



POLITECNICO DI TORINO
Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

*Studio e test di un sistema di monitoraggio wireless autoalimentato
per carri merci ferroviari*

Relatore: Prof. Ing. Aurelio Somà

Candidato: Angelo Carlucci

Luglio 2018

Sommario

Scenario	1
1. Introduzione: il trasporto ferroviario merci in Europa e la necessità di un sistema di monitoraggio	3
2. Panoramica degli attuali dispositivi presenti sul mercato	8
Bosch & SBB Cargo.	9
Nexiot AG.....	10
Savvy.....	11
Kapsch Group	12
PJM	12
Schaeffler.....	14
Cargo CBM project.....	17
SKF	18
SNFC Logistics & Traxens	20
3. Analisi dei principali sottosistemi di un carrello ferroviario.....	21
3.1 Boccola/alloggiamento dei cuscinetti	25
3.2 Sistema frenante	27
3.3 Sala montata.....	30
4. Gruppo di ricerca Ingegneria Ferroviaria Politecnico di Torino	33
4.1 Sistema di monitoraggio cablato	34
4.1.1 Tappo boccola sensorizzato.....	36
4.1.2 Dimostratore cablato installazione e considerazioni	40
4.2 La realizzazione di un sistema di monitoraggio ibrido wireless-cablato.	41
4.2.1 La comunicazione wireless attraverso un modulo radio a bassa frequenza.....	47
4.3 Il progetto S.W.A.M. Rail	51
4.4 L'evoluzione dell' Internet of things: un autonomous internet of things mediante l'uso di energy harvester.....	55
5 Funzioni diagnostiche	61
5.1 Temperatura boccola	62
5.2 Temperatura soles, impianto freni.	71
5.3 Accelerazione verticale in boccola	80
5.4 Decelerazione longitudinale /pressione.....	85
6 Scelta dei parametri da trasmettere via radio.....	89
Conclusioni	97
Bibliografia.....	99

Scenario

Il traffico merci su rotaia è un settore che, dopo anni di immobilismo, necessita di una completa trasformazione per tornare ad essere competitivo, al passo con i tempi ed offrire nuovi scenari economici.

Nel nuovo scenario dell'**Industry 4.0**, anche i carri merce ferroviari possono essere pensati connessi alla rete, la loro digitalizzazione è possibile grazie ad un sistema hardware di monitoraggio e diagnostica on board che rende facile ed immediato il retrofit di tutto il parco vetture esistente.

Oggi il trasporto ferroviario in Europa, nonostante l'economicità energetica e i grandi vantaggi in termini di basso impatto ambientale per quanto riguarda il rapporto kgCO₂/km, non riesce ad essere competitivo rispetto a quello su gomma. Molto spesso si rivela più lento e soprattutto si distingue dalla movimentazione delle merci su strada per tempi di arrivo inaffidabili. Il più delle volte un cliente di trasporto internazionale non è in grado di sapere dove si trovi il suo carico e lo stesso problema ovviamente affligge i gestori delle flotte di carri.

Di fatto la produttività di una flotta di carri merce risulta pesantemente compromessa soprattutto a causa della inefficiente gestione della loro tracciatura mentre si muovono sulla rete: la mancanza di uno scambio di dati fra i diversi operatori di rete rende il reperimento di informazioni sulla movimentazione cargo, attraverso i diversi paesi, molto difficile e molto spesso implica il ricorso ad una rete di contatti privati per accedere a sistemi proprietari.

Le informazioni relative allo stato, alla disponibilità e all'ubicazione di un carro vengono infatti essenzialmente raccolte in modo manuale dal personale sul campo che le comunica telefonicamente o via fax. Particolarmente difficoltoso risulta tenere traccia dei carri quando questi superano i confini nazionali: la comunicazione manuale diviene necessaria per l'incompatibilità fra i diversi sistemi di gestione della movimentazione in uso nei diversi stati e a ciò si aggiungono le difficoltà originate dalla comunicazione verbale fra operatori che parlano lingue diverse.

Il più delle volte il gestore della flotta semplicemente perde la traccia dei suoi carri, non sa dove si trovano né quando e dove potranno essere nuovamente disponibili. Cercare quindi di ottimizzare la disposizione e la distribuzione geografica dei carri disponibili per il carico, in modo da massimizzare il livello di soddisfacimento della domanda di trasporto e minimizzare il numero di viaggi a vuoto, diventa con queste premesse praticamente impossibile.

La digitalizzazione dei treni, dunque, aspira soprattutto a rendere il materiale rotabile "intelligente" e a collegarlo in rete.

I carri "intelligenti" sono dotati, quindi, di GPS e possono fornire informazioni sul carico a bordo mediante diversi sensori, monitorare la temperatura e supportare la manutenzione preventiva tramite

i Big Data. In questo modo il carro è costantemente monitorabile, ovunque si trovi. Inoltre, il carro è in grado di lanciare immediatamente un allarme in caso di evento imprevisto o anomalie funzionali, permettendo di evitare eventi indesiderati (guasti, incidenti, lunghi periodi di sosta del carro prima che questo venga riparato).

La digitalizzazione delle vetture esistenti diviene possibile a patto che il sistema hardware di monitoraggio e diagnostica on board riesca a rispondere ad alcune esigenze fondamentali [1], ossia:

- Assenza di energia elettrica a bordo carro;
- Data Network;
- Uso di Sensori: accelerometri, sensori di temperatura, sensori di pressione, encoder;
- Algoritmi di monitoraggio
- Sistema operativo

Capitolo 1

1. Introduzione: il trasporto ferroviario merci in Europa e la necessità di un sistema di monitoraggio

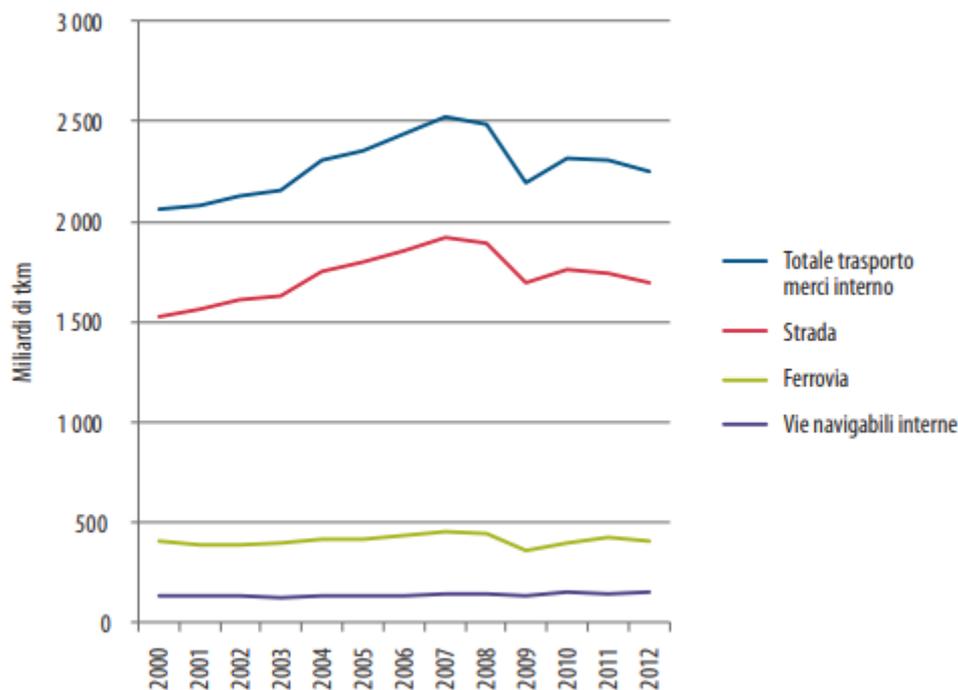
La mobilità delle merci è una tra le componenti più importanti all'interno del mercato dell'UE, in quanto ha la possibilità di rendere maggiormente competitive le industrie e allo stesso tempo ha un impatto significativo sulla crescita economica e sulla creazione di nuove opportunità di lavoro.

Attualmente, circa il 75% [2] dell'intero volume di trasporto interno delle merci nell'UE è trasportato su strada, mentre circa il restante 25% diviso tra rotaia e vie interne navigabili. Le conseguenze di questo sistema si ripercuotono in maniera negativa sulla qualità della vita dei cittadini europei, poiché portano a circa un terzo delle emissioni di CO₂ e del consumo energetico.

Da qui l'esigenza di riconsiderare il sistema di trasporto merci e ricorrere a modalità di trasporto più efficienti e sostenibili, come ad esempio il trasporto su rotaia che oltre ad aver un minor impatto ambientale permetterebbe anche di ridurre la dipendenza dell'Europa dall'importazione di petrolio. Secondo l'Agenzia europea dell'ambiente, infatti, le emissioni di CO₂ del trasporto ferroviario sono, a parità di tonnellata per chilometro trasportata, circa 3,5 volte inferiori rispetto a quelle prodotte dal trasporto su strada. Questi citati, sono solo i vantaggi più evidenti che si avrebbero favorendo il trasporto ferroviario rispetto a quello su gomma, ma bisogna anche considerarne altri tra cui la riduzione delle congestioni stradali e di conseguenza una viabilità più sicura ed efficiente.

In Figura 1 viene riportato il volume totale del trasporto merci interno nell'UE suddiviso secondo le principali tre modalità di trasporto in un intervallo temporale di dodici anni.

Trasporto interno delle merci nell'UE, in miliardi di tonnellate-chilometro



Fonte: Corte dei conti europea, sulla base degli ultimi dati resi disponibili da Eurostat.

Figura 1: Trasporto interno delle merci nell'UE

Il trasporto tramite vie navigabili risulta molto limitato dalla morfologia del territorio e dall'impossibilità di raggiungere capillarmente l'intero continente.

Il trasporto su ferro, come già accennato, risulta essere la seconda modalità di trasporto per la movimentazione delle merci, più utilizzata dopo il trasporto su strada. In alcuni paesi specie nell' est Europa raggiunge una percentuale del trasporto merci complessivo pari al 50%.

Seppur negli ultimi anni, la promozione di modi trasporto più efficienti ed ecosostenibili, in particolare il trasporto merci su rotaia, ha avuto un ruolo importante nelle politiche di sviluppo dell'UE, esso, come visibile dai dati EUROSTAT, non ha subito un incremento considerevole.

Nel 2011, è stato fissato l'obiettivo di trasferire entro il 2030, il 30% del trasporto merci su strada con percorrenze superiori a 300 Km verso altri modi di trasporto, quali il trasporto su rotaia o le vie navigabile e di arrivare al 50% entro il 2050[2].

Alcuni paesi europei, come la Germania e la Polonia hanno un volume di merci trasportate su rotaia di gran lunga superiore, circa 3,5 volte quello degli altri paesi europei, tra cui anche l'Italia.

