per ottenere dati rilevanti per il buon funzionamento del sistema, eseguita tramite sensori di varia natura a seconda di quelli che sono i parametri monitorati;
- *di elaborazione dati* (gestione delle informazioni), per gestire e analizzare i dati o segnali raccolti nella fase 1 per una migliore comprensione ed interpretazione dei dati, effettuata dagli operatori con l'ausilio ed il supporto di tecniche d'intelligenza artificiale (reti neurali, sistemi esperti, ... [4]);
- *decisionale* nel processo manutentivo, che consiste nel raccomandare le politiche di manutenzione più efficaci, anche attraverso la manutenzione predittiva.

L'adozione di una siffatta strategia manutentiva permette certamente d'effettuare la manutenzione solo quando è necessaria, rendendo così più appropriato ed economico il sistema di gestione delle scorte e quello delle attività logistiche; inoltre il monitoraggio dello stato di "salute" dei componenti permette di variare le condizioni di funzionamento del sistema, il suo carico (*work-load*) in base alle effettive condizioni del sistema e ciò permette un aumento della vita del sistema. A fronte di questi indiscutibili vantaggi vi è inevitabilmente da considerare un costo d'implementazione del sistema di monitoraggio, presumibilmente elevato rispetto ai costi di produzione, ed una maggior conoscenza della materia da parte degli operatori, che vanno adeguatamente addestrati.

#### 4. La manutenzione su condizione (CBM) sui convogli ferroviari

Un certo numero di difficoltà è stato riscontrato allorché si è cercato d'applicare la manutenzione su condizione sui mezzi in movimento, come può essere un rotabile ferroviario, in quanto questo - a differenza d'un ordinario macchinario di un impianto industriale - si trova ad essere esposto a differenti condizioni di funzionamento, specialmente climatiche o ambientali, nelle diverse stagioni dell'anno; inoltre il possibile deterioramento e la manutenzione, nel caso dei rotabili, saranno anche connesse alla *posizione* geografica ed alle *modalità di deposito*.

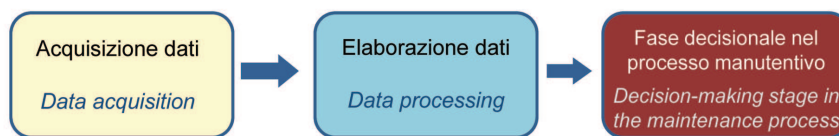


Fig. 3 - Fasi di un programma CBM (*Condition Based Maintenance*). Stages of a CBM (*Condition Based Maintenance*) program.

- *data processing* (information management), to manage and analyse the data or signals collected during stage 1 for a better understanding and interpretation of the data, performed by the operators with the support of artificial intelligence techniques (e.g. neural networks, expert systems, ... [4]);
- *decision-making* in the maintenance process, which consists of recommending the most efficient policies, also through predictive maintenance.

The adoption of such strategy will certainly allow performing maintenance only when required, thus obtaining a more appropriate, cost-effective management system of both the inventory and the logistic activities; furthermore, the monitoring of the "health" status of the components enables to vary the operational conditions of the system and its *work-load* in compliance with the actual requirements, with a subsequent increase in the life of the system itself. These unquestionable advantages inevitably involve a cost for the implementation of the monitoring system - which will be presumably high if related to the production cost - and the call for deeper knowledge of the matter by the operators, who will have to be trained as appropriate.

#### 4. Condition Based Maintenance (CBM) on trains

Some difficulties have been found when on-condition maintenance was tried to be applied on moving means, such as rolling stock, since the latter - unlike the ordinary machinery of an industrial plant - is exposed to different operation conditions, which are mainly related to climate and/or environment in the different seasons of the year. Furthermore, the possible deterioration and the subsequent maintenance, in case of rolling stock, also depend on both the geographic position and to the storage *modalities*.

Since the system is not stationary, in the railway industry (as related to both the building of the means and their service on the lines) the data supplied in real time for the analysis and diagnosis of the components must be sent from the means under exam to a maintenance *centre* (fig. 4). There are at least two different ways, with a different allocation of "intelligence", either on board or on the floor: an alternative option would be analysing and performing diagnoses on-board the train, supplying the data only with clear, decisive information on its trav-

Vista la non stazionarietà del sistema, nel campo ferroviario (costruzione ed esercizio), i dati forniti in tempo reale per l'analisi e la diagnosi dei componenti devono essere mandati dal mezzo in esame ad un *centro manutentivo* (fig. 4). Esistono almeno due modi diversi, con una diversa attribuzione di "intelligenza", a bordo o a terra: un'alternativa prevede d'analizzare ed effettuare diagnosi a bordo treno, inviando al centro dati solo informazioni già chiare e decisive sulle condizioni in cui sta circolando il mezzo; l'altra consiste nel collezionare in tempo reale tutti i dati relativi allo stato del rotabile e d'inviarli in blocco al centro manutentivo, che dovrà comprendere quali dati siano effettivamente importanti.

Questa trasmissione di dati, in ambo le soluzioni, può essere effettuata sfruttando tecniche *wireless* sul corto e sul lungo raggio.

Per prevedere la vita utile residua devono essere tenuti in considerazione più fattori: serie storiche dei dati, delle condizioni di funzionamento, della missione, dei guasti, resoconto degli interventi manutentivi svolti, modello informativo e ricambi effettuati, algoritmi. I sistemi intelligenti possono essere programmati ed hanno le funzioni per rispondere alle seguenti domande:

- in quale componente, sistema o sottosistema, si riscontrano sintomi di guasto;
- quali sono le cause dei sintomi di guasto;
- quanto tempo può restare fino al guasto definitivo o irreversibile;
- quali sono le conseguenze che comporta il guasto nel componente, a livello treno;
- quali sono le azioni manutentive da effettuarsi, nel caso siano ben individuabili.

Per perseguire tale obiettivo, sui rotabili ferroviari occorre installare sensori ed altri equipaggiamenti di misurazione, uno o più database temporanei e per il monitoraggio delle condizioni, in grado di confrontare il dato ottenuto in tempo reale con la serie storica dei guasti, per un controllo più agevole e veloce.

Le funzioni di analisi e predizione sono, nella maggior parte dei casi, localizzate nel *centro manutentivo*, quindi non a bordo treno: questo avviene perché la tecnica di trasferimento di un elevato numero di dati misurati in tempo reale non è più, ad oggi, un problema insormontabile; nel caso di banda disponibile per il servizio ferroviario (GSM-R), può non risultare neppure un problema di oneri di trasmissione. Con questa impostazione - cioè portare a terra grandi elaboratori di dati e sistemi complessi di diagnosi remota - si può anche abbassare notevolmente il costo della potenza dei computer montati a bordo treno, che vengono soprattutto esonerati dalle funzioni d'analisi e predizione, lunghe, articolate e spesso comuni ad una flotta di treni.

el conditions; the other one would be collecting in real time all the data relevant to the status of the rolling stock and sending them as a block to the maintenance centre, which shall have to discern what data are actually significant.

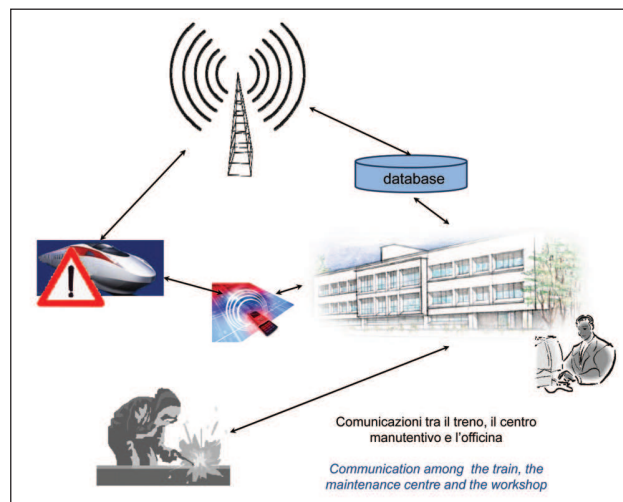


Fig. 4 - Manutenzione su condizione sui treni (BENGTSSON, 2002).  
On-condition maintenance on the trains (BENGTSSON, 2002).

Such transmission of data, in either case, can be carried out using *wireless* techniques on both the short and long ranges.

In order to forecast the remaining useful life, several factors have to be taken into account, namely: historical series of data relevant to running conditions, missions and failures; reporting of the maintenance actions performed; information model and spare parts replaced; algorithms. The intelligent systems can be programmed and are provided with functions which can answer the following questions:

- in which component, system or subsystem the symptoms of the failure are detected;
- what are the causes of the failure symptom;
- how much time may remain before the final irreversible failure;
- what are the consequences the component failure entails for the train;
- what are the maintenance actions to be performed, in case they can be exhaustively detected.

In order to pursue this objective, the rolling stock should be provided with sensors and other measurement equipment, and one or more temporary databases for the monitoring of the conditions which can compare the data obtained in real time versus the historical series of the failures, for an easier and faster check.

The analysis and forecast functions are - in most cases - located in the maintenance *centre*, and therefore not on-

Si deve però ricordare che un rotabile ferroviario è ormai un sistema complesso: per questo si prefigura praticamente impossibile il monitoraggio di ogni suo componente, pertanto ci si deve focalizzare su alcuni impianti, rimandando ad eventuali tempi futuri l'idea – al momento ancora non perseguibile, salvo prova contraria - di un monitoraggio totale.

I componenti con funzioni critiche per la sicurezza (cfr. oltre), sia per le attività ed operazioni sia per gli utenti, sono sicuramente oggi i più monitorati; alcuni di questi sono:

- ruote;
- boccole;
- freni;
- sistema porte;
- filtri;
- sistemi con acqua e/o aria in pressione;
- componenti con correnti o tensioni eventualmente dannose;
- parti rotanti in generale.

Alcuni studi (BENGTSSON, 2002 [2]) hanno dimostrato che un corretto utilizzo della CBM, o di un programma di manutenzione predittivo, sia in grado di fornire, per un medesimo rotabile a parità di impiego, un risparmio che va dall'8% al 12% rispetto ad un programma di manutenzione basato solo sulla manutenzione programmata a scadenze (km, ore, cicli), detta anche manutenzione "hard".

Indagini indipendenti dallo studio sopra citato mostrano i seguenti risultati indicativi industriali medi, ottenuti a seguito dell'implementazione di un programma manutentivo predittivo su diversi tipi di macchinari e componenti:

- riduzione dei costi di manutenzione: dal 25 al 30%;
- eliminazione dei guasti: dal 70 al 75%;
- riduzione dei tempi di fermo: dal 35 al 45%;
- aumento della produzione: dal 20 al 25%;
- aumento della vita operativa/disponibilità del componente;
- riduzione dei costi di materiali e manodopera;
- migliore qualità del prodotto;
- miglioramento della sicurezza dei lavoratori;
- miglioramento della sicurezza ambientale;
- miglioramento del morale dei lavoratori;
- risparmio energetico.