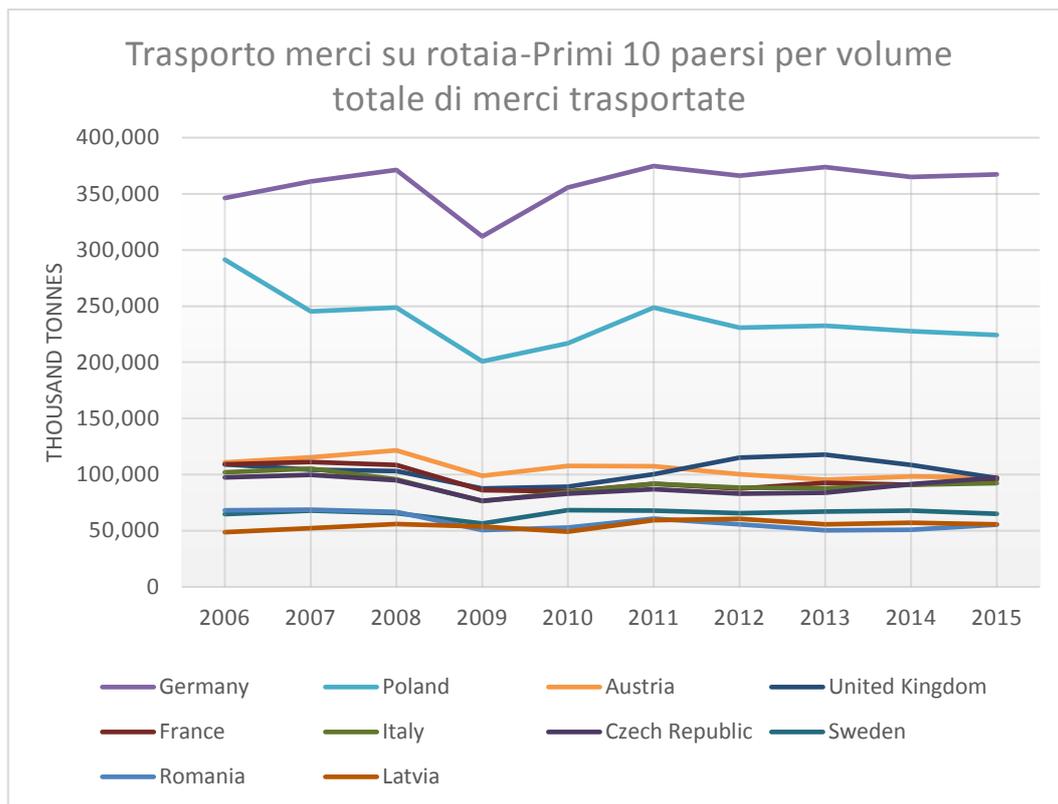


Figura 2. Merci trasportate su rotaia in UE-volume traffico totale

Il trasporto merci su rotaia diviene particolarmente vantaggioso, oltre che dal punto di vista ambientale, anche dal punto di vista economico, per distanze percorse medio-alte che permettono di giustificare i costi fissi associati alle operazioni di carico/scarico delle merci.

Tra le differenti forme di trasporto ferroviario merci, infatti si segnala quella intermodale, cioè trasporto combinato ferrovia/strada nella quale i containers merci sono caricati su carri ferroviari.

L'intermodalità si basa infatti sul concetto che ogni sistema di trasporto è caratterizzato da un rapporto distanza-peso che lo rende più vantaggioso rispetto ad altri sistemi di trasporto. Dato che l'infrastruttura ferroviaria non permette di raggiungere qualsiasi destinazione l'intermodalità diventa il presupposto per un sistema di trasporto efficiente che richiede una ottimale programmazione e gestione dei servizi insieme ad investimenti infrastrutturali e tecnologici.

Infatti, la crescita del trasporto ferroviario merci deve essere accompagnata dall'introduzione di strumenti e tecnologie che rendano possibile il costante monitoraggio di tutto il parco veicoli ferroviario europeo. Oltre a problemi di localizzazione dei carri merci e conseguentemente della gestione ottimale della flotta, già citati nella descrizione dello scenario attuale, si aggiunge infatti la concreta necessità di conoscere le reali condizioni operative dei veicoli ottenendo vantaggi in termini di sicurezza del trasporto e anche di costi, riuscendo a mettere in atto politiche manutentive basate

sulle reali condizioni dei mezzi e non più attuate ad intervalli di tempo regolari indipendentemente dal reale stato di salute dei veicoli.

Garantire la massima sicurezza nel trasporto ferroviario, diviene ancor più importante quando le merci trasportate sono merci pericolose, in quanto gli effetti di un eventuale incidente possono essere ancora più catastrofici, come nel triste caso dell'incidente di Viareggio avvenuto nel 2009.

In quel drammatico episodio, il deragliamentò del convoglio ha provocato la fuoriuscita del GPL contenuto nei carri cisterna portando ad esplosioni e incendi nelle zone limitrofe. Le indagini per stabilire le cause dell'incidente, hanno decretato che si è verificato il deragliamentò a causa del cedimento di un asse del convoglio per fatica, nonostante l'asse in oggetto aveva subito la manutenzione qualche mese prima. Tale incidente è purtroppo la testimonianza drammatica di come le tecniche manutentive sono inefficienti per conoscere le reali condizioni di salute di un carro.



Figura 3. Incidente ferroviario Viareggio 2009.

Infatti invece di usare una manutenzione realizzata ad intervalli prestabiliti sulla base dei chilometri percorsi dal veicolo si dovrebbe utilizzare una manutenzione predittiva basata sulla conoscenza dello stato di salute del sistema e delle sue reali condizioni operative, intervenendo ogni qualvolta si riscontrano valori anomali dei parametri monitorati. Da qui l'esigenza di un sistema di monitoraggio che non solo renda possibile l'adozione di una manutenzione predittiva che permette una riduzione dei costi e degli intervalli in cui il veicolo non è disponibile, ma sia d'aiuto anche alla progettazione, grazie alla conoscenza dei reali valori di stress e carichi a cui è sottoposto il veicolo ferroviario durante la sua vita operativa.

Il monitoraggio prevede l'osservazione e l'analisi di alcuni parametri indicativi delle condizioni del sistema, avendo come obiettivo:

- Assicurarne il corretto funzionamento,

- Individuare eventi anomali
- Verificare la possibilità di guasti incipienti
- Programmare in modo mirato la manutenzione
- Ottenere un database di informazioni, utili sia nel monitoraggio real time che in fase di progettazione

Naturalmente la possibilità di adottare un sistema di monitoraggio, in grado di migliorare la sicurezza del trasporto ferroviario e diminuire i costi, è fortemente agevolata dallo sviluppo in ambito tecnologico di strumenti adeguati ed a basso costo, quali sensori e processori a basso consumo energetico ma in grado di rispondere alle esigenze di elaborazione dati.

Nel corso degli ultimi anni è cresciuto l'interesse per sistemi di monitoraggio delle condizioni operative dei carri merci ferroviari come testimoniato dai primi prodotti dedicati presenti sul mercato, oltre che dalle numerose pubblicazioni che ci sono in letteratura[1], [4], [5].

Il presente lavoro di tesi si propone di studiare e descrivere un sistema di monitoraggio e diagnostica per carri merci intermodale, partendo dai risultati ottenuti nel corso dei diversi anni di studio e sviluppo da parte del gruppo di ricerca di Ingegneria ferroviaria del Politecnico di Torino.

Prima di analizzare il lavoro di ricerca si presenta una panoramica dei principali prodotti presenti ad oggi sul mercato che si concentrano principalmente sulla localizzazione Gps dei carri e sul monitoraggio delle condizioni di trasporto delle merci, ponendo in secondo piano l'interesse per le condizioni operative dei carri.

Capitolo 2

2. Panoramica degli attuali dispositivi presenti sul mercato

La potenziale crescita del traffico ferroviario merci dovuta ai numerosi vantaggi che questo offre, soprattutto in un'ottica di minor impatto ambientale (in linea con le direttive europee per una mobilità sostenibile **Horizon 2020**), spinge le aziende del settore ad un sempre maggiore interesse per sistemi innovativi di monitoraggio e diagnostica per il materiale rotabile merci al fine di migliorare l'efficienza, l'affidabilità e la sicurezza del servizio. Lo scenario attuale, tuttavia, presenta numerose problematiche del rolling stock, quali per esempio assenza di alimentazione elettrica a bordo carro, coesistenza di carri di nuova e vecchia generazione (parco eterogeneo), carri merci che si differenziano per caratteristiche dimensionali e strutturali per meglio adattarsi alla merce da trasportare, utilizzo dei carri su linee e in composizione differenti a seconda delle esigenze di trasporto.

Da qui l'esigenza di individuare un sistema di monitoraggio e diagnostica a bordo carro che permetta da un lato la localizzazione precisa dei carri, in maniera da migliorare l'efficienza del trasporto e della gestione della flotta, dall'altro la conoscenza nel tempo delle condizioni di funzionamento dei carri in modo tale da poter effettuare delle operazioni di manutenzione mirate. Attualmente le uniche informazioni parametriche disponibili sono fornite dalle apparecchiature installate lungo la rete ferroviaria, intervallate da decine di chilometri, e ciò non permette un intervento tempestivo in caso di guasto incipiente.

Le principali caratteristiche che una on board unit deve avere sono:

- **Basso costo;**
- **Autonomia energetica** (energy harvesting); (Il termine Energy Harvesting, o in alternativa Energy Scavenging, indica tecnologie che si propongono di recuperare piccole quantità di energia da impiegare direttamente nel luogo dove questa viene convertita.)
- **Low power;**
- **Assenza di cablaggio** (rete sensoriale wireless “Wireless Sensor Network”);
- **Semplicità e robustezza/affidabilità** (non deve richiedere manutenzione e deve resistere a diverse condizioni operative per almeno 6 anni);
- Permettere la **localizzazione** precisa dei carri;
- Elevata **integrabilità** per retrofit parco eterogeneo.

Dall'analisi dello stato dell'arte, di seguito riportato, appare evidente come il mercato del trasporto merci ferroviario abbia deciso di iniziare un forte cambiamento, volto alla digitalizzazione dei veicoli ferroviari e alla loro connessione alla rete.

Tuttavia, la maggior parte dei dispositivi analizzati ha come comune denominatore quello di essere stato progettato in primis per altri campi applicati e successivamente adattati al mondo ferroviario, soprattutto, per permettere la localizzazione dei veicoli ferroviari e il controllo delle giuste condizioni di trasporto per le merci. Questo se da un lato permette una più efficiente gestione della flotta e delle condizioni di viaggio, dall'altro trascurava sicuramente l'interesse per lo stato di salute dei carri ferroviari e il miglioramento delle loro condizioni operative attraverso la pianificazione di interventi di manutenzione mirata.

A testimonianza del fatto che tali dispositivi sono stati ideati originariamente per altri campi applicativi vi è la presenza in quasi tutti di una batteria, che seppur ad elevata durata, espone il dispositivo a manutenzione, cosa che non è vista di buon occhio nel mercato del trasporto merci ferroviario, dove non si vuole aggiungere ulteriori costi.

Solo alcuni dispositivi sono dotati anche di energy harvester di differente natura, ma si tratta per lo più di dimostratori nati dalla collaborazione tra università/centri ricerche e aziende all'interno di progetti di ricerca.

Bosch & SBB Cargo.