Gli svantaggi presenti sono:

- attrezzature diagnostiche che, essendo costose, aumentano l'investimento;

board the train: this occurs because the technique to transfer a high number of data measured in real time is no longer - to date - an issue which cannot be overcome; in case of band available for the railway system (GSM-R), the charges for data transmission will not be burdensome either. This setting - i.e. large computers and complex systems of remote diagnosis on the floor rather than on-board the train - may also allow to reduce significantly the power - and hence the cost - of the on-board computers, since they will not need to perform the analysis and forecast functions, which are long, articulated and often common to a whole fleet of trains.

It is worth reminding - though - that the rolling stock is nowadays a complex system: this is why monitoring every component would be virtually impossible, hence the need to focus on specific systems, postponing the idea of total monitoring, which to date - unless the contrary can be proven - cannot be pursued yet.

The most widely monitored components nowadays are certainly the ones whose functions are critical for safety (see further on), both in their activities and for the users, such as:

- wheels;
- bearings;
- brakes;
- door system;
- filters;
- systems with water and/or air under pressure;
- components with currents or voltages which can be dangerous;
- rotating parts in general.

Some studies (BENGTSSON, 2002 [2]) have shown that an appropriate use of CBM - or of any predictive maintenance program - can ensure, for the same rolling stock at the same frequency of use - savings ranging from 8% to 12% versus the conventional programmed routine maintenance (based only on km, hours and/or cycles), i.e. the so-called "hard" maintenance.

Investigations independent on the aforementioned study show the following average indicative results, which are obtained from the implementation of a predictive maintenance program on different types of machinery and equipment:

- reductions in the maintenance cost : 25 to 30%;
- failure elimination: 70 to 75%;
- downtime reduction: 35 to 45%;
- production increase: 20 to 25%;
- increase of the operational life/availability of the component;
- reduction in the cost of both materials and labour;

- la formazione del personale, dovendo essere di più alto livello e competenza, il che aumenta l'investimento;
- il ritorno dell'investimento, in termini di risparmio quantificabile, presumibilmente a tempi medio-lunghi, salvo una politica nel trasporto ferroviario più premiante per la manutenzione, come ad esempio avviene in campo aeronautico, per metropolitane a guida automatica e per veicoli stradali.

### 5. Rilevamento dei guasti potenziali (*condition monitoring*)

La CBM, come sopra emerso, si basa sul *condition monitoring*, che può considerarsi come l'insieme delle procedure occorrenti per la valutazione delle condizioni attuali d'un impianto o apparato, sulla base delle quali intraprendere eventuali modifiche ai sistemi stessi o al programma di manutenzione. Tale valutazione è ottenuta mediante tecniche che spaziano dall'uso di complesse strumentazioni computerizzate allo sfruttamento della sensibilità umana, effettuando misurazioni comparative, periodiche o continuative, dei parametri che si ritiene ben rappresentino le condizioni del componente o sistema oggetto dell'analisi, permettendo così di valutarne la situazione corrente e l'andamento futuro in vista di un suo possibile deterioramento. Questo viene fatto al fine di prevenire i guasti e di mettere in atto la manutenzione solo in presenza di un'avaria potenziale e quando risulti più conveniente in base al programma di produzione e di servizio nel caso dei rotabili.

Le tecniche di monitoraggio più utilizzate per i sistemi meccanici possono essere classificate nei seguenti tipi fondamentali:

- monitoraggio visivo;
- monitoraggio delle *performance* e delle funzioni;
- monitoraggio del rumore e delle vibrazioni;
- monitoraggio del particolato da usura;
- monitoraggio del calore.

Nel campo ferroviario sono stati talora applicati tali sistemi di monitoraggio funzionale o diagnostico dei rotabili, fin dagli anni '90 (casi Fiat, poi Alstom).

Di seguito si tenta di fornire un quadro sintetico delle varie tecniche di *condition monitoring* ad oggi presenti in ambito ferroviario e dei rotabili.

Per quanto concerne il monitoraggio visivo dei componenti, vi sono tecniche di monitoraggio dell'arco elettrico prodotto dallo strisciante con la linea di contatto (fig. 5) per valutare lo stato d'usura dello strisciante (Banverket e Green Cargo [5]) e del suo allineamento, sfruttando tecniche fotografiche e di visione artificiale: un esempio è il sistema svedese denominato KIKA; monitoraggio del profilo e dell'usura delle ruote utilizzando tecnologie laser e telecamere (Australia, Olanda e Inghilterra). Si tratta in generale di applicazioni non effettuate in esercizio nor-

- better quality of the product;
- increased safety for the employees;
- improved safety of the environment;
- improved morale amongst the employees;
- energy savings.

The current disadvantages are:

- expensive diagnostic equipment, with a subsequent increase of the investment;
- the training of the personnel, which must be of higher level and competence, with a subsequent increase in the investments;
- the return on the investment, in terms of quantifiable savings, which is assumed to be on the medium to long term, except in case railway transport policies which should be more rewarding for maintenance, as it is the case - for instance - of aircrafts, automatic driving underground trains and road vehicles.

### 5. Detection of the potential failures (*condition monitoring*)

As shown above, CBM is based upon *condition monitoring*, which can be considered as the set of procedures required to assess the current conditions of either a system or an apparatus, on the whose basis changes on either the systems themselves of the maintenance program should be undertaken. Such evaluation is obtained through techniques which range from the use of complex computer tools to human sensitivity, making either periodical or continuous comparative measurements of those parameters which are believed to reliably represent the conditions of the component or system which is being analysed, thus enabling to assess its current status and the forthcoming trend in the perspective of its potential deterioration. This is done in order to prevent the failures and perform maintenance just in case of a potential failure and when it results more appropriate on the basis of the production and service (in the case of the rolling stock) schedules.

The most utilized techniques for the mechanical systems can be classified into the following main categories:

- visual monitoring;
- monitoring of both the *performance* and the functions;
- noise and vibration monitoring;
- monitoring of the wear parts;
- heat monitoring.

In the railway industry, such functional or diagnostic monitoring systems have been applied to the rolling stock since the nineteen nineties (cases in Fiat, then Alstom).



Fig. 5 - Monitoraggio dell'arco elettrico (Banverket & Green Cargo, [5]). *Monitoring of the electric arch (Banverket & Green Cargo, [5]).*

male, stanti le necessità di analisi e verifica ad esse connesse, ma un domani delegabili ad un centro di monitoraggio remoto, anche solo su alcuni treni attrezzati.

Il monitoraggio delle *performance* è invece attuato quando si passa da un guasto incipiente, in cui con opportuni mezzi s'individuano i primi segni di degrado senza che l'utente abbia già avvertito modifiche nelle *performance*, ad un guasto imminente (condizione di percettibile degrado in presenza di un serio deterioramento delle prestazioni). In tal caso si vanno a monitorare parametri indicativi di un certo peggioramento delle *performance* (ad esempio, pressione di un fluido o efficienza degli scambi termici). Esempio ferroviario è il sistema T/BOGI svedese capace di monitorare le *performance* del carrello (forze scambiate con il binario, posizione,...) o sistemi simili sviluppati dalla *Association of American Railroads (AAR)*.

Il monitoraggio dell'emissione *acustica* permette di tenere sotto controllo l'evoluzione dei difetti di alcuni tipi di componenti durante il loro esercizio, grazie alle emissioni acustiche che si generano per effetto della sollecitazione alla quale il materiale è sottoposto. Questa tecnologia utilizza microfoni per registrare i suoni prodotti dai veicoli di passaggio presso l'installazione a lato binario; un esempio è il sistema per il monitoraggio dei cuscinetti (RailBAM™ applicato nel West Sussex), che sfrutta la frequenza del rumore originatosi come una discriminata per riconoscere il tipo di guasto (fig. 6).

È noto inoltre che tutti gli elementi di un qualsivoglia sistema in movimento tendono a vibrare a causa delle imperfezioni presenti sulla superficie a contatto, negli allineamenti, nel bilanciamento delle parti.

Si tratta di fenomeni legati naturalmente all'attività operativa ma che, se superano valori *standard* suggeriti dall'esperienza, diventano sintomi inequivocabili di un'anomalia. L'analisi delle vibrazioni si applica in particolare allo studio del moto di organi rotanti nei quali i principa-

male, stanti le necessità di analisi e verifica ad esse connesse, ma un domani delegabili ad un centro di monitoraggio remoto, anche solo su alcuni treni attrezzati.

Il monitoraggio delle *performance* è invece attuato quando si passa da un guasto

We will attempt hereafter to provide an outline of the different condition *monitoring* techniques which are present to date in the railway and rolling stock industry.

As far as the visual monitoring of the components is concerned, there are techniques for the monitoring of the electric arc produced by the contact-strip support with the contact line (fig. 5) to assess the wear status of the contact-strip support (Banverket e Green Cargo [5]) and of its alignment, resorting to photographic and artificial vision techniques: an example is the Swedish system called KIKKA; monitoring of both the profile and wear of the wheels through laser technologies and cameras (Australia, Holland and England). These applications are usually not performed during the standard service, because of the need of analyses and verifications which are connected to them, but may be delegated in the future to a remote monitoring centre, perhaps only on some purposely-equipped trains.

On the other hand, the monitoring of the performance is developed when moving from an incipient failure -i.e. where the first signs of decay are detected without the user's noticing any changes in the performance - to an imminent failure (i.e. conditions of perceptible decay at the presence of a serious deterioration of the performance). In this case, monitoring shall be carried out on those parameters which indicate some worsening in their *performance* (e.g. anomalous pressure of a fluid or inefficiency in the heat exchanges). An example applied to railways is the Swedish T/BOGI system, which can monitor the *performance* of the boogie (forces exchanged with the track, position,...) or similar systems developed by the Association of American Railroads (AAR).

The monitoring of the *acoustic* emission enables to keep under control the evolution of the failures in some types of components during their operation, thanks to the acoustic emissions which generate as a result of the stress the material is submitted to. This technology utilizes microphones to record the sounds produced by the vehicles that pass next to the installation on the track side; an example is the bearing monitoring system (RailBAM™, applied in West Sussex), which uses the frequency of the originating noise as an indicator to recognize the type of failure (fig. 6).

It is well known that all the elements of any system in motion tend to vibrate because of the imperfections on the contact surfaces, in the alignments and in the balancing of the parts.

These phenomena are naturally linked to the operational activity but, if they exceed some *standard* val-

These phenomena are naturally linked to the operational activity but, if they exceed some *standard* val-



Fig. 6 - Sistema RailBAM per il monitoraggio acustico dei cuscinetti. *RailBAM system for the acoustic monitoring of the bearings.*

li tipi di difetti che generano vibrazioni sono: lo squilibrio di organi in rotazione, l'usura di cuscinetti a rotolamento, l'usura di ingranaggi, eccentricità di varia natura, disallineamenti meccanici, trasmissioni difettose, fenomeni di cavitazione nei fluidi. Esempi in ambito ferroviario sono:

1. monitoraggio delle vibrazioni delle boccole tramite cuscinetti sensorizzati (SKF, fig. 7);
2. monitoraggio delle vibrazioni della cassa mediante sensori a fibre ottiche (Politecnico di Hong Kong);
3. monitoraggio delle vibrazioni del carrello dovute al serpeggio.

Per quanto riguarda l'analisi degli oli, da un lato essa consente di valutare la qualità del lubrificante (conservazione delle proprietà tipiche di un fluido lubrificante), permette quindi di valutare la necessità di un cambio dell'olio in maniera mirata nonché quando ve ne sia effettiva necessità, tenendo sempre come obiettivo la buona lubrificazione del macchinario, che aumenta la vita utile dello stesso; dall'altro lato, vi è l'analisi dei contenuti metallici degli oli, infatti la severità dell'usura cui è soggetto un sistema normalmente lubrificato può essere fornita dall'analisi dei frammenti generati dall'usura stessa e dispersi nell'olio di lubrificazione.

Alcuni studi stanno cercando d'applicare questo monitoraggio sulla scatola ponte di un treno.

È noto che quando le superfici sono sollecitate eccessivamente, il materiale si flette, le forze di frizione aumentano, i fenomeni d'usura superficiale (adesione, abrasione) accelerano. In condizioni del genere la produzione di calore in eccesso si traduce in un aumento localizzato della temperatura che può essere misurato da opportuni strumenti (con contatto o senza contatto).

Generalmente, ad una diminuita efficienza di un componente corrisponde un aumento del calore emesso; quindi un dispositivo in avaria presenta una temperatura in rapido<sup>(3)</sup> aumento, sintomo di un guasto incipiente, in tal senso s'inseriscono i sistemi di monitoraggio del calore:

1. sonda termica, sistemata in una scatola stagna, che controlla continuamente la temperatura all'interno del motore al fine d'evitare sovra-temperature d'esercizio, che sono causate da un funzionamento anomalo;
2. monitoraggio della temperatura delle boccole a bordo treno e/o sull'infrastruttura;
3. monitoraggio con telecamere ad infrarossi delle ruote per effettuare valutazioni sul suo stato di rotolamento/slittamento (applicata su alcune tratte dalla ConRail di Philadelphia, a titolo sperimentale, fig. 8).

Una volta acquisiti i dati mediante un sistema di sensori ed altre apparecchiature, che viene genericamente in-

ues which are suggested by the experience, they are an unmistakable sign of failure. The analysis of the vibrations applies, in particular, to the study of the motion of rotating organs, where the main types of failures which generate vibrations are: unbalancing of rotation organs, wear of the bearings and/or gears, eccentricities of miscellaneous nature, mechanical misalignments, defective gearboxes, and cavitation phenomena in the fluids. Examples in the railway industry are:

1. monitoring of the vibrations in the bushings by means of bearings provided with sensors (SKF, fig. 7);
2. monitoring of the vibrations in the body by means of optical fibre sensors (Engineering University of Hong Kong);
3. monitoring of the boogie vibrations due to yawing.

As far as the oil analysis is concerned, on the one hand it enables to assess the quality of the lubricant (preservation of those properties which are typical of a lubrication fluid) and therefore evaluate when the oil actually needs to be changed: the objective is the appropriate lubrication of the machinery, in order to increase its life span. This will also allow analysing the metal contents in the oil, since the analysis of the fragments generated by the wear and their spreading inside the lubrication oil will tell the severity of the wear itself.

Some studies are attempting to apply this monitoring on the axle housing of a train.

It is known that when the surfaces are submitted to excessive stress, the material bends, the friction forces increase, the surface wear phenomena (adhesion, abrasion) accelerate. In such conditions, the generation of excessive heat translates into a localized increase of the temperature, which can be measured by the appropriate tools (with or without contact).

The reduced efficiency of a component generally corresponds to an increase in the heat emission; subsequently, a failing device shows a fast increasing temperature<sup>(3)</sup>, which is the symptom of incipient failure and this is where the heat monitoring devices are introduced, namely:



(Fonte-Source: SKF)

Fig. 7 - Cuscinetto sensorizzato. Roller bearing with sensors.

<sup>(3)</sup> Talvolta *troppo rapido*.

<sup>(3)</sup> Sometimes *too fast*.

dicato come sistema di *condition monitoring*, si passa poi alla valutazione di tali dati.

In una prima fase, tali dati andranno trattati con le tecniche tipiche dell'analisi dei segnali (trasformata di Fourier, analisi tempo-frequenza, spettro di potenza,...), dopo essere stati opportunamente amplificati e filtrati. Tale fase molto spesso in letteratura è inglobata all'interno dello stesso processo di *condition monitoring*, che dunque non è più solo una fase di acquisizione dei dati, ma anche di una loro prima analisi, effettuabile spesso anche a bordo treno.

Fondamentale per la fase decisionale è però la vera e propria analisi dei dati che viene svolta a valle della precedente, un'analisi che deve fornire gli strumenti decisionali per l'attuazione delle opportune attività manutentive negli opportuni tempi, che viene svolta con le tecniche dette di *soft computing*<sup>(4)</sup>, volte non solo all'analisi evoluta dei dati ma anche al supporto decisionale per il tecnico manutentivo.

Come da letteratura in materia, sono tre le strade principali che si seguono nel *soft-computing*:

- le reti neurali;
- la logica *fuzzy*;
- gli algoritmi genetici.

### 6. Tele-diagnostica

Con l'affermazione delle tecniche di monitoraggio fin qui descritte per la CBM, si è assistito anche ad un'evoluzione della manutenzione correttiva, prima in diagnostica ed oggi sempre più in tele-diagnostica (fig. 9), ponendo attenzione alla differenziazione tra la località di fruibilità dell'informazione diagnostica, dalla generazione di tale informazione a partire dai dati diagnostici.

Agli effetti dell'affidabilità globale del mezzo, ciò implica un notevole aumento della disponibilità dello stesso con il conseguente miglioramento sia del servizio commerciale sia del *comfort* dei passeggeri. In fase di manutenzione, inoltre, il personale che soprintende alle operazioni di officina potrebbe anche avere a disposizione una notevole quantità di dati da poter utilizzare,

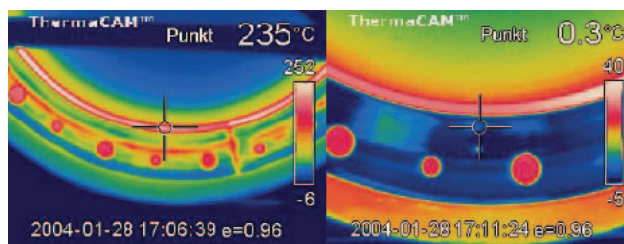


Fig. 8 - Monitoraggio con telecamere a infrarossi. *Monitoring by infra-red camera.*

1. heat probe, located in a watertight box, which continuously checks the temperature inside the engine in order to prevent any overheating during the operation, which is due to anomalous operation;

2. monitoring of the temperature of the bushings on board the train and/or on the infrastructure;

3. monitoring by infra-red rays of the wheels in order to assess their status of rolling/sliding (experimentally applied on some sections of the ConRail in Philadelphia, fig. 8).

The data can be assessed after they have been acquired by means of a sensor system and other equipment, which is generally indicated as a *condition monitoring* system.

At a first stage, such data shall have to be processed through techniques which are typical of signal analysis (Fourier transform, time-frequency analysis, power spectrum ...), after they have been amplified and filtered as appropriate. In the literature, such stage is often included within the very process of *condition monitoring*, which - therefore - is no longer a mere stage of data acquisition, but also of their first analysis, which can often be performed even on-board the train.

What is essential in the decision-making stage, nevertheless, is the actual analysis of the data, which is performed downstream the previous one: an analysis which must supply the decision-making tools for the implementation of the appropriate maintenance activities in the appropriate timing, which is developed through the so-called *soft computing*<sup>(4)</sup> techniques, whose aim is not only the evolved analysis of the data, but also the decision-making support to the maintenance operator.

In compliance with the literature on the matter, *soft-computing* follows three mainstream lines, namely:

- the neural networks;
- the fuzzy logics;
- the genetic algorithms.

### 6. Remote diagnostics

With the achievement of the monitoring lines we have described so far for CBM, an evolution in corrective main-

<sup>(4)</sup> Il *soft computing* si prefigge lo scopo di adattarsi alla pervasiva imprecisione del mondo reale; il suo principio guida può così esprimersi: sfruttare la tolleranza per l'imprecisione, l'incertezza e le verità parziali in modo da ottenere trattabilità, robustezza e soluzioni.

<sup>(4)</sup> The aim of *soft computing* is to adapt to the pervasive imprecision of the real world; its guiding principle can be expressed as follows: utilizing the tolerance for inaccuracy, uncertainty and partial truth of the real world in order to obtain ability to process, sturdiness and solutions.

oltre che per l'individuazione del componente in avaria, per risalire alle cause che hanno generato i guasti. Per raggiungere questo traguardo di "diagnosticabilità", è stato nel tempo necessario dotare il materiale rotabile di dispositivi elettronici in grado di controllare la propria corretta funzionalità e d'individuare con certezza la posizione degli eventuali guasti origine delle avarie, nonché di comunicare tempestivamente uno stato di malfunzionamento tramite il bus<sup>(5)</sup> a tutti gli altri apparati del treno; in altre parole si è dovuto realizzare un sottosistema diagnostico di bordo.

L'obiettivo primario del sistema diagnostico di bordo è quello di generare un immediato segnale di guasto non appena rilevi un'avaria, per guidare il personale di condotta nelle operazioni di ripristino della situazione normale. Un fine secondario, ma non meno importante, è la possibilità di memorizzare la successione dei guasti verificatasi, così da rendere disponibili tali informazioni al personale d'officina per le operazioni di manutenzione.

Da alcuni anni a questa parte si sta cercando di compiere un ulteriore passo in avanti, trasmettendo la segnalazione delle avarie non solo al macchinista ma anche ad un *centro operativo*, così da poter instradare<sup>(6)</sup> il rotabile verso il sito manutentivo adeguato più vicino, sito che viene preventivamente avvisato dell'arrivo del treno, e dei guasti che su esso sono stati rilevati, così da ridurre i tempi di manutenzione, fino ad un 30% rispetto a prima secondo alcune fonti sperimentali.

Questa evoluzione, portata avanti da diverse case costruttrici ed operatori della manutenzione di rotabili ferroviari, può essere descritta come *tele-diagnostica*, essen-

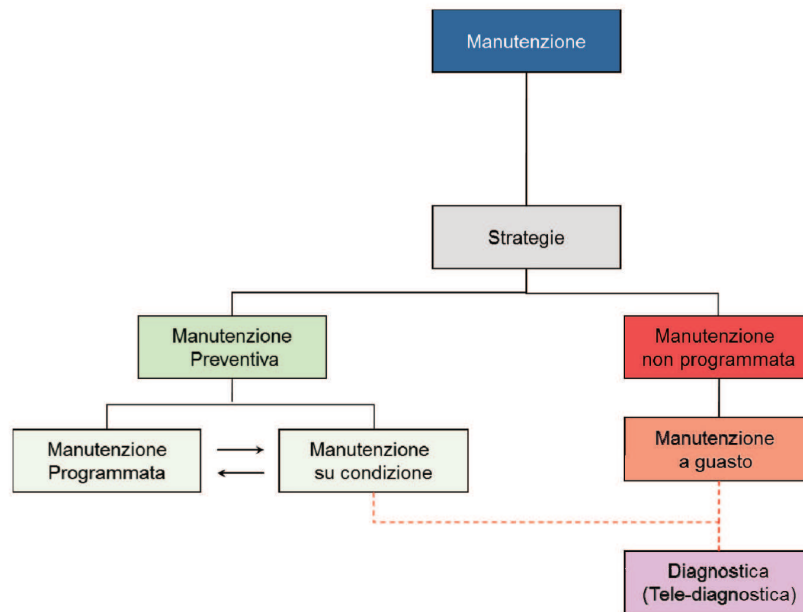


Fig. 9 - Evoluzione nelle strategie di manutenzione. *Evolution in the maintenance strategies [translation in the fig. 13].*

tenance has been witnessed as well; in diagnosis first and now increasingly in remote diagnosis (fig. 9), focusing on the diversification between the locations where the diagnostic information can be utilized, and the ones where such information is generated starting from the diagnostic data.