Bosch Engineering e la SBB cargo (Schweizerische Bundesbahnen(SBB)/Ferrovie Federali Svizzere(FSS)) hanno avviato una partnership già a partire dal 2015 per dotare i carri merci di un sistema hardware per trasmettere i dati ad un server tramite rete mobile. I dati riguardano principalmente la posizione dei carri e il chilometraggio percorso grazie ad un sensore GPS, ma una serie di sensori fornisce anche indicazioni riguardo le condizioni di temperatura e umidità all'interno dei vagoni per consentire il corretto mantenimento delle condizioni di trasporto per le merci.

Il dispositivo hardware si chiama AMRA (Asset Monitoring for Railway Applications), ha un peso limitato di 800g ed è di facile installazione per retrofit carri esistenti, come visibile in Figura 4.

Inoltre è dotato di una batteria in grado di fornire autonomia energetica per 6 anni, intervallo di tempo che coincide con quello stabilito per la manutenzione completa del vagone.



Figura 4. Bosch AMRA

Nexiot AG

VTG AG è una società tedesca che opera nel settore del trasporto ferroviario ed intermodale, essendo principalmente attiva come detentore nel noleggio a terzi di vagoni e carri merci.

A marzo 2017 ha annunciato la sua partnership con la società NexiotAG, uno spin-off del politecnico di Zurigo, per dotare la sua intera flotta europea con sensori Nexiot.

Il sistema, mostrato in Figura 5, è dotato di autonomia energetica “raccolgendo” energia dall’ambiente (principalmente energia solare “low light PV cell”). I dati raccolti dai sensori possono essere inviati al centro operativo con una frequenza di 5 minuti.

L’uso di energy harvester supera i limiti derivanti dal non avere energia elettrica a bordo carro e anche quelli derivanti dall’uso di batterie, che vanno sostituite con una certa frequenza. Tuttavia la scelta di usare celle fotovoltaiche può esporre il dispositivo ad un decadimento delle prestazioni energetiche dovuto allo sporco che può accumularsi sulla cella.

La localizzazione (incluso il “geofencing”) e la conoscenza dell’esatto chilometraggio di ciascun vagone, rendono più efficienti le operazioni di gestione e manutenzione della flotta. Il dispositivo è adatto anche ad essere usato in ambienti pericolosi (Atex classe 1).



Figura 5. Nexiot AG Crossmodal

Savvy

Il principale prodotto della Savvy è il SAVVY CargoTrac-Ex, mostrato in Figura 6, un dispositivo telematico, alimentato con una batteria in grado di durare per più di 10 anni, con la possibilità di essere impiegato anche in ambienti pericolosi (EX). Al fine migliorare il ciclo di vita della batteria, in relazione soprattutto ai problemi di scarica, sono stati condotti numerosi tests in condizioni climatiche estreme dei paesi scandinavi.

Il dispositivo non richiede manutenzione per tutto il suo ciclo di vita e ha ridotti consumi energetici.



Figura 6 Savvy Cargo Trac-Ex

La società Transwaggon, una delle principali società di noleggio nel trasporto ferroviario, ha annunciato di voler equipaggiare circa 6000 vagoni con tale dispositivo.

Kapsch Group

Il dispositivo di monitoraggio proposto da questa compagnia è un sistema di monitoraggio M2M, autonomo dal punto di vista energetico, grazie all'impiego di un energy harvester. I dati raccolti dal dispositivo sono inviati ad un centro servizi mediante mobile network. Il dispositivo, mostrato in figura 7, è dotato di un sensore GPS per individuare la posizione, il chilometraggio e la velocità di ciascun vagone. Presenta una memoria interna, che svolge la funzione di "Black box" per salvare le informazioni in caso di mancanza di copertura del mobile network. Può essere integrato con sensori per misurare la temperatura, l'accelerazione, il carico.

La presenza di una batteria tampone permette l'invio dei dati anche se il vagone rimane fermo per un lungo periodo.

Il retrofit di qualsiasi vagone ferroviario per trasporto merci, avviene in meno di 15 minuti, sostituendo il tradizionale coperchio boccola



Figura 7. A sinistra differenti coperchi boccola per monitorare differenti carri, a destra il sistema installato

PJM

Anche la PJ Messtechnik ha proposto una soluzione alla problematica di localizzazione dei carri merci. La PJM è una società a livello mondiale, con sede a Graz, accreditata come laboratorio di test per veicoli ferroviari.

Il sistema WAGGONTRACKER proposto dall'azienda viene installato a copertura dell'alloggiamento dei cuscinetti dell'assile, in corrispondenza della boccola del carrello. All'interno di questo sistema si trova l'elettronica di base, le antenne GPS e GSM, un ricevitore GPS, un modulo GSM e un generatore elettrico integrato senza contatto.

Il generatore va a ricaricare le batterie montate sul dispositivo quando il vagone è in movimento e ciò permette alla funzione GPS di fornire al cliente una localizzazione immediata del carrello. Possono essere segnalati anche tutti i movimenti non autorizzati del carrello, con un facile recupero dei dati campionati in caso di potenziali furti. Inoltre è possibile risalire ad un accurato conteggio dei chilometri percorsi mediante la misura della velocità angolare della ruota.

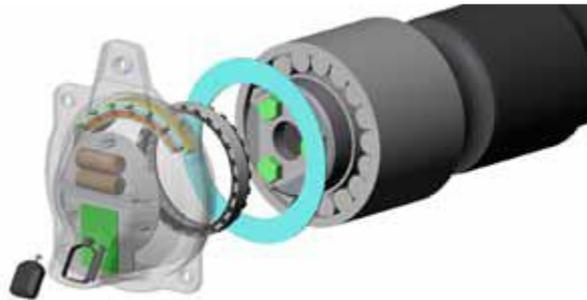


Figura 8. Waggontracker

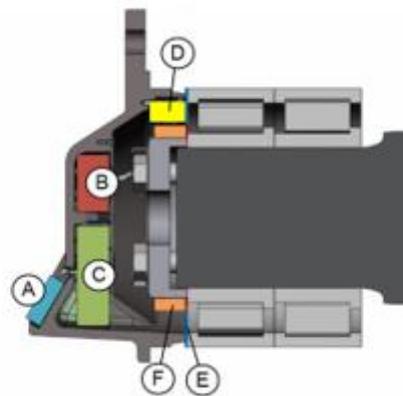


Figura 8b. WaggonTracker componenti

A-antenna GPS e GSM

B-batteria tampone

C-elettronica

D-statore

E-coperchio protettivo assile

F-rotore con magneti permanenti

La versione completa del dispositivo, Waggon Tracker ADV, permette di gestire fino a dieci sensori esterni attraverso inputs analogici e digitali, comprendendo oltre al coperchio boccola sensorizzato, una on board unit, non dotata di energy harvester.

Il punto debole di questo sistema è la presenza di numerosi cablaggi tra OBU e tappo boccola, inoltre l'energy harvester, un generatore radiale a magneti permanenti è presente solo nel coperchio boccola. Il sistema completo, visibile in figura 9, richiede tempi di installazione molto lunghi a differenza degli altri sistemi esaminati fin'ora.

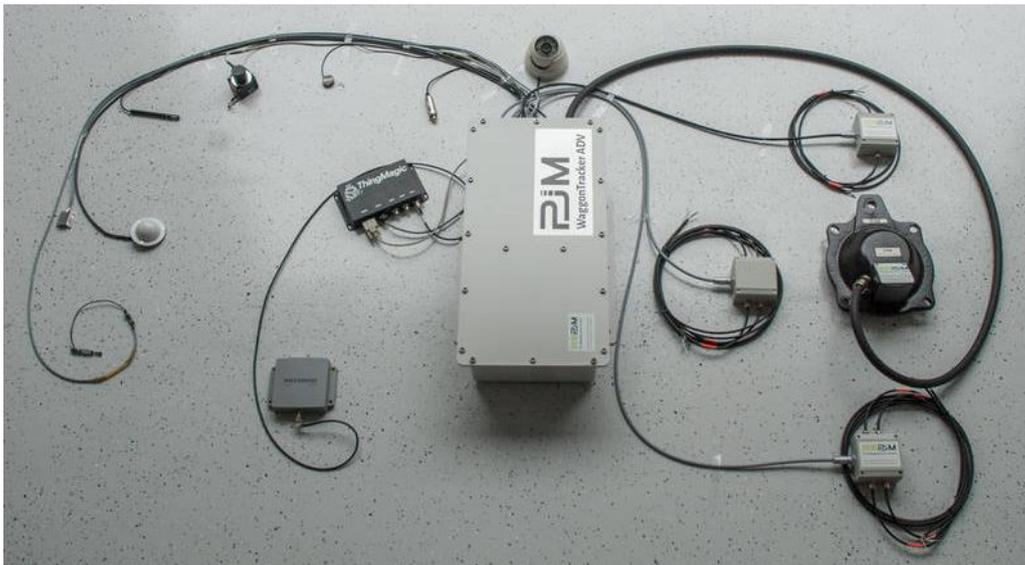


Figura 9. Waggon Tracker ADV

Schaeffler

L'azienda Schaeffler, leader nella produzione di cuscinetti volventi soprattutto per il settore automotive, sta sviluppando un sistema di conditional monitoring per le applicazioni ferroviarie, andando a monitorare i principali componenti di veicoli passeggeri e locomotive. Il sistema al momento soltanto presentato nelle sue linee guida, figura 10, ha carattere modulare e prevede il monitoraggio delle condizioni in boccola a livello di cuscinetti, oltre che il controllo dello stato di salute delle ruote e del carrello ferroviario in generale.

Condition Monitoring for Railway Applications

Schaeffler is developing a modular, open condition monitoring system specially for locomotives, traction - and passenger vehicles. Intended as the basis for a series of comprehensive solutions for ensuring the functional capability of various vehicle components such as axlebox bearings, wheels, bogies, traction motors and gearboxes, the basic module offers scalability up to three axles per bogie. Other modules can be integrated if required. The system increases safety and availability, optimizes maintenance operations and thus contributes to the economical operation of vehicles.

Vehicle communication bus

Vehicle node

Diagnostic units

Gateway

Traction Motor and Gearbox Sensors

Sensors

Hunting and derailment monitoring (optional)

RAPID BOGIE DIAGNOSIS
Additional interfaces allow data for maintenance operations to be read out. Emphasis was placed on modularity during the design process of the system architecture. The expansion modules operate independently, can be used in any combination, and require one basic module each per bogie for operation.

MORE CONTROL
The current operating conditions of the components can be accessed at any time. Critical situations during operation are detected early.

SCHAEFFLER
LUK INA FAG

Graphic: www.josekdesign.de

Figura 10 Schaeffler sistema modulare monitoraggio veicoli passeggeri

Inoltre la stessa azienda tedesca propone una soluzione per un energy harvester, visibile in figura 11, da installare all'interno del corpo boccola. Il generatore a magneti permanenti, realizzato in due soluzioni differenti che possono offrire una potenza elettrica di 50W o 90W alla velocità di circa 100 Km/h.