In order to ensure the overall reliability of the means, remarkable increase in the availability of the means itself is required to achieve

improvements of both the commercial service and the *comfort* of the passengers. At maintenance stage, furthermore, the personnel which are supervising the workshop operations should also have a significant quantity of data at hand to be used not only to detect the failing component, but also to trace back the causes which generated such failures. In order to reach this diagnosis target, the rolling stock had to be progressively provided with electronic devices which could control their own appropriate operation and identify with certitude the position of the defects which would generate the failure, as well as to communicate timely a status of wrong operation through the bus<sup>(5)</sup> to all the apparatuses of the train; in other words, an on-board diagnostic sub-system had to be developed.

The primary objective of the on-board diagnostic system is to generate an immediate error signal as soon as a failure is detected, in order to guide the personnel in the operations aimed at resuming the normal conditions. A secondary - and though no less important - aim is the opportunity of memorising the succession of failures occurred, so that such information shall be available to the workshop personnel for the maintenance operations.

A further step forward has been attempted for the last few years, i.e. transmitting the failure signal not only to the driver but also to an *operation centre*, so that the rolling stock could be routed<sup>(6)</sup> towards the most appro-

<sup>(5)</sup> Il bus è un canale che permette a periferiche e componenti del sistema di "dialogare" tra loro. Diversamente dalle connessioni punto-punto un solo bus può collegare tra loro più dispositivi.

<sup>(6)</sup> A cura di un gestore della flotta (*fleet manager*).

<sup>(5)</sup> The bus is a channel which allows the system peripherals and components to "communicate" to one another. Unlike the point-to-point connection, only one bus can connect several devices to one another.

<sup>(6)</sup> By a fleet manager.

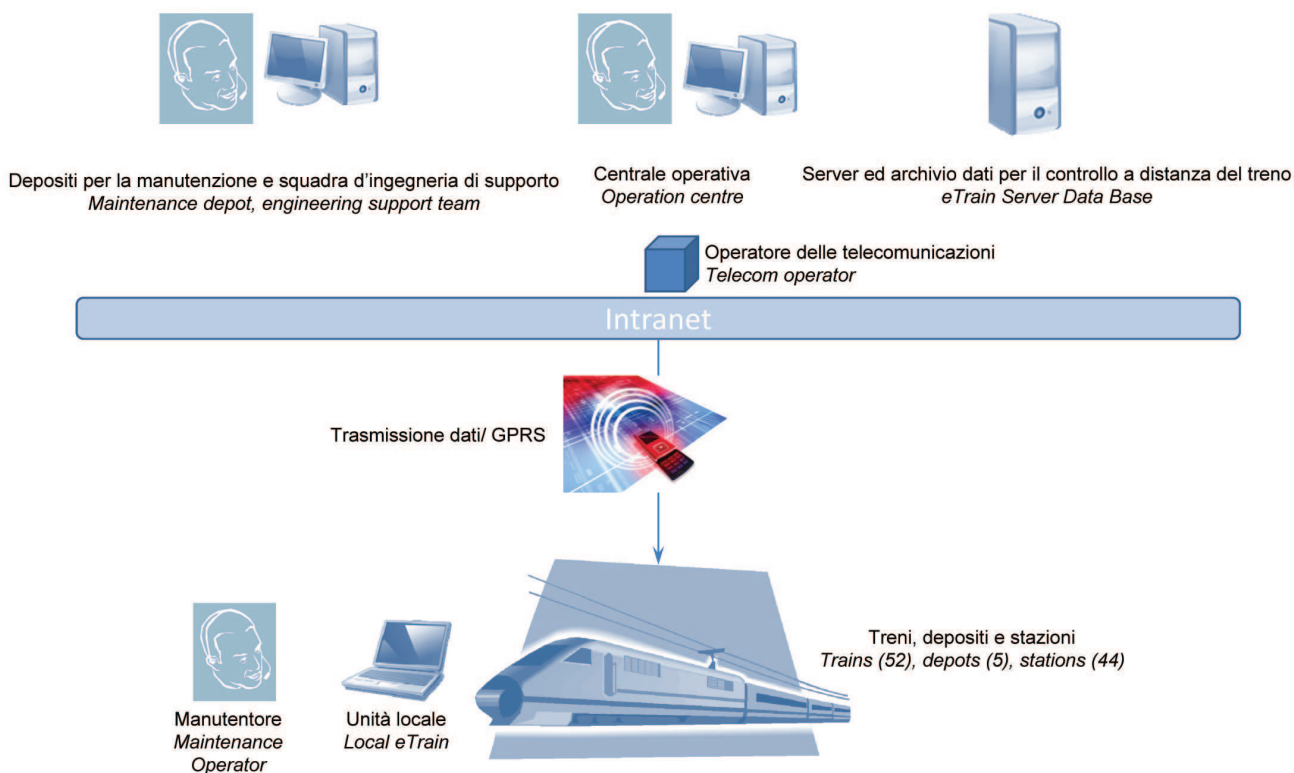


Fig. 10 - Architettura di una sistema di tele-diagnostica, sulla base dell'esempio del "TrainTracer WCML" [6]. *Architecture of a remote diagnostic system based upon the "TrainTracer WCML" example [6].*

do un sistema di diagnostica del treno effettuato però non più solo a bordo del veicolo ma soprattutto in una sede centrale nella quale confluiscono tutti i dati (fig. 10).

Sono così nati i sistemi di tele-diagnostica, che si pongono come spartiacque tra i più classici sistemi di diagnostica - del tipo a spie luminose - e i più moderni sistemi di prognostica.

Essi sono il tramite per mezzo del quale si possono ottenere informazioni già trattate circa le condizioni del treno. Infatti tali tecnologie non costituiscono solo sistemi di trasmissione di dati, ma tramite l'analisi di tali dati riescono già a fornire indicazioni utili su quali siano state le cause del guasto, dove sia localizzato e quali altri guasti possano essere in procinto di verificarsi a seguito del primo.

I dati sullo stato di "salute" degli equipaggiamenti possono anche essere in tal caso analizzati direttamente a bordo del treno durante l'esercizio, quindi inviati - tramite un sistema di comunicazione *wireless* - ad un *server*, che costituisce una sorta di banca dati (*database*); questa architettura è comune a tutti questi sistemi, con piccole differenze a seconda dei vari produttori.

Questo approccio permette di disporre di una visione, fino a poco tempo fa non immaginabile, delle condizioni di "salute" ed operative di ogni convoglio in tempo reale, durante l'esercizio. Questo ovviamente consente una manutenzione correttiva assai più veloce, un miglior e mag-

priate maintenance site, and the site would be previously notified the arrival of the train as well as the failures which have been detected, so that - according to some experimental sources - the maintenance time could be reduced to up to 30%.

This evolution, which is being carried forward by several manufacturers and rolling stock maintenance operators, can be described as *remote-diagnostics*, since it is a diagnostics system of the train which is no longer performed only on-board the train, but mainly in a head-quarter where all the data are collected (fig. 10).

We are therefore witnessing the birth of remote diagnostics systems which are some sort of watershed between the more conventional diagnosis tools - such as the pilot-lamp ones - and the more advanced prognosis systems.

They are the means through which processed information can be obtained on the conditions of the train. Such technologies are not only data transmission systems, but - through the analysis of such data - they also manage to supply useful indications on the causes of the failure, on where such failure is located and what other failures may be about to occur as a consequence of the first one.

In such case, the data on the "health" status of the equipment can also be analysed directly on-board the train during the service and then sent - through a *wireless* communication system - to a *server*, which constitutes a sort of *database*; this architecture is common to all these

gior supporto alla squadra addetta alla manutenzione e permette anche di prevenire il verificarsi di alcuni guasti.

Si richiama nel seguito un sintetico riepilogo di alcuni dei sistemi disponibili ad oggi sul mercato: il *TrainTracer* dell'Alstom e l'*ORBITA* della Bombardier [7]; altri, non meno promettenti, sono in fase di sviluppo.

Una delle prime applicazioni del *Train Tracer* è stata quella effettuata sulla flotta inglese della Virgin (*West Coast Main Line*), composta di 52 treni e con linea di pertinenza in cui vi sono 5 depositi e 44 stazioni (fig. 11).



Fig. 11 - Telediagnostica sulla West Coast Main Line (UK). Remote diagnostics on the West Coast Main Line (UK).

Un'applicazione esemplificativa è quella accaduta in tempi recenti nel convoglio 023 partito da Carlisle alle 6 del mattino: il sistema rileva, grazie al monitoraggio di bordo, un guasto al sistema di pendolamento intorno alle 8. Il *Traintracer* invia immediatamente, in esercizio, l'informazione al Centro operativo e viene pre-allarmato il deposito di Wembley verso cui il rotabile viene instradato. Alle 11 il treno raggiunge, terminata la corsa, il deposito e alle 12 riesce a tornare a svolgere il suo normale servizio, con un grado d'efficienza inimmaginabile fino a pochi anni fa (fig. 11).

Il sistema *ORBITA* nasce come progetto pilota nel 2006, implementato su 33 convogli diesel della serie Turbostar operanti per la First ScotRail [7]. I vantaggi ottenibili dall'implementazione della tecnologia *ORBITA* sono:

1. maggiore affidabilità, così da risparmiare potenzialmente milioni in penali causate da ritardi e interruzioni, che si riducono di circa un 20-30% (fig. 12);
2. con le risorse per riparare i componenti prima che si guastino e con le informazioni a portata di mano per ridurre i tempi d'indagine, si possono diminuire notevolmente i costi operativi;
3. ottimizzare l'uso dell'attrezzatura e migliorare la pia-

systems, with some minor differences between the different developers.

This approach makes available a view, which could not even be imagined some time ago, on the "health" and operational conditions of a train in real time, during its service. This obviously allows much faster corrective maintenance, a better and greater support to the maintenance team and also enables to prevent the occurrence of some failures.

We are recalling hereinafter a short summary of the systems which are currently available on the market: Alstom's *TrainTracer* and Bombardier's *ORBITA* [7]; other ones - which are no less promising - are at development stage.

One of the first applications of *Train Tracer* has been developed on the English fleet of Virgin (*West Coast Main Line*), which consists of 52 trains and with a line made by 5 warehouses and 44 stations (fig. 11).