Tabella 1 Parametri generatore FAG

High power	Parametri	Low Power
24/12 V	Tensione	12 V
4 A	Corrente	0.4 A
100 Watts	Potenza	5 Watts
100-1000 rpm	Range di velocità	150-1000 rpm
-40 +85 °C	Temperatura	-40 +85 °C

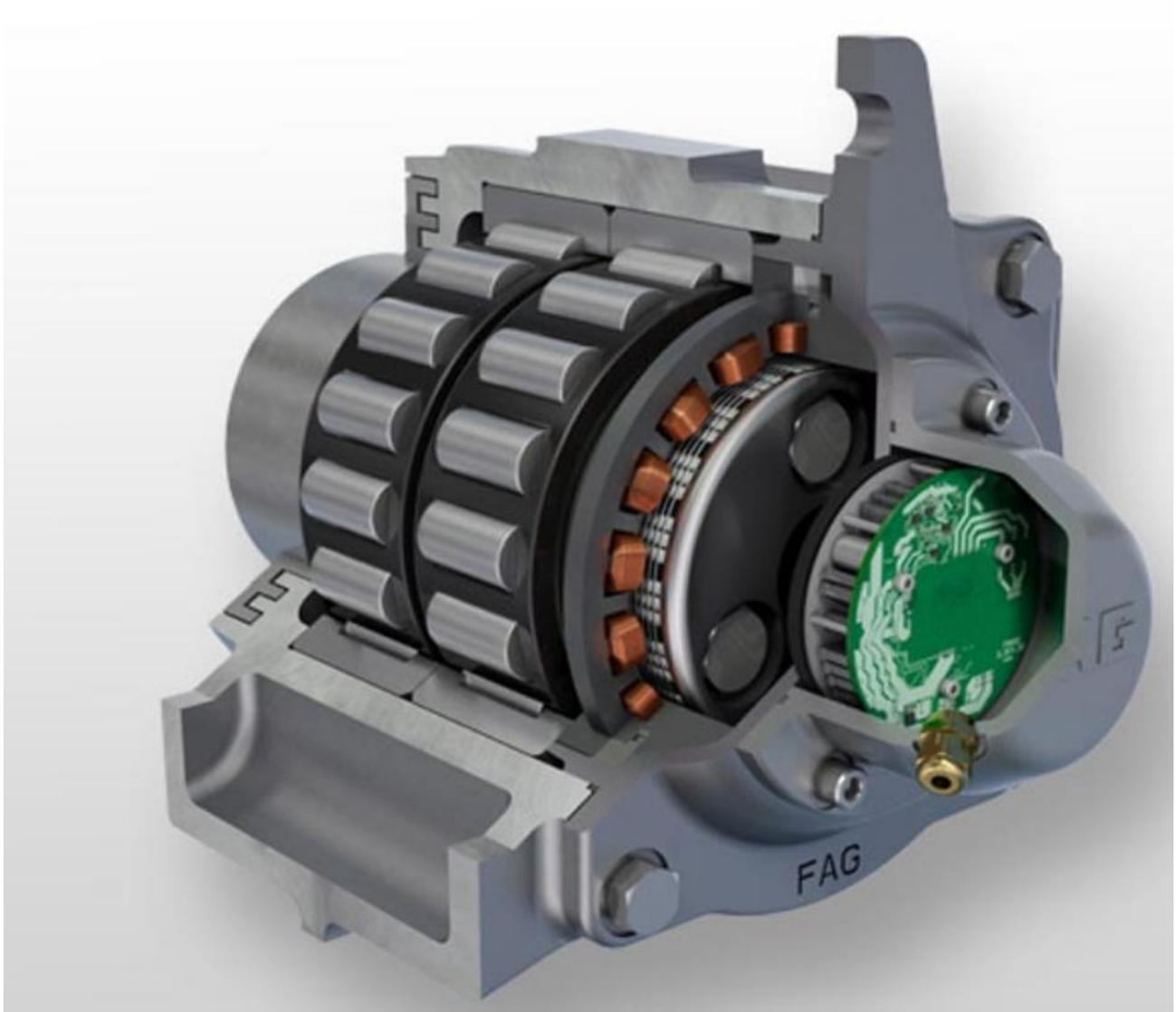


Figura 11.FAG axlebox Generator

Come accennato, al momento nessun dispositivo di monitoraggio delle condizioni operative, ad esempio dei cuscinetti, è stato presentato, tuttavia le potenze elettriche raggiunte con tale generatore sono sufficienti ad alimentare qualsiasi sistema di monitoraggio che sfrutti sensori low power o addirittura un differente sistema frenante, con l'uso di freni elettropneumatici.

Cargo CBM project



Figura 12. Cargo CBM, a sinistra unità on board installata, a destra tappo boccola sensorizzato

Tra i principali progetti presentati in Europa negli ultimi anni, c'è il progetto cargo CBM supportato dal ministero dell'economia tedesco e che vede diverse aziende partners tra cui: TU Berlin, Eckelmann AG, PC-Soft GmbH, Vattenfall Europe Mining AG, WASCOSA AG, Lenord, Bauer & Co. GmbH e the HARTING Technology Group. Il sistema prevede un'unità centrale di monitoraggio, con diversi sensori installati tra cui accelerometri in grado di rilevare impatti causati da scambi ferroviari o difetti sulla linea o sulle ruote.

Gran parte del progetto è dedicato, più che al dispositivo hardware vero e proprio, all'individuazione di algoritmi di monitoraggio, con particolare attenzione al rilevamento delle sfaccettature delle ruote mediante l'accelerazione verticale campionata in boccola [9].

Il sistema hardware, che prevede una connessione cablata tra sottosistema boccola e unità centrale di monitoraggio è stato installato sui veicoli a partire dal 2012 e non ha subito guasti, portando al monitoraggio di circa 400.000 Km.

La possibilità di utilizzare un'interfaccia Can Bus o ZigBee, fornisce modularità al sistema e permette l'integrazione di diversi sensori wireless.

Ulteriori obiettivi come il monitoraggio del sistema frenante, delle soles freno, una prova freni automatica sono oggetto di ricerca e possono essere facilmente integrati nella OBU grazie alla flessibilità e modularità sia del sistema hardware che software. Particolare importanza viene data ad algoritmi per l'analisi dei dati automatica. I segnali campionati vengono infatti confrontati con un data-base e i risultati inviati direttamente al responsabile del programma di manutenzione.

SKF

Anche Skf, azienda leader a livello mondiale nella realizzazione dei cuscinetti volventi negli ultimi anni ha condotto ricerche per permettere agli operatori del settore ferroviario di effettuare una manutenzione basata sulle reali condizioni operative del materiale rotabile. Infatti gli interventi di manutenzione nel settore ferroviario vengono eseguiti principalmente ad intervalli di tempo regolare senza tener conto delle reali condizioni operative dei carri merce e dell'effettivo chilometraggio percorso. Inoltre, tale modus operandi non risulta efficace per prevenire i guasti. Il monitoraggio basato sulle condizioni (condition based maintenance CBM), che rileva parametri quali vibrazioni e temperatura per identificare anomalie in fase precoce, viene comunemente applicato da molto tempo in numerosi settori. Il settore ferroviario, tuttavia, è stato lento ad adottare questo approccio, in parte a causa dei limiti imposti da una serie di normative restrittive.

SKF sta sviluppando un sistema CBM wireless, l'SKF Insight, adatto anche per i treni. Si tratta di installare in post-montaggio un piccolo sensore sull'assale della sala montata del treno, per rilevare danni ai cuscinetti. Attraverso il monitoraggio delle vibrazioni si individuano potenziali guasti incipienti sui cuscinetti. Poiché il segnale vibratorio campionato è caratterizzato da una forte componente di rumore, viene filtrato con un filtro passa banda ed elaborato mediante algoritmi sviluppati da SKF. Tali algoritmi si basano essenzialmente su di un'analisi nel dominio delle frequenze dei segnali campionati che vengono confrontati con la "signature machine". Infatti, lo scopo non è solo quello di individuare un danno incipiente sul cuscinetto, ma anche di distinguere quale particolare componente risulta danneggiato, distinguendo tra rulli, gabbia, pista esterna o pista interna. Ad integrazione dei dati accelerometrici viene campionata anche la temperatura.

Un tale sistema richiede elevate capacità computazionali da parte di un processore che elabora i dati, con conseguente dilatazione dei tempi dedicati al calcolo, a discapito della rapidità nella trasmissione. I nodi sensore sono dotati di GPS per rilevare la posizione e la velocità, tre accelerometri asse, sensore di movimento, sensore di temperatura, sensore di vibrazioni ad alta frequenza. Per alimentare i nodi sensore si utilizza una batteria integrata.

I dati vengono trasmessi wireless ad un centro operativo mediante l'utilizzo della rete mobile e salvati su cloud SKF. Il nodo sensore, come visibile nella figura 13 viene installato su uno dei bulloni che fissa il coperchio boccola.

Utilizzando il segnale accelerometrico campionato, è possibile mediante un altro algoritmo diagnostico individuare anche e sfaccettature delle ruote.

Il sistema è in fase di sviluppo ed è stato installato su un veicolo ferroviario di proprietà dell'operatore nazionale svedese SJ, per eseguire test in linea.