An example of such application recently occurred with train 023, which left Carlisle at 6.00 a.m.: the system detected - through the on-board monitoring - a failure to the tilting system at 8.00 a.m.. The *Traintracer* sent immediately the information to the Operational Centre and the Wembley deposit - where the rolling stock was routed to - was warned immediately. The train reached the warehouse at the end of its journey at 11 a.m. and it managed to resume its standard service at 12, with a level of efficiency that could not even be imagined up to few years ago (fig. 11).

The *ORBITA* system was born as a pilot project in 2006, where it was implemented on 33 diesel trains of the Turbostar series which were operating for First ScotRail [7]. The advantages which can be obtained from the implementation of the *ORBITA* technology can be summarized as follows:

1. greater reliability, millions can potentially be saved from the penalties due to delays or interruptions, which reduce by 20 to 30% (fig. 12);
2. thanks to the resources to repair the components before they fail and to the information at hand to reduce the investigation time, the operational cost can be remarkably reduced;
3. optimization of the equipment and improved planning of the spare parts, with subsequent savings of over 15% on the cost for the materials;
4. minimised risk of consequential damage, since, when some components fail, they may affect other ones.

## 7. Prognostics

Prognostics are an evolution of CBM on the preventive side of maintenance (fig. 13). In the literature, the evolution of CBM branches out into two strategies, namely: predictive and proactive maintenance.

nificazione dei ricambi, avendo un risparmio di oltre il 15% sui costi per i materiali;

4. minimizzare il rischio di danni consequenziali, infatti quando alcuni componenti si guastano, ne potrebbero addurre altri con sé.

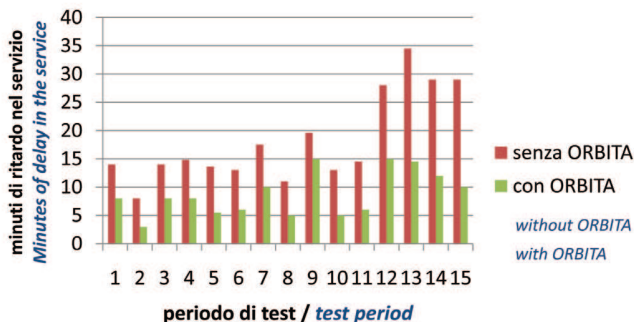


Fig. 12 - Ritardi con e senza ORBITA. Delays with and without ORBITA.

## 7. Prognostica

Evoluzione della CBM sul lato preventivo della manutenzione è la prognostica (fig. 13). In letteratura l'evoluzione della CBM effettivamente si ramifica in due strategie: manutenzione predittiva e proattiva.

La manutenzione *predittiva* è una strategia volta all'identificazione in anticipo delle presenza di guasti ed alla valutazione della vita residua, così da poter programmare un'azione manutentiva solo quando le condizioni del sistema ne determinino la necessità. Il controllo dello stato di "salute" dei componenti è tale da non interrompere il loro normale funzionamento ma da segnalare anticipatamente ed in modo continuo il progressivo degrado; essendo volta all'evidenziarsi di un degrado, potrebbe non fornire l'allarme con un anticipo sufficiente ad evitare che un guasto incipiente diventi imminente.

La manutenzione *proattiva* è una strategia volta a fornire un pre-allarme del degrado ed una valutazione della vita residua, valutando le "radici del guasto"<sup>(7)</sup> e non danni al materiale o alle prestazioni, così da poter programmare l'azione manutentiva; essa permette di identificare i guasti condizionali: condizione di preallerta nella quale non si è ancora verificato un degrado né del materiale né delle prestazioni, ma tale che se la situazione persiste, vi si arriverà inevitabilmente. Permette d'arginare il verificarsi stesso dei guasti quindi aumenta l'affidabilità e riduce i tempi di fermo. Questa differenza è ov-

*Predictive maintenance* is a strategy addressed to the anticipated identification of the presence of failures and to the assessment of the remaining life, so that a maintenance action can be programmed only when the conditions of the system determine that it is needed. The monitoring of the "health" status of the components is such that it does not interrupt their regular operation, but it points out their progressive decay in advance and continuously; since it is aimed at highlighting the decay, it might not provide the warning in sufficient advance to prevent an incipient failure from becoming imminent.

*Proactive maintenance* is a strategy aimed at supplying an early warning of the decay and an assessment of the residual life, evaluating the "roots of the failure"<sup>(7)</sup> rather than the damage to either the material or the performance, so that maintenance actions can be programmed; it enables to identify the conditional damage, i.e. : an early warning condition where a decay of the material and/or the performance has not occurred yet but - should such conditions persist - will inevitably occur. This enables to decrease the actual occurrence of the failures and therefore it increases the reliability and reduces the downtime. The difference between the two is obviously very thin, and this is why both strategies are identified in the macro-area of prognosis, namely: *maintenance on condition performed as a result of a forecast of the remaining life, which is derived from the analysis of the significant parameters concerning the decay of the entity.*

Prognosis is located upstream diagnostics in what can be the natural time line in the evolution of a failure (fig. 14).

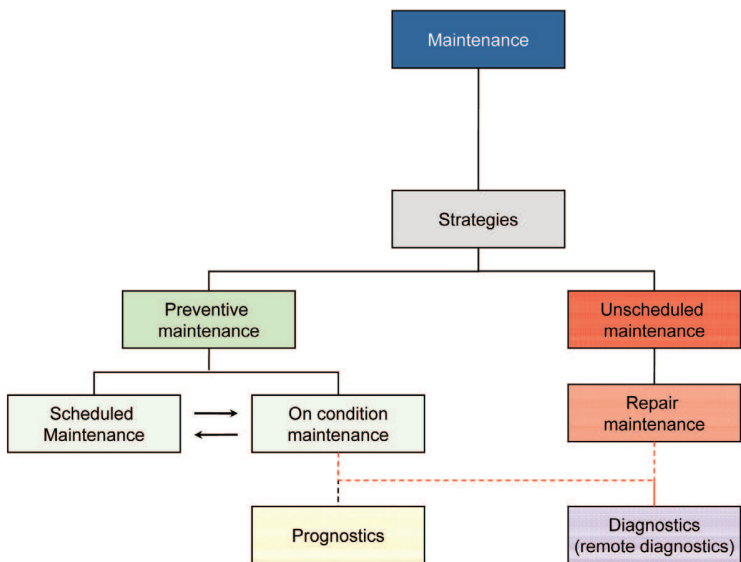


Fig. 13 - Evoluzione strategie manutentive. Evolution of the maintenance strategies.

<sup>(7)</sup> Segnalano quel primo livello di malfunzionamento che è chiamato "guasto condizionale" (FEDELE, 2004).

<sup>(7)</sup> They point out the first level of malfunctioning, which is called "conditional damage" (FEDELE, 2004).

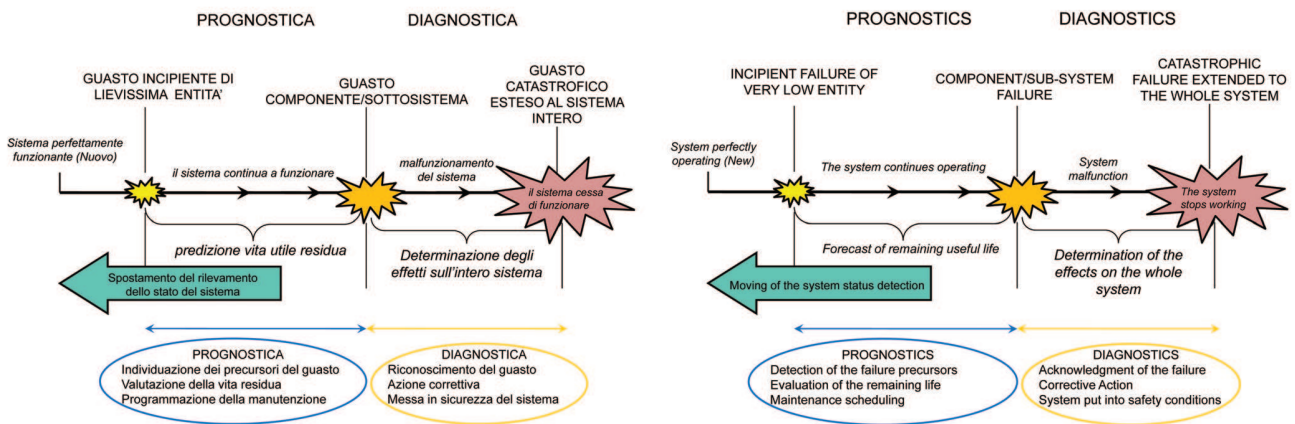


Fig. 14 - Evoluzione di un guasto. *Evolution of a failure.*

viamente assai sottile, per questo spesso s'identificano ambedue le strategie con la macro area della prognostica: *manutenzione su condizione eseguita in seguito ad una previsione della vita residua derivata dall'analisi dei parametri significativi afferenti il degrado dell'entità.*

Essa si pone a monte della diagnostica in quella che può essere la naturale linea temporale di evoluzione di un guasto (fig. 14).

Questo insieme di tecniche, che permettono di prevedere il guasto a partire dall'analisi dei sintomi iniziali del guasto (i segnali deboli), ha quindi la funzione di fornire un allarme anticipato sul futuro guasto o addirittura un'informazione più completa, in termini di tempo di vita rimanente del sistema e relativa probabilità d'accadimento del fine vita. La prognostica serve perciò come supporto al decisore che deve valutare se intervenire, fermando la macchina, o decidere di ritardare sulla base di una misura del rischio atteso.

Risultati ottenibili sono:

- maggiore disponibilità del sistema;
- minor tempo speso per ispezioni;
- minima probabilità di danneggiamento;
- minimo tempo di fermo macchina;
- riduzione del numero di parti di ricambio.

I passaggi per la realizzazione di un sistema prognostico sono i seguenti.

1. Identificazione dei modi di guasto.

In questa fase si effettua una valutazione, mediante le tecniche proprie della manutenzione (FMECA,...), dell'importanza dei possibili tipi di guasto. In questo modo si classificano i guasti in: guasti critici per il funzionamento; critici per la manutenzione; critici per l'approvvigionamento dei ricambi.

2. Individuazione dei precursori dei guasti.

In questa fase si deve determinare come la degradazione di un componente possa essere identificata, si

The function of this set of techniques, which allow forecasting a failure starting from the analysis of the initial symptoms of the failure itself (the so-called weak signals) is therefore to supply an advanced warning on the forthcoming failure or - even - more complete information in terms of the remaining life of the system and relative likelihood of the end of its life. Therefore, prognostics can be used as a support to the decision-maker, who must evaluate if he/she needs to intervene and stop the machine or decide to delay such action on the basis of the expected risk.

The following results can be achieved:

- greater availability of the system;
- lower time spent for inspections;
- lower likelihood of damage;
- minimum downtime;
- reduction in the number of spare parts.

The passages for the development of a prognostic system are as follows:

1. Identification of the failure modes.

This stage is dedicated to assess - through techniques which are typical of maintenance (FMECA,...) - the significance of the possible types of failure. This enables to classify the failures as: critical failures for the operation; for maintenance; for the procurement of the spare parts.

2. Detection of the failure precursory symptoms.

This stage should be used to determine how to identify the decay of a component, the symptom is to be defined within "measurable" limits; an intelligent use of all those information which are normally available should be made and - last - the need of adding new sensors is to be evaluated.

3. Detection of the damaging pathway.

During this stage, a method to predict the time progress of the failure with accuracy and precision is attempted to be found.

deve poter definire il sintomo nel dominio del “misurabile”, si deve fare un uso intelligente di tutte le informazioni normalmente disponibili e, in ultimo, si deve valutare l'eventualità di aggiungere nuovi sensori necessari.

### 3. Individuazione dei percorsi di danneggiamento.

In questa fase si cerca di trovare un metodo in grado di predire con accuratezza e precisione la progressione temporale del guasto.

Si deve cioè determinare come la degradazione progressivamente si propaghi e conduca al guasto. Per far ciò si sviluppano dei modelli matematici in grado di:

- descrivere il fenomeno;
- prevedere la progressione del guasto;
- calcolare la vita utile residua.

Tali modelli matematici in grado di descrivere il fenomeno di guasto, di prevederne la progressione e di calcolare la vita utile residua sono i cosiddetti *Algoritmi di prognostica* e possono essere in generale classificati in tre categorie, di seguito specificate.

#### A. *Algoritmi di prognostica basati su un modello del sistema.*

Questo approccio della prognostica si basa sull'utilizzo di un modello dinamico che descrive il processo caratterizzante il funzionamento del sistema. Vi è quindi la necessità di costituire un modello - attività ingegneristica onerosa - che può risultare tanto più complicata quanto più aumenta il grado di complessità del sistema che si va ad analizzare. Tale modello deve ovviamente essere, quanto più possibile, fedele alla realtà. Nel caso ad esempio della valutazione di un modello d'un componente di rotabile ferroviario, bisognerà considerare anche la variazione di temperatura ambientale alla quale il treno è soggetto durante il suo funzionamento, se tale temperatura può influire sulle misurazioni o sulle *performance* del componente. Il sistema dovrà quindi non solo simulare il funzionamento del componente a se stante, ma del componente inserito nella sua effettiva realtà di funzionamento, riproducendo l'ambiente in cui lavora nelle condizioni di normale funzionamento, così da poter valutare eventuali discrepanze da tale situazione.

Il modello dinamico del sistema può essere ottenuto in due modi:

- a. creazione di un modello “fisico” del sistema studiandone il funzionamento;
- b. identificazione del sistema mediante media mobile auto-regressiva: consiste nell'assumere una certa espressione del modello dinamico del sistema ed adattarne i parametri in funzione dei valori misurati delle sue grandezze fisiche.

Ben si comprende come il dato in uscita dal modello, se esso è ben costruito, rappresenti il comportamento

In other words, it must be determined how the decay propagates progressively and leads to the failure. To do this, the mathematic models to be developed must be up to:

- describe the phenomenon;
- predict the progress of the failure;
- calculate the remaining useful life.

Such mathematic models which can describe the phenomenon of failure, predict its progression and calculate the residual useful life are the so-called *Prognostic algorithms* and - in general - they can be classified into three categories, as specified hereafter.

#### A. *Prognostic algorithms based on a system model.*

This prognostic approach is based upon a dynamic model describing the process which characterises the operation of the system. A model needs therefore to be built, and this is rather burdensome engineering activity whose complicatedness increases with the increase of the complexity of the system to be analysed. Such model must obviously be as close as possible to reality. In case - for instance - of assessing a model of a rolling stock component, it should also consider the ambient temperature the train is submitted to during its operation, if such temperature can affect either the measures or the *performance* of the component. The system should therefore simulate not only the operation of the component itself, but of the component within its actual operational reality, thus reproducing the environment in which it works in the standard operational conditions, so that any discrepancies can be evaluated.

The dynamic model of the system can be obtained in two ways, namely:

- a. generation of a “physical” model of the system by studying its operation;
- b. identification of the system through autoregressive moving average: it consists in assuming a given expression of the dynamic model and adapting its parameters according to the measured values of its physical magnitudes.

It is easily understood that the data in output from the model, if the latter is well built, represents the ideal behaviour of the real system and - therefore - it corresponds to the data in output in case no malfunctioning is recorded.

Such data, together with the monitored ones, are passed through the prognostics algorithm, which measures the error of the real data versus the model, evaluates the variability of the process, filters the signals, merges the data coming from the different models and sensors and creates a failure evolution model. The output will then be the information relevant to the damage in progress and the calculation of the remaining life (fig. 15).

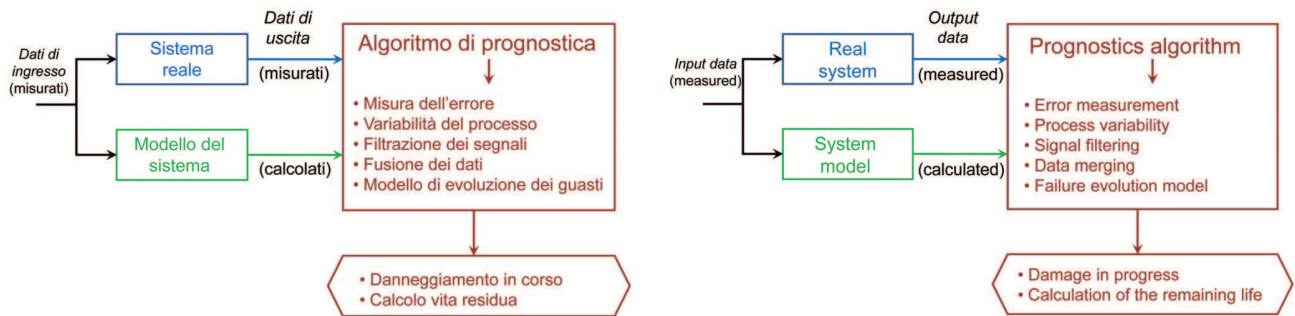


Fig. 15 - Algoritmo basato su un modello. *Algorithm based on a model.*

ideale del sistema reale e dunque corrisponda al dato in uscita dal sistema reale nel caso non ci siano mal-funzionamenti.

Tale dato, insieme a quello monitorato, viene dunque passato all'algoritmo di prognostica, che misura l'errore del dato reale rispetto a quello del modello, valuta la variabilità del processo, filtra i segnali, opera una fusione dei dati provenienti dai diversi modelli e dai diversi sensori e crea un modello d'evoluzione dei guasti. In uscita si avrà dunque l'informazione circa il danneggiamento in corso e il calcolo della vita residua (fig.15).

*B. Algoritmi di prognostica basati sulla probabilità.*

Tali algoritmi si basano sui dati storici relativi all'impianto o attrezzatura considerata, cioè necessitano dei guasti passati; certamente ad aiutare il compito possono aggiungersi conoscenze circa la storia manutentiva e le condizioni operative pregresse e presenti. Tali algoritmi si basano inoltre sulla definizione della funzione di densità di probabilità della vita utile residua (*remaining useful life probability density function - RULPDF*), e sulla definizione dei limiti di confidenza (fig.16).

Si parte quindi dallo storico dei dati, dai quali è possibile ottenere un grafico che rappresenti la vita utile residua, che si è potuta poi constatare, in correlazione al valore di un certo parametro caratteristico, opportunamente scelto e monitorato. Tale parametro, che è quindi l'unico a richiedere l'utilizzo di sensori, viene misurato con continuità durante il funzionamento del sistema, tale misura del valore viene quindi confrontata con il grafico ottenuto dai dati storici e si può così ottenere il valore di vita residua. Certo questo valore è sempre un valore probabilistico, per cui la previsione di vita viene effettivamente ottenuta mediante la funzione di densità di probabilità della vita utile residua.

*B. Prognostics algorithms based on probability.*

Such algorithms are based on the historical data relevant to the system or equipment taken into consideration, i.e. they need to know the previous failures, the maintenance historical, as well as the previous and current operational conditions. Furthermore, such algorithms are based on the definition of the *remaining useful life probability density function (RULPDF)*, as well as on the confidence limits (fig. 16).

The starting point is therefore the historical data, which enable to obtain a diagram representing the remaining useful life which could then be ascertained, as related to the value of a given characteristic parameter, which has been selected and monitored as appropriate. Such parameter, which is therefore the only one requiring the use of new sensors, is measured continuously during the operation of the system; such measure of the value is therefore compared to the diagram obtained from the historical data, and the remaining life value can thus be obtained. This is certainly always only a probability, hence the life expectancy is actually obtained through the remaining useful life probability density function.

*C. Prognostics algorithms based on the Artificial Intelligence techniques.*

We may consider this solution a compromise between the two ones we have illustrated above, a blending of

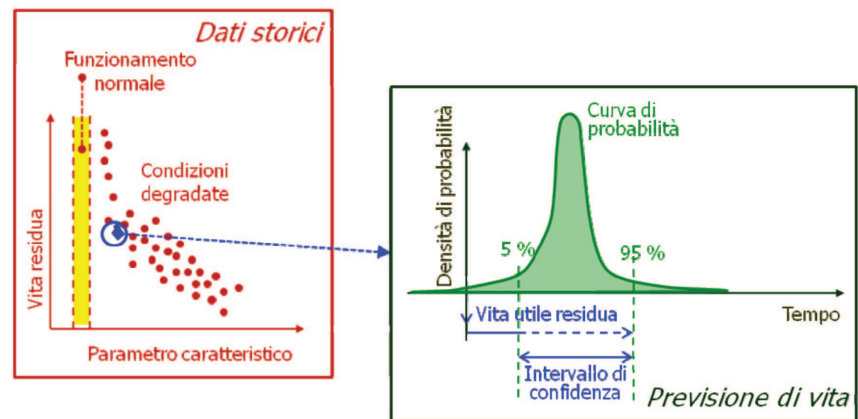


Fig. 16 - Algoritmo basato sulla probabilità. *Algorithm based on probability.*

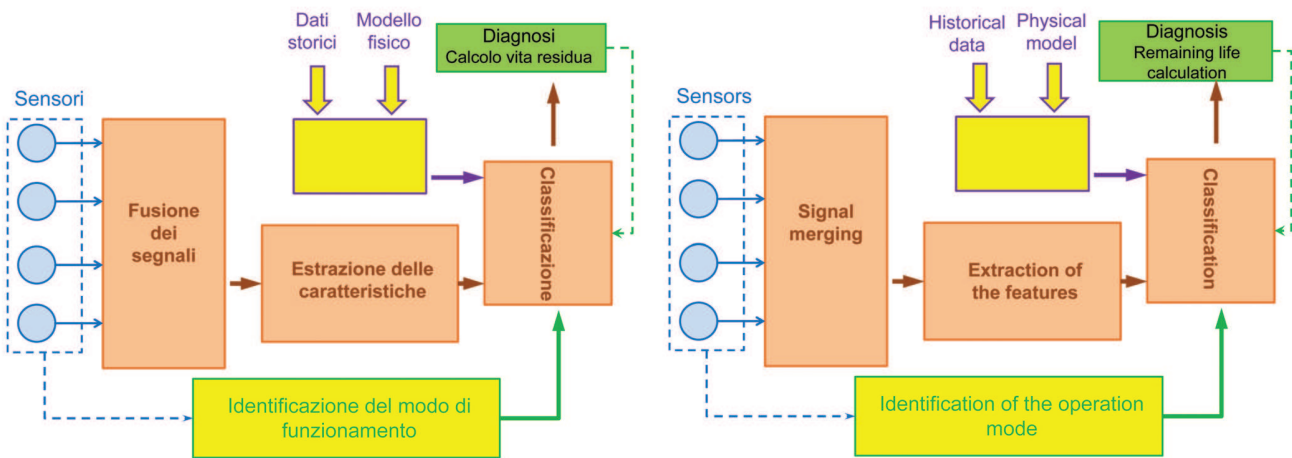


Fig. 17 - Algoritmo basato su tecniche di AI (Artificial Intelligence). Algorithm based on the AI (Artificial Intelligence) techniques.