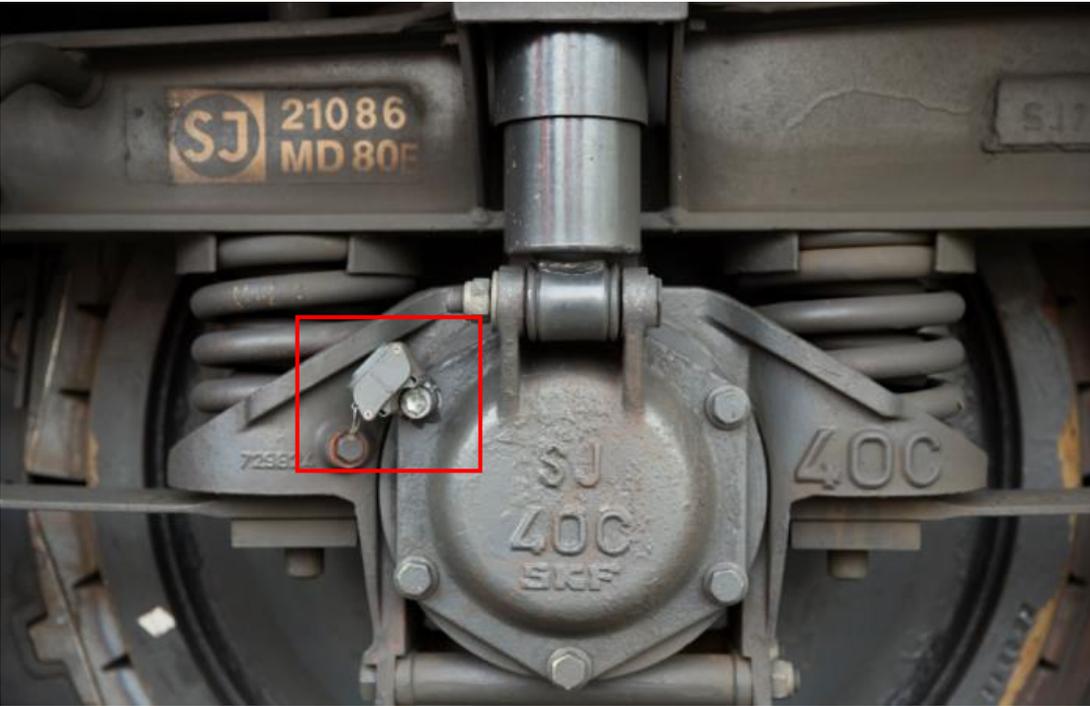
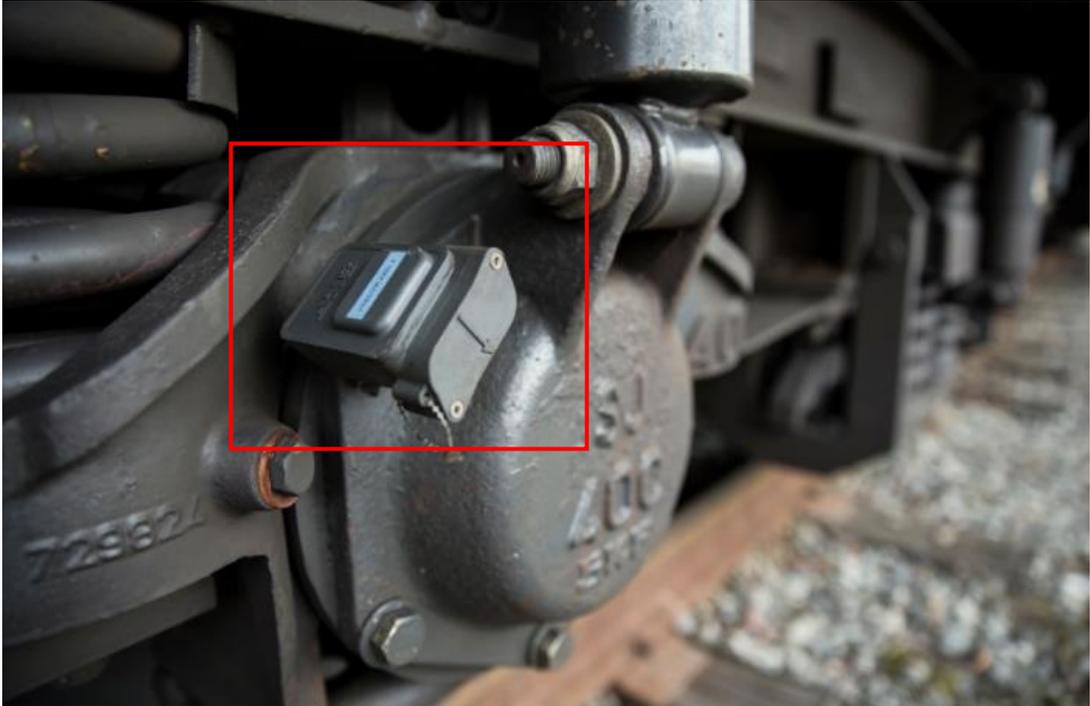


Figura 13 .SKF Insight

SNFC Logistics & Traxens

La principale società francese di trasporto merci ferroviario ha annunciato una collaborazione con la Traxens, azienda specializzata nel tracking multimodale per creare i “treni merci digitali”. La partnership segue un anno di test per sviluppare un “container connesso” che fornisca informazioni chiave nel trasporto, soprattutto riguardanti la localizzazione dei vagoni e la temperatura delle merci trasportate.

I dettagli sul “digital freight train” sono stati presentati alla fiera “trasporto e logistica” a Monaco, al momento non c’è un data-sheet di un vero e proprio prodotto.

Tale collaborazione sembra mirata, considerando anche l’esperienza della Traxens in campo marittimo, alla localizzazione e al monitoraggio delle condizioni di temperatura e umidità dell’aria dei container, al fine di migliorare l’efficienza nella catena di fornitura. Tralasciando, quindi completamente l’interesse per lo stato operativo dei carri ferroviari con le conseguenti operazioni di diagnostica ed intervento manutentivo mirato.

Capitolo 3

3. Analisi dei principali sottosistemi di un carrello ferroviario

Stabilità la necessità e l'esigenza nel settore ferroviario di tipo merci di avere informazioni di base sulla logistica del materiale rotabile e sul suo stato di salute, si procede ad una breve analisi di quelli che sono i principali sottosistemi che costituiscono un carrello ferroviario al fine di individuare i parametri da monitorare per quel che riguarda l'aspetto diagnostico. Il carrello ferroviario è l'elemento del veicolo che comprende il rodiggio e la struttura portante ad esso connessa. Con il termine rodiggio si individuano tutti gli elementi compresi tra le rotaie e la sospensione, ovvero ruote, cerchioni, assi, boccole, cuscinetti.

Le ruote presentano un bordino che permette di mantenere il veicolo entro il binario e al fine di assicurare maggiore solidità formano con l'asse un corpo unico. I cerchioni presentano una lieve conicità volta a mantenere i veicoli nell'asse del binario lungo i rettilinei e a diminuire la differenza di sviluppo che le ruote devono percorrere nei tratti in curva. Ai carrelli ferroviari di tipo merci è richiesto di sopportare un carico molto elevato, senza dover assicurare il comfort del carico, per questo essi sono caratterizzati da una architettura costruttiva semplice e molto affidabile nel funzionamento, in modo da garantire una riduzione sia dei costi sia delle verifiche e manutenzioni del materiale rotabile.

Esistono diverse varianti di carrelli merce ognuno con caratteristiche costruttive differenti. Attualmente la tipologia più diffusa in Europa è il carrello Y25.

La sigla Y-25 indica una tipologia di carrello UIC-ORE (Union International des Chemins de fer - Office de Recherches et d'Essais) progettato per i carri merci che circolano a velocità relativamente basse fino a 100 km/h e con un carico massimo di 25t per asse, oppure alla velocità di 120km/h con un carico di 20t per asse. Il telaio del carrello ha una struttura saldata a base di lamiera e profili in acciaio. La specifica riguardante il materiale impiegato per questi componenti è la EN 10025, mentre l'acciaio è S355J2G3 che è un acciaio con elevata lavorabilità.



Figura 14. Carrello Y25

I suoi elementi principali sono [7]:

- Sospensione primaria con 4 molle ad elica a due a due concentriche;
- Un guida boccola laterale rigida con gioco;
- Il sistema “Lenoir Link”;
- Sospensione secondaria.

La sospensione primaria, rappresentata in figura 15, è costituita da quattro molle a coppie concentriche: la molla interna costituisce la molla di “pieno carico” ed interviene solo dopo una determinata precompressione della molla esterna, grazie al gioco che c’è tra molla e appoggio superiore. Il gioco permette uno stadio a doppia rigidità verticale dato che la molla interna non interviene in condizioni di tara, ma solo dopo aver superato un certo valore di carico.

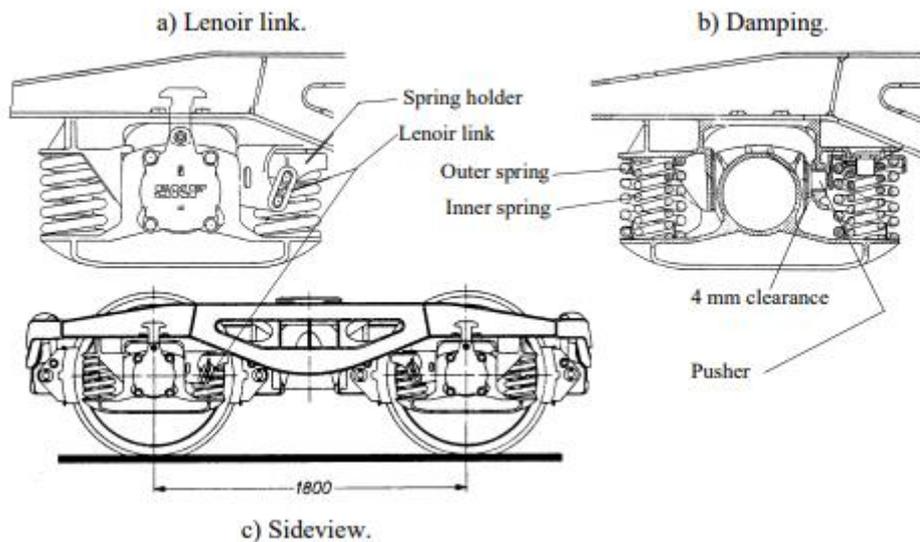


Figura 15. Sospensione primaria e Lenoir link

La molla esterna non appoggia al telaio ma su un supporto molla a bicchiere che è mobile e vincolato al telaio per mezzo di due anelli Lenoir link.

L'anello costituisce un vincolo cinematico sostanzialmente rigido, la cui reazione vincolare che mantiene il supporto molla si sviluppa lungo la congiungente i due perni dell'anello. La forza verticale applicata dalla molla si scompone in due componenti una verticale che si scarica direttamente su telaio e una orizzontale che si scarica su un pistoncino a fianco della boccola.

Lo scopo principale di tale meccanismo è quello di creare una forza d'attrito proporzionale al carico, perché dipende dallo schiacciamento della molla, che smorza i moti verticali del carrello.

La sospensione secondaria è costituita da una ralla sferica posta al centro del carrello e da due pattini esterni, montati sulle fiancate esterne con scartamento 1700 mm.

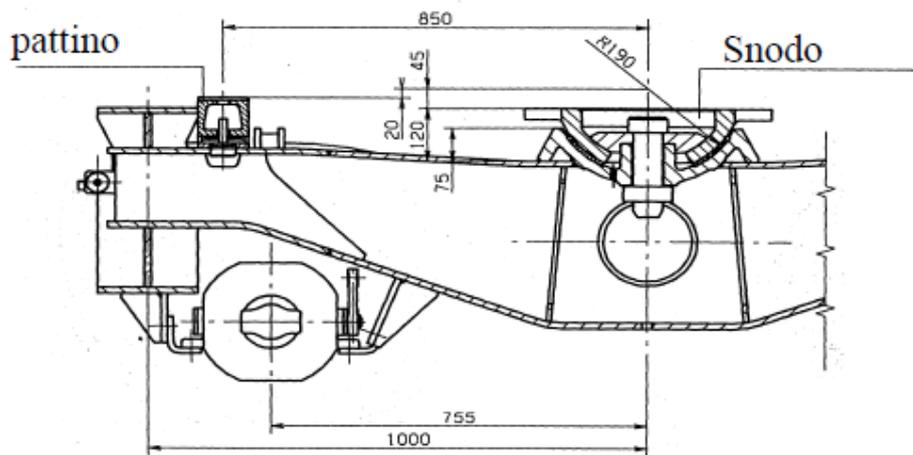


Figura 16. Sezione trasversale carello: sospensione secondaria

Al fine di individuare i parametri da monitorare real time, si farà riferimento alla dinamica verticale, longitudinale e laterale del carrello oltre che a parametri quali la temperatura e la velocità di rotazione dell'assile.

Un carrello ferroviario è un sistema molto “povero” e, dal punto di vista dell'analisi diagnostica, si possono considerare tre sottosistemi:

- Boccola /alloggiamento dei cuscinetti
- Sistema frenante
- Sale: i veicoli ferroviari hanno le ruote di uno stesso asse rigidamente calettate fra loro e l'insieme di due ruote e dell'asse corrispondente (assile) prende il nome di sala montata.