C. Algoritmi di prognostica basati sulle tecniche d'Intelligenza Artificiale.

Si può pensare che questa soluzione sia un compromesso tra le due precedentemente illustrate, una mescolanza delle due per sfruttarne pregi dell'una e dell'altra, evitandone i difetti che da un lato sono la scarsa applicabilità e dall'altra la limitata accuratezza (fig.17).

4. Segnalazione del processo di danneggiamento.

Segnalare al manutentore, nelle modalità più appropriate, sia che il processo di degradazione è in corso, sia la restante vita utile. Nell'effettuare tale segnalazione devono essere evitate false segnalazioni di danneggiamento.

5. Valutazione costi/efficacia

Questa fase è indispensabile per valutare i guasti ai quali la prognostica fornisce un vantaggio economico, in assenza del quale non si procede alla sua implementazione.

In questo contesto Bombardier Transportation in cooperazione con la DaimlerChrysler Research and Technology, l'Università di Pittsburgh, la Auburn University, ha cercato un metodo per implementare una manutenzione su condizione improntata alla prognostica per il miglioramento dell'affidabilità operativa e la disponibilità dei veicoli del "People Mover" operante nell'aeroporto di Pittsburgh. In particolare tali studi si sono concentrati sul sistema porte. Il sistema porte, del tutto simile in un People Mover a quello dei rotabili metroferroviari, è uno dei sistemi che ha la maggior necessità di manutenzione ed è inoltre, non solo nei People Mover ma anche nei treni, uno dei principali fattori che incidono sulla disponibilità del sistema di trasporto. Infatti il mancato funzionamento delle porte o il loro funzionamento non corretto forzerebbe il convoglio ad essere indisponibile, finché non viene riparato, a causa dei problemi di sicurezza che il guasto genererebbe.

In un primo momento i ricercatori impegnati avevano scelto d'implementare un sistema prognostico basato su un algoritmo basato su un modello, in seguito si sono resi con-

the two in order to utilize the advantages of both and avoid the flows the little applicability of the former and the limited accuracy of the latter (fig. 17).

4. Signalling of the damage process.

Warning the maintenance operator - in the most appropriate modalities - both that the decay process in is progress and of the remaining useful life. In performing such warning, any false signal of damage must be avoided.

5. Cost/efficiency assessment

This stage is indispensable to evaluate what failures prognostics is ensuring economic advantage to, and no implementation can be done without it.

Within this context, Bombardier Transportation - in cooperation with DaimlerChrysler Research and Technology, the University of Pittsburgh and the Auburn University - has developed a method to implement maintenance on condition based upon prognostics for the improvement of the operational reliability and availability of the "People Mover" vehicles operating in Pittsburgh's airport. In particular, such studies focused on the door system. The door system, which is very similar in a People Mover as in the underground and railway rolling stock, is amongst those which mostly require maintenance and, furthermore - not only in the People Movers, but also in the trains - one of the main factors which affect the availability of the whole transport system. The missing operation or any malfunctioning of the doors would prevent the vehicle from being available until repaired, because of the safety issues such failure would generate.

The researchers had first selected to implement a prognostics system based on a model algorithm; they then realized that an analytical model would not be up to take into account all the operational aspects of the airport's People Mover door system; this is why an algorithm resorting to the Artificial Intelligence techniques has been

to che un modello analitico non sarebbe stato in grado di tener conto di tutti gli aspetti di funzionamento del sistema porte del *People Mover* dell'aeroporto; pertanto si è optato per un algoritmo che facesse uso delle tecniche di Intelligenza Artificiale e, vista la non linearità del comportamento delle porte, si è scelto di utilizzare una *rete neurale* [4].

I segnali disponibili e tramite cui monitorare le porte sono: il tempo, la corrente e la tensione caratterizzante ogni battente mentre passa attraverso cinque interruttori opportunamente installati, in modo da caratterizzare sufficientemente le condizioni della porta per quanto riguarda il degrado causato da contaminanti nelle piste di scorrimento, usura del motore, danni meccanici,...

L'installazione è stata implementata su otto porte del veicolo che serve la zona sud dell'aeroporto, infatti l'aeroporto di Pittsburgh è servito da due *People Mover*, viaggianti su tracciati differenti, uno che copre la parte nord e uno la parte sud dello scalo aeroportuale.

Le conclusioni alle quali si è potuto giungere a seguito di queste prove sono:

- l'idea di realizzare una manutenzione predittivo-prognostica basata sulla degradazione dei componenti del sistema è tecnicamente valida;
- è possibile progettare, costruire e implementare un sistema di prognostica per le porte dei *People Mover* senza grosse modifiche del progetto e senza grossi investimenti;
- i veicoli che potrebbero presentare una più vasta gamma di condizioni di funzionamento normale (dovute a diverse condizioni ambientali in cui funzionano, ...) richiedono sistemi *customizzati* per il caso specifico, ma si tratta unicamente di modificare in parte la rete neurale, che comunque va adattata già caso per caso e non può essere del tutto generalizzata;
- sarebbe necessario un maggior numero di tipi di dati per poter costruire un modulo prognostico maggiormente efficace;
- l'approccio analitico costituito da un modulo prognostico basato su un modello non sembra essere una scelta efficace e pratica, per cui almeno nella maggior parte dei casi non verrà attuata;
- l'approccio basato sulle tecniche di Intelligenza Artificiale sembra essere molto più efficace e pratico, per cui sarà questa la strada che maggiormente verrà seguita;
- questo progetto pilota si è dovuto scontrare con molti problemi, primo fra tutti quello del *condition monitoring* su cui si sono spesi molto tempo e molte energie. Se il progetto proseguirà verrà più ampiamente sviscerato il problema dell'Algoritmo di prognostica da usare.

Sempre sul versante prognostico l'Alstom Transport ha partecipato dal febbraio 2006 al gennaio 2009 al progetto PREMAID (*PREdictive MAIntenance and Diagnostic of railway power trains*, [8]), finanziato dalla Comunità Europea, al quale hanno collaborato l'University of Techno-

adopted and - because of the non-linear behaviour of the doors - a *neural network* was selected [4].

The signals available and to be used to monitor the doors are: the time, the current and the voltage which characterizes every door wing while it passes through five switches installed as appropriate - in order to characterize sufficiently the conditions of the door as related to the decay caused by contaminants in the sliding ways, wear of the motor - mechanical damage and the like.

The installation has been implemented on eight doors of the vehicle which serves the South area of the airport: Pittsburgh is served by two *People Movers* travelling on different tracks, one which covers the northern area of the airport and one for the southern one.

The conclusions which could be reached as a result of these tests are:

- the idea of developing a predictive-prognostic maintenance based on the degradation of the system components is technically sound;
- a prognostic system for the *People Mover's* doors can be designed, built and implemented without major design changes or investments;
- the vehicles which could show a wider range of operational conditions (due to different environmental conditions in which they operate, ...) call for *customized* systems for the specific case, but it will be sufficient to modify partially the neural network, which is nevertheless to be adapted case by case and cannot be generalized;
- in order to generate a more efficient prognostic model, a larger range of data would be required;
- the analytical approach consisting of a prognostic module based upon a model does not seem to be an effective practical choice, therefore it will not be implemented, at least in most cases;
- the approach based upon the Artificial Intelligence techniques seems to be much more effective and practical, therefore this way will be followed in most cases;
- this pilot project had to face several issues, first of all the one related to *condition monitoring*, on which a lot of time and energy was spent. If the project is carried further, the issue of the prognostic algorithm to be used shall be developed further.

Again as far as prognostics is concerned, Alstom Transport participated - from February 2006 to January 2009 - to the PREMAID (*PREdictive MAIntenance and Diagnostic of railway power trains*, project [8]), funded by the European Community, which saw the cooperation of the University of Technology of Gdansk, in Poland, the Institute of Telecommunication of Coimbra, in Portugal, the University of Oviedo in Spain and the University of Bologna in Italy (fig. 18).

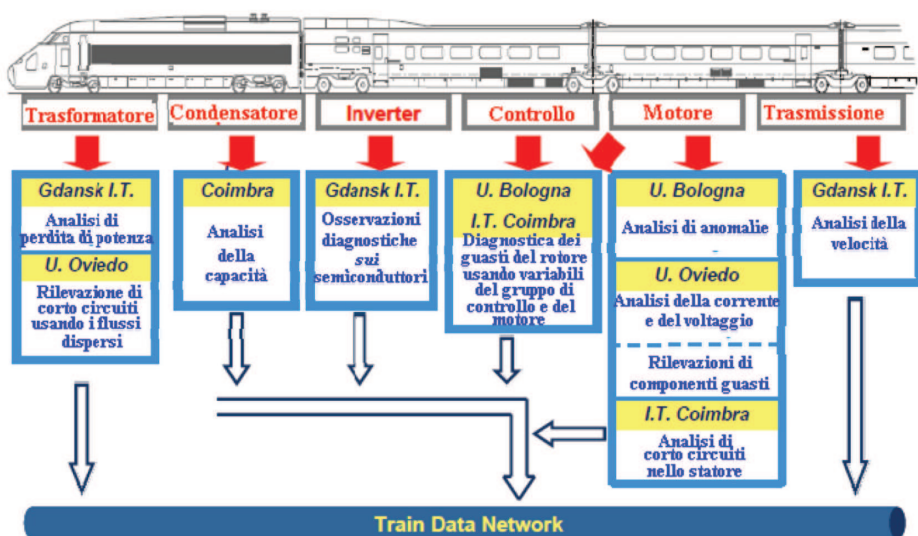


Fig. 18 - Piano del progetto PREMAID [8]. Plan of the PREMAID project [8].

logy di Gdansk in Polonia, l'Institute of Telecommunication di Coimbra in Portogallo, l'Università di Oviedo in Spagna e l'Università di Bologna in Italia (fig.18).

Nel progetto si sono utilizzati i dati rilevati dai sistemi di segnalamento già presenti a bordo treno, o integrati là dove non ritenuti sufficienti, per analizzare tali informazioni nell'ottica di predire le future conseguenze delle attuali condizioni e dunque progettare un piano di manutenzione più adeguato di quello basato su interventi programmati a priori.

L'analisi di tali dati e delle informazioni ricevute dai sistemi monitorati si è pensato di compierla attraverso un Sistema Esperto, integrato e coadiuvato dal già implementato *TrainTracer* (fig. 19).

Una delle implementazioni più avanzate all'interno del progetto è quella inerente alla trasmissione, portata avanti dall'University of Technology di Gdansk (GUZINSKI, 2009).

L'algoritmo di prognostica usato in questo caso è in grado di monitorare diversi parametri caratterizzanti il corretto funzionamento della trasmissione (coppia torcente, velocità, allineamenti, vibrazioni,...). Tale algoritmo è del tipo basato su un modello, per cui si è proceduto alla modellazione attraverso formule analitiche del corretto funzionamento dei componenti.

Inserendo come dati di *input* la velocità, la tensione (V) e la corrente alimentante il motore, si riesce ad ottenere in uscita, mediante un sistema di equazioni differenziali - complesso e costruito grazie all'analisi diretta del funzionamento - i valori che i parametri caratterizzanti il funzionamento del motore e della trasmissione dovrebbero avere, tenuto conto di tutte le altre condizioni al contorno esistenti in quel particolare momento. Tali ri-

The project has resorted to data detected by the signalling systems which were already on-board the train, and have been integrated where they were not sufficient, in order to analyse such information in the view of forecasting the forthcoming consequences of the current conditions and - therefore - devise a maintenance plan which could be more appropriate than the one which was defined *a priori*.

The analysis of such data and of the information received from the monitored systems was devised to be run through an integrated Expert

System, supported by the already implemented *Train-Tracer* (fig. 19).

One of the most advanced implementations within the project was relevant to transmission and was carried forward by the University of Technology of Gdansk (GUZINSKI, 2009).

The prognostic algorithm used in this case can monitor various parameters which characterize the appropriate operation of the transmission (torque, speed, alignments, vibrations,...). Such algorithm is based on a model, we have therefore proceeded with the modelling through analytical formulas of the appropriate operation of the components.

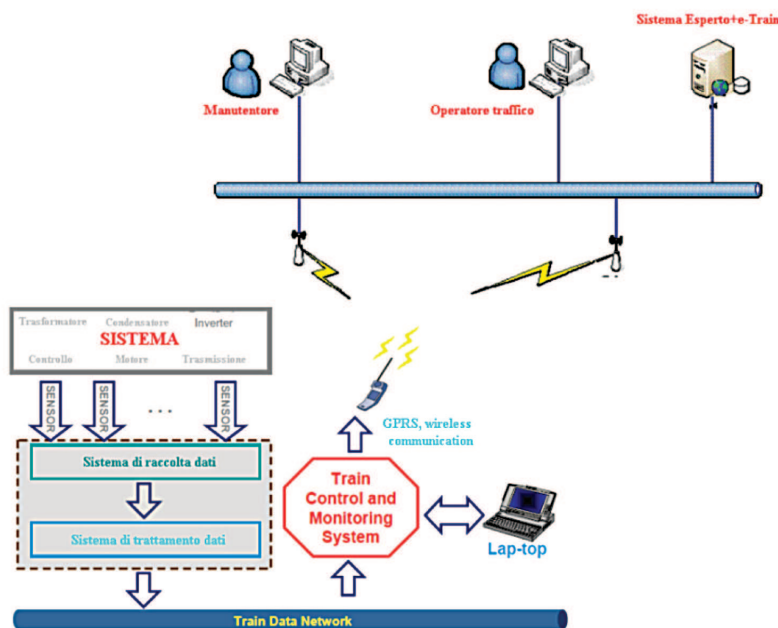


Fig. 19 - Architettura sistema prognostico. Architecture of the prognostic system.

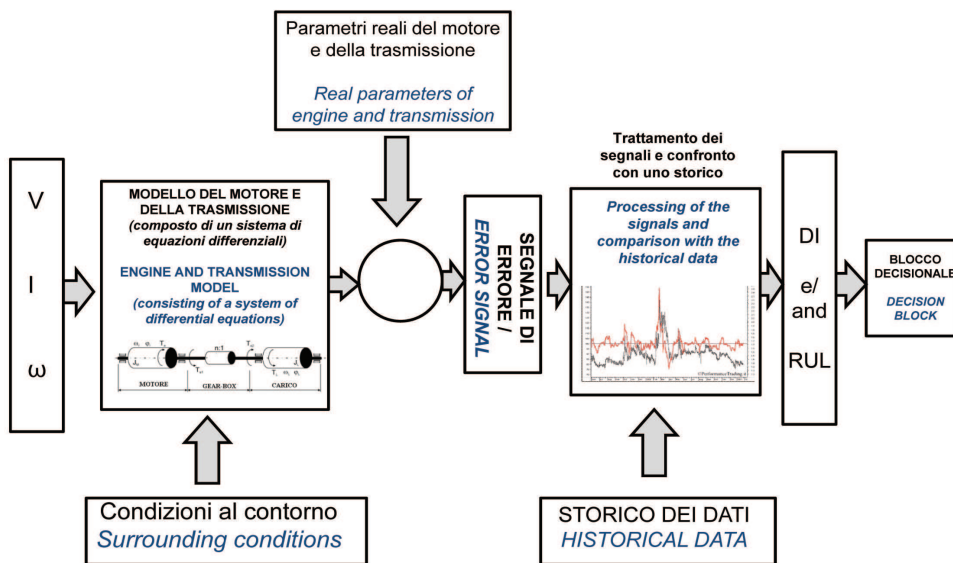


Fig. 20 - Algoritmo della trasmissione. *Algorithm of the transmission.*

sultati vengono confrontati con le misurazioni reali fatte sul sistema e si ottengono così i segnali d'errore che analizzati e comparati con uno storico di dati permette di fornire in uscita un indice diagnostico (*Diagnostic Index - DI*) e il calcolo della vita residua (*Remaining Useful Life - RUL*), così da permettere una decisione manutentiva. Dopo aver sviluppato il sistema si è proceduto a testarlo realmente (fig. 20).

Le prove sono state condotte nelle ore notturne comprese tra il 19 e il 22 Ottobre 2009 su un tram "Citadis" operante nella città di Dublino (Dworakowski, 2009, [9]). Le prove si sono svolte su ambedue le linee: la *Red Line* e la *Green Line* (fig. 21).

Il test è servito per verificare la validità del modello e delle ipotesi di modellazione fatte, confermando che il sistema di misurazioni è valido e soddisfa egregiamente le richieste dell'algoritmo. Quest'ultimo sembra simulare ottimamente il funzionamento del sistema, anche se per maggiori certezze occorrono altri test, in condizioni diverse.

Introducing as *input* data the speed, the voltage (V) and the motor power supply, the output obtained - through a system of differential equations, which is rather complex and made through the direct analysis of the operation - is the values the parameters which characterize the motor and the transmission should have, taking into account all the other surrounding conditions which exist at that given moment. The results are then compared to the actual measurements made on the system in order to

obtain the error signals which - analysed and compared to the historical data - allow supplying in input both a *Diagnostic Index (DI)* and the calculation of the *Remaining Useful Life (RUL)*, in order to allow a maintenance-related decision. After being developed, the system was tested in reality (fig. 20).

The test was run in the night, since October 19<sup>th</sup> until 22<sup>nd</sup> 2009 on a "Citadis" tram operating in the town of Dublin (Dworakowski, 2009, [9]). The tests were run on both lines, namely: the *Red Line* and the *Green Line* (fig. 21).

The test was useful to verify the validity of the model and of the modelling assumptions, and it confirmed that the measurement system is sound and meets excellently the requirements of the algorithm. It seems that the latter simulates excellently the operation of the system, even if, for greater certitude, other tests in different conditions would be required.



Fig. 21 - Tram Citadis e linee di Dublino. *Citadis Tram and lines in Dublin.*

## 8. Conclusioni

Se la manutenzione su condizione è ormai una realtà ben inserita in ambito ferroviario – sia per il materiale rotabile sia per la parte infrastrutturale - che va affinandosi nel tempo, l'evoluzione manutentiva verso la tele-diagnostica e la prognostica è ancora un argomento d'avanguardia.

In tal senso risultano ancora molti passi da compiere, molti problemi da superare e molte tecniche da migliorare; è però fondamentale aver iniziato a percorrere questa strada anche per il trasporto ferroviario, in modo da rendere il settore sempre più efficiente e concorrenziale.

Lo strada dello sviluppo in tale contesto appare lunga ed interessante, anche arrivando ad ipotizzare la possibilità d'introdurre in esercizio materiale rotabile che il costruttore stesso possa monitorare da una *sala regia* (centri anche per la tele-diagnostica), per intervenire nel modo più adeguato a livello di manutenzione ordinaria, preventiva o per eventuali emergenze.

## 8. Conclusions

If on-conditions maintenance is nowadays a well-established reality in the railway industry - as far as both the rolling stock and the infrastructures are concerned - and is being progressively refined, the evolution of maintenance towards remote diagnostics and prognostics is still a vanguard topic.

Many steps are still to be made in this direction, several issues are to be overcome and many techniques need to be improved; it is essential, nevertheless, that also the railway industry has moved towards this way, since this is will doubtlessly enhance both its efficiency and competitiveness.

The way to development in such context seems to be long and interesting, even if we may assume that a new kind of rolling stock, which the manufacturer can monitor from a *control room* (including remote diagnostic centres) and intervene most appropriately for ordinary and preventive maintenance - as well as in emergency conditions - will most likely be introduced into service.

### BIBLIOGRAFIA – REFERENCES

- [1] FEDELE L., FURLANETTO L., SACCARDI D., *“Progettare e gestire la manutenzione”*, McGraw-Hill, Collana di istruzione scientifica, I edizione, Milano 2004.
- [2] BENGTTSSON M., *“Condition Based Maintenance on Rail Vehicles – Possibilities for a more effective maintenance strategy”*, Mälardalens Högskola, Eskilstuna, 2002.
- [3] MOBLEY K., *“An Introduction to predictive maintenance”*, II edition, Butterworth-Heinemann, Elsevier Science (USA), 2002.
- [4] SMITH A. E., COIT D. W., McCULLERS C., *“Reliability Improvement of airport ground transportation - vehicles using neural networks to anticipate system failure”*, 2002 Proc. Annual reliability and maintainability Symposium (RAMS). 2000:74-79.
- [5] Banverket, Verifieringsprov med värmekamera. Detektoranläggning FUES I Haninge Centrum Nsp. Banverket, Svezia, B05-2046/IT40, 2005.
- [6] LECROART E., *“Technical description of e-Train”*, Internal report of Alstom Transport, Villeurbanne, 2008.
- [7] Bombardier Transportation, *“Gestione attività predittiva Orbita”*, Derby (UK), 2008.
- [8] GUZINSKI J., *“PREMAID contribution to the final annual report (WP2)”*, Gdansk University, 2009.
- [9] DWORAKOWSKI P., *“Dublin Citadis transmission monitoring algorithm - test report”*, Alstom Transportation, Dublino, 2009.