Infatti, un sistema di monitoraggio ha la funzione di verificare sia lo stato di alcuni componenti principali che le condizioni di marcia del veicolo.

Per quanto riguarda il monitoraggio componenti si individuano i seguenti parametri:

- Temperatura boccole per la valutazione dello stato del cuscinetto;
- Temperatura ceppi freno;
- Sospensione primaria;

Per quanto riguarda il monitoraggio veicolo (marcia) si individuano le seguenti condizioni:

- Stabilità di marcia secondo EN14363;
- Deragliamento veicolo;
- «Spiattellamento» ruota;
- Sicurezza di marcia;
- Sovra-velocità in curva;

3.1 Boccola/alloggiamento dei cuscinetti

La boccola ferroviaria è sostanzialmente una scatola di ghisa o di acciaio a chiusura ermetica, che porta il cuscinetto nel quale gira il perno di estremità delle sale dei veicoli ferroviari. Permette la rotazione relativa tra assile ed elementi di sospensione e scarica i carichi sul perno di estremità dell'asse.

I carichi agenti sul veicolo si scaricano sulla sala montata attraverso le boccole, che possono essere:

- ad attrito radente, nelle quali i carichi si trasmettono attraverso un cuscinetto rivestito di metallo antifrizione;
- ad attrito volvente, oggi più usate, dotate di cuscinetti a rulli cilindrici, conici o a botte.

Oggi si usano boccole di diverso tipo che permettono il montaggio di cuscinetti orientabili a rulli, a rulli cilindrici o a rulli conici. Questi cuscinetti devono essere opportunamente protetti per evitare la contaminazione e le perdite di grasso. Dal lato ruota le boccole devono essere munite di tenute, e dal lato opposto si sistema un coperchio boccola con diversi bulloni di serraggio.

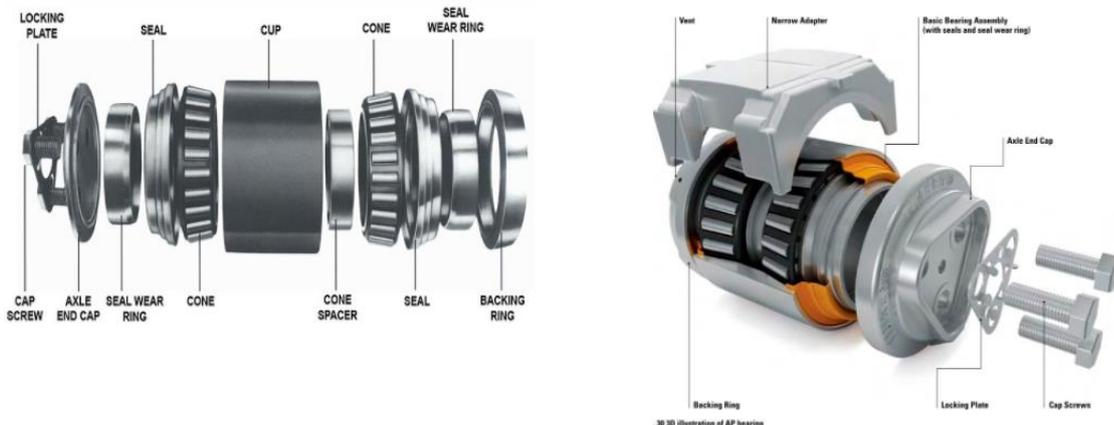


Figura 17. Alloggiamento cuscinetti/corpo boccola

Le boccole sono tra i sottosistemi più critici di un veicolo ferroviario, infatti l'attrito tende a far riscaldare le boccole e ciò può provocare gravi inconvenienti, quali al limite la rottura degli assi e il deragliamenti del rotabile.

L'analisi del sottosistema boccola, può rilevare un danneggiamento ai cuscinetti mediante un aumento repentino e costante della temperatura. Un altro parametro in grado di fornire indicazioni riguardo un danneggiamento incipiente del cuscinetto è il segnale vibratorio (accelerazione verticale in boccola). Entrambi i parametri diagnostici verranno analizzati e descritti in maniera approfondita nel paragrafo dedicato alle funzioni diagnostiche.

Attualmente il loro monitoraggio viene affidato sia ad ispezioni dirette che a particolari dispositivi a infrarossi (R.T.B. rilevamento temperatura boccola), montati a terra, che in caso di anomalia possono bloccare il treno.

Per esempio, il sistema MB100 RTB/RTR dell'Ansaldo, è un impianto fisso che rileva il surriscaldamento delle boccole e delle ruote. Dal punto di vista tecnico, il sistema MB100 RTB/RTR prevede un gruppo di sensori a infrarossi installati lungo i binari: tali sensori leggono e rilevano la temperatura delle boccole e delle ruote che transitano sul punto in cui viene installato il dispositivo. Qualora vengano superati i valori preimpostati, viene automaticamente inviato un messaggio all'operatore ferroviario, il quale adotta le misure necessarie a garantire la sicurezza della gestione ferroviaria.

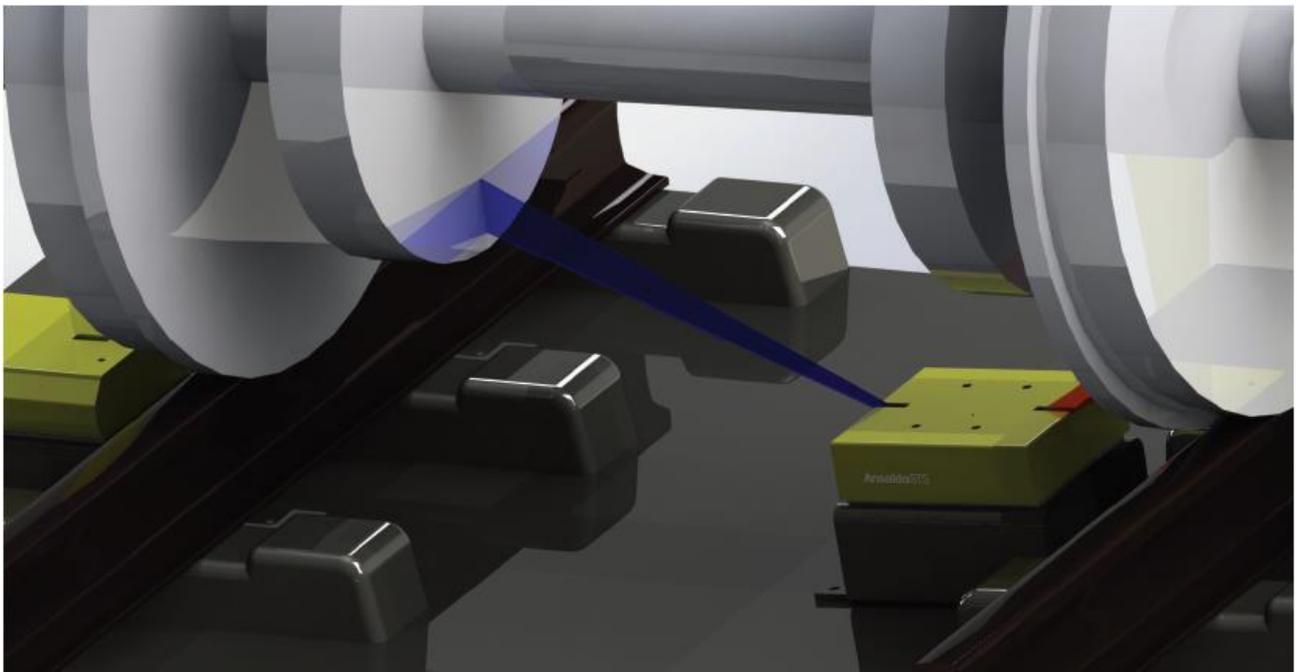


Figura 18. Ansaldo RTB

Tali sistemi, richiedono un elevato livello di manutenzione della linea e permettono solo un monitoraggio discreto che non è in grado di individuare guasti incipienti che possono avvenire tra una misurazione e l'altra. Inoltre, rimane la totale assenza di monitoraggio quando i veicoli transitano in linee non dotate di tali dispositivi. Anche da queste considerazioni nasce l'esigenza di un monitoraggio continuo e indipendente dalla tratta che il veicolo percorre.

Le limitazioni di sistemi di monitoraggio installati sulla linea sono principalmente due:

- non permettono un monitoraggio continuo

- sono gestiti dalle amministrazioni dell'infrastruttura e quindi poche informazioni sono disponibili per gli operatori ferroviari.

3.2 Sistema frenante

La norma UIC 540 impone che la frenatura di un treno, sia esso destinato al traffico merci o passeggeri, sia effettuata per mezzo di un sistema pneumatico in cui la forza frenante venga fornita da aria compressa generata da compressori posti sulla locomotiva e distribuita su tutto il convoglio per mezzo di opportuna condotta. Tale freno deve permettere di variare in modo graduale lo sforzo frenante a seconda del tipo di frenatura. Inoltre, deve essere automatico, intervenendo anche senza il comando del guidatore nei casi in cui si abbia, per esempio, il distacco accidentale di un carro.

La maggior parte dei freni dei treni merci è, quindi, costituito da un sistema ad aria compressa, prodotta nella testa del treno da un compressore e mandata, attraverso una condotta continua, al sistema frenante dei carri. Se la pressione nella condotta generale è di 5 bar, normalmente i sistemi frenanti sono pronti per il servizio e i freni liberi. Attraverso un dispositivo nella locomotiva, il rubinetto di comando, il macchinista può ridurre la pressione nella condotta principale, facendo fuoriuscire aria da questa. Di conseguenza, attraverso dei distributori, viene immessa aria compressa nel cilindro del freno e i ceppi del freno aderiscono alla ruota. Si utilizza questo sistema perché consente, in caso di accidentale spezzamento del treno, di arrestare automaticamente i carri staccatisi. Con una depressione "ordinaria" in condotta generale pari 0,8 bar corrisponde una pressione dei cilindri freno di 1,2 bar. Il principale inconveniente di un sistema frenante pneumatico con un'unica condotta generale è che l'informazione della caduta di pressione passa dalla testa alla coda del treno e quindi questo significa un ritardo nella frenatura che può raggiungere anche i 45 secondi. La struttura tipica di un freno pneumatico è mostrata in figura. 19, dove si individuano:

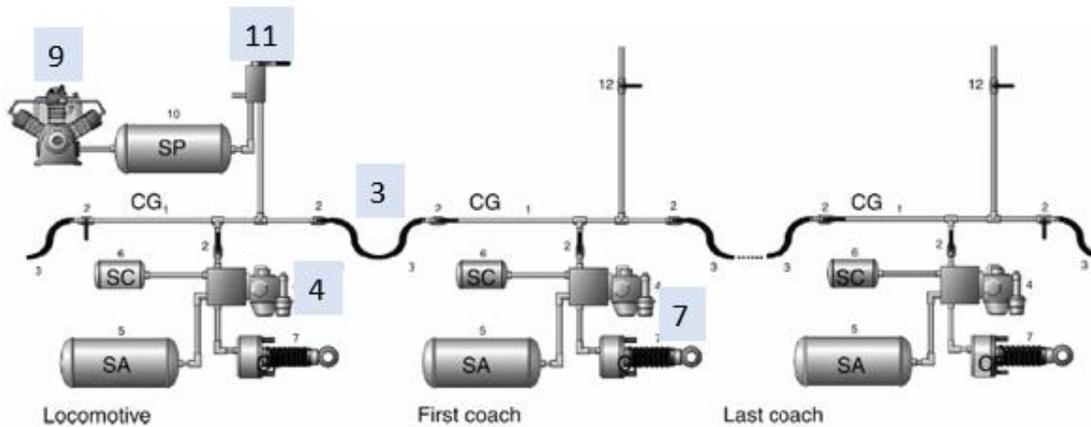
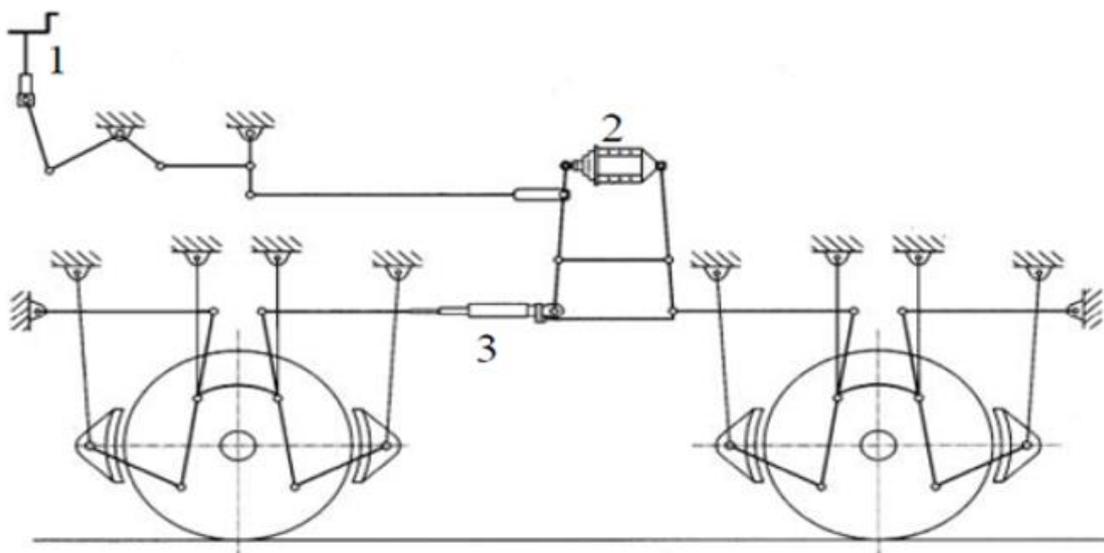


Figura 19. Struttura di un freno pneumatico

- un generatore di aria compressa (9) e un serbatoio principale (SP), installati sulla locomotiva;
- un rubinetto di comando (11), installato in cabina di guida, con il quale il macchinista regola la frenatura del treno;
- una condotta generale (CG) che, attraversando tutto il treno, alimenta di aria compressa gli impianti dei veicoli e comanda, con le sue variazioni di pressione, l'intervento ovvero il rilascio del freno;
- un serbatoio ausiliario (SA) dove viene immagazzinata l'aria compressa necessaria ad attuare la frenatura;
- un serbatoio di comando (SC) che, riempiendosi alla pressione di regime della CG, fornisce il riferimento per il distributore;
- un distributore (4) che confronta la pressione in CG con quella nel SC, attuando o graduando la frenatura ovvero la sfrenatura;
- i cilindri del freno (CF) che convertono la pressione dell'aria in forza applicata sugli elementi frenanti (ceppi o dischi)

Il serraggio dei ceppi sulle ruote viene ottenuto mediante dispositivi "cilindri freno" che spinti dall'aria in essi immessa azionano un leveraggio o direttamente un'asta che preme fortemente contro i ceppi. L'aria in pressione che entra nei cilindri freno va a compensare la forza esercitata da una molla di richiamo e, a seconda del tipo di funzionamento, farà muovere i bracci delle pinze e provocare l'attrito o meno del dispositivo frenante (ceppo).

In figura 20, viene mostrata la timoneria di comando dei ceppi o delle pinze dei freni azionata dal cilindro freno.



- 1-Freno a mano
- 2-Cilindro freno
- 3-Timoneria

Figura 20. Timoneria di comando azionata dal cilindro freno

Come freni ad attrito si utilizzano generalmente, nei treni merci, freni con ceppi. Di norma si utilizzano ceppi in ghisa, in materiale sintetico o composito sinterizzato che vengono premuti sulla superficie di rotolamento delle ruote in acciaio.

Lo stato operativo dei treni merce viene controllato direttamente da un operatore il quale verifica che i ceppi dei freni aderiscano alle ruote di ogni asse.

Se così non fosse, potrebbe darsi che la condotta principale non sia accoppiata in modo continuo oppure che ci sia un guasto pneumatico o meccanico. Viceversa, può accadere che con i freni allentati i ceppi restino incollati alle ruote, perché in inverno sono congelati o un freno a mano sia ancora tirato oppure la timoneria del freno sia bloccata meccanicamente.

L'operatore deve girare due volte attorno a un treno merci per verificare se i ceppi dei freni sono serrati o no, battendo con un apposito bastone sui singoli ceppi. Nel traffico viaggiatori la prova dei freni avviene, invece, in gran parte già automaticamente. Da qui l'esigenza di un sistema di monitoraggio in grado di rilevare in maniera continua anche la pressione della condotta generale e del cilindro freno, in maniera da avere un riscontro automatico sulla parte pneumatica del sistema frenante, ossia una sorta di prova freni automatica anche per il settore merci.

In generale, i principali problemi che si possono riscontrare nel sistema frenante dei veicoli merci ferroviari sono di diversa natura, in particolare si possono riscontrare problemi di natura meccanica, pneumatica e termica.

Meccanica	Pneumatica	Termica
<ul style="list-style-type: none"> • Interfaccia ceppi/ruota • Corsa cilindro freno <ul style="list-style-type: none"> • Timoneria • Usura irregolare suole 	<ul style="list-style-type: none"> • Pressioni cilindro freno <ul style="list-style-type: none"> • Pressione condotta generale • Pressione serbatoio di comando 	<ul style="list-style-type: none"> • Massima temperatura suola in condizioni normali e frenate d'emergenza

Un sistema di monitoraggio on board deve essere in grado di offrire indicazioni sul generale stato di salute del sistema frenante e queste tre macro aree verranno approfondite nei paragrafi dedicati alle funzioni diagnostiche cercando di individuare parametri/indici dello stato operativo del treno.

3.3 Sala montata

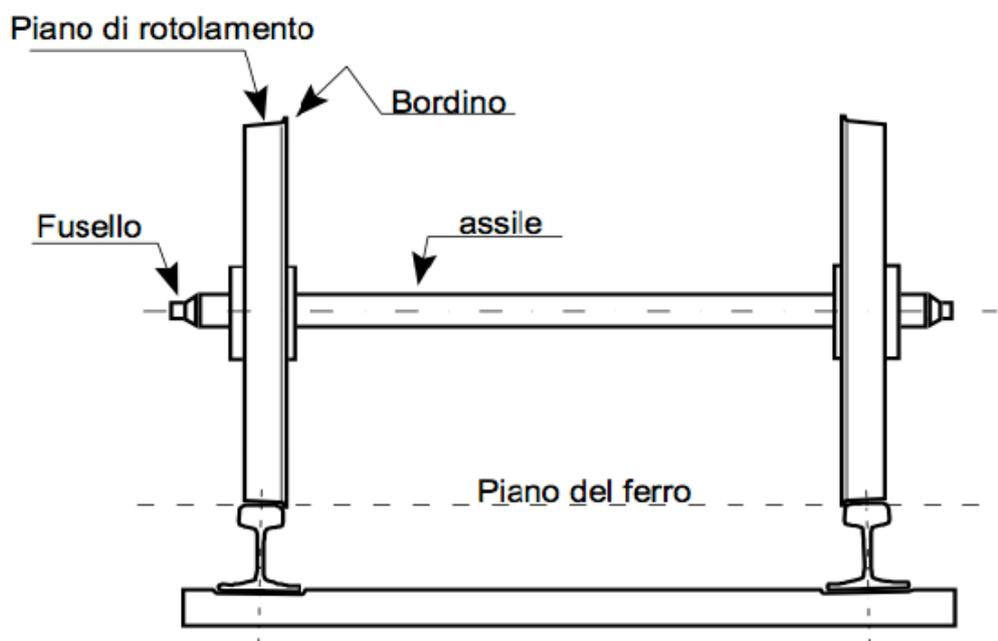


Figura 21. Sala montata

La sala è l'organo che collega, trasversalmente al rotabile, le due ruote ed ha la funzione di trasmettere ad esse i carichi agenti sul rotabile. Il collegamento si ottiene mediante l'inserimento forzato nel foro

della ruota. La ruota ha sezione circolare variabile, piena o anche cava, e presenta alle due estremità i fuselli che, accoppiandosi con le boccole, sopportano i carichi del rotabile.

La ruota è l'organo del veicolo che ha la funzione di trasmettere il carico rotolando sulla rotaia, la parte più esterna si chiama cerchione, ed ha un profilo esterno troncoconico con superficie di appoggio inclinata la cui tangente è circa $1/20$, dotato di un risalto (bordino) che svolge funzione di guida rispetto al binario.

Tale sottosistema è di fondamentale importanza, in chiave diagnostica, perché può essere soggetto a differenti tipi di difetti che causano la messa fuori servizio del rotabile.

Una classificazione più generale dei danneggiamenti per contatto ciclico delle ruote ferroviarie consiste nel suddividerli in tre categorie fondamentali: l'usura, la fatica superficiale e la fatica sub-superficiale (causata da micro o macro difetti interni). Questi fenomeni sono potenzialmente concomitanti, ma la loro soglia di attivazione dipende dal tipo di materiale e dalle condizioni operative: in uno specifico caso non è quindi detto che si verifichino tutti contemporaneamente. Inoltre, alcuni di questi fenomeni sono in competizione tra loro (ad esempio l'usura e la fatica superficiale) ed in tal caso il cedimento del componente (inteso come messa fuori servizio) sarà causato da quello prevalente.

Questa breve analisi dei principali sottosistemi di un carrello ferroviario di tipo merci, fa emergere come ai tre principali sottosistemi corrispondano altrettanti tipi di malfunzionamenti che un sistema di monitoraggio on board deve essere in grado di rilevare tempestivamente ed in maniera affidabile.

In figura 22, si mostra un quadro riassuntivo.

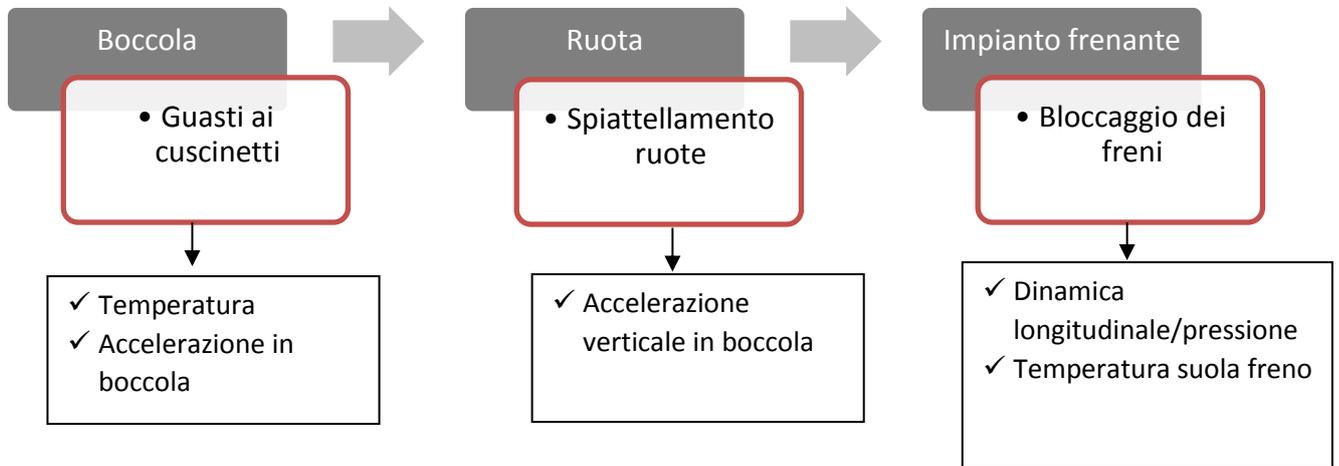


Figura 22. Quadro riassuntivo sottosistema/tipo di guasto/parametri da monitorare per individuare il guasto

Capitolo 4

4. Gruppo di ricerca Ingegneria Ferroviaria Politecnico di Torino

Il gruppo di ricerca di ingegneria ferroviaria del Politecnico di Torino ha sviluppato nel corso degli anni diversi studi per la realizzazione di un sistema di monitoraggio e diagnostica dei carri merci ferroviari. Tali studi, riportati nei successivi paragrafi, insieme alla realizzazione dei differenti prototipi hanno portato ad un'evoluzione nell'ideazione del sistema di monitoraggio autoalimentato wireless oggetto del presente lavoro di tesi.

In generale, un sistema di monitoraggio è costituito da tre parti principali, ossia i sensori, un sistema di acquisizione dati ed un processore che permetta di elaborare i dati campionati ed eventualmente trasmetterli.

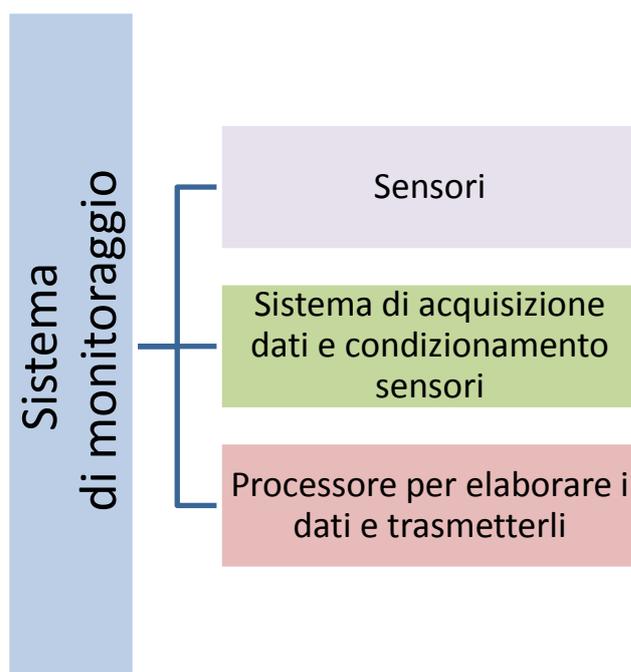


Figura 23. Architettura generale del sistema

Data la sua natura di adattamento ad un sistema già esistente il dispositivo di monitoraggio deve essere modulare in maniera da rendere quanto più facile ed efficiente il retrofit dell'eterogeneo parco vetture.

4.1 Sistema di monitoraggio cablato

Il primo sistema di monitoraggio descritto, è un sistema cablato pensato sia per veicoli passeggeri che per veicoli merci [10]. La parte hardware è costituita da diversi sensori, un sistema di acquisizione dati e un processore per permettere la fase di post processing necessaria per il rilevamento degli eventi anomali ed eventuali guasti del sistema carrello ferroviario. Al fine di rendere possibile ed immediato il retrofit dei carri esistenti si sceglie in tale sistema di sostituire il tappo boccola originale, di cui sono dotati tutti i carrelli, con un nuovo tappo boccola sensorizzato.

Il cuore del sistema è un multiplexer, ossia un circuito integrato che costituisce la centralina di monitoraggio, permettendo di selezionare di volta in volta i segnali in ingresso che si vogliono analizzare e inoltrarli attraverso una singola linea di uscita.

I segnali acquisiti sono la temperatura e l'accelerazione lungo i tre assi (X, Y, Z) su ogni boccola, la temperatura dei dischi/ceppi freno, la velocità di ciascun asse del carrello e le accelerazioni in cassa. I segnali campionati sono analizzati da un pc embedded attraverso l'uso di diversi algoritmi che consentono di verificare le condizioni dei cuscinetti, delle ruote, dei freni, delle sospensioni primarie e secondarie (solo per veicoli passeggeri), oltre ad altri comportamenti dinamici indicanti malfunzionamenti o incipienti deragliamenti. Livelli di allarme vengono generati in presenza di fenomeni anomali e si prevede la possibilità che questi siano comunicati al macchinista, o al centro di controllo remoto.

Nella figura 24, si può osservare la parte hardware del sistema di monitoraggio per un singolo carrello, costituito da 4 coperchi boccola sensorizzati. La realizzazione di questo dimostratore prevede solo quattro coperchi boccola perché è stata effettuata per dei test in linea su un carro merci di tipo ORE, con un carrello dotato di due assi e quindi 4 boccole.

In figura, oltre ai tappi boccola sensorizzati è possibile osservare l'unità centrale di monitoraggio, caratterizzata da un sistema di condizionamento ed acquisizione dei segnali progettato ad hoc, e la connessione fisica tra unità centrale e tappi boccola sensorizzati realizzata mediante cavi posti all'interno di guaina in maglia d'acciaio su cui sono montati i connettori circolari multipolari. Questo assicura un'adeguata protezione ai cavi da urti o danneggiamenti.

Il segnale proveniente dai sensori accelerometri, sensori temperatura boccola e sensori temperatura soles freno viene reindirizzato dalla centralina di monitoraggio alla scheda di input analogico a quattro canali, la selezione è comandata dalla scheda di input/Output digitale mediante (Scheda NI-6501) mediante segnali digitali. Tale scheda è connessa al Pc embedeed, tramite protocollo usb.

Per l'acquisizione del segnale viene utilizzata una scheda di acquisizione a 4 canali Texas Instrument modello 9239.

Infine, anche la scheda di acquisizione analogica a 4 canali (Scheda NI-9239) è connessa al Pc embedded tramite usb, e ciò consente la fase di analisi dei segnali reindirizzati dal selettore.

Mediante un protocollo internet TCP/IP avviene la connessione fisica tra Pc embeddeed, presente nell'unità centrale di monitoraggio e Pc presente in cabina di guida.

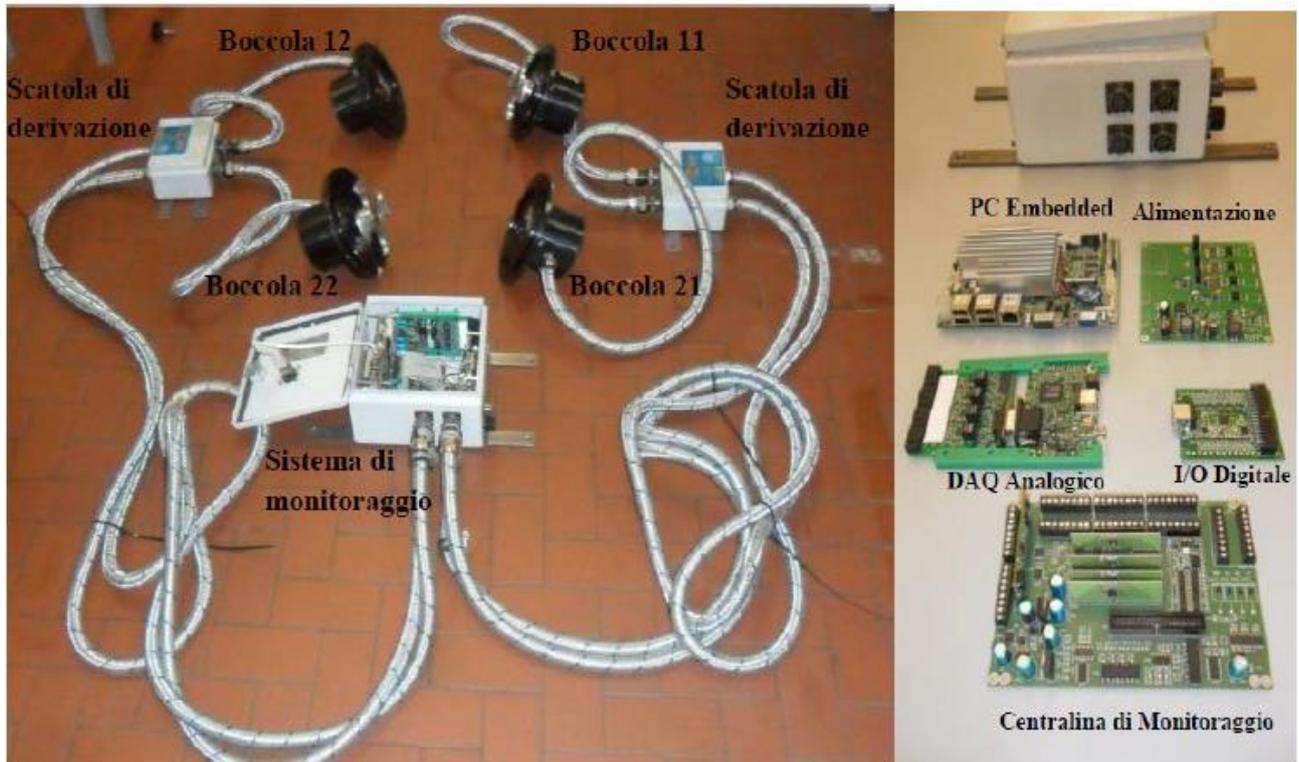


Figura 24. Layout del sistema di monitoraggio completo per un carrello

Fonte immagine: N. Zampieri [10]

La centralina di monitoraggio si occupa sia di alimentare tutti i sensori, accelerometri, termoresistenze ed encoder, sia del condizionamento degli stessi, ossia delle operazioni di normalizzazione e filtraggio a livelli che li rendano compatibili per la successiva conversione analogico-digitale in maniera che possano essere letti tramite strumenti software.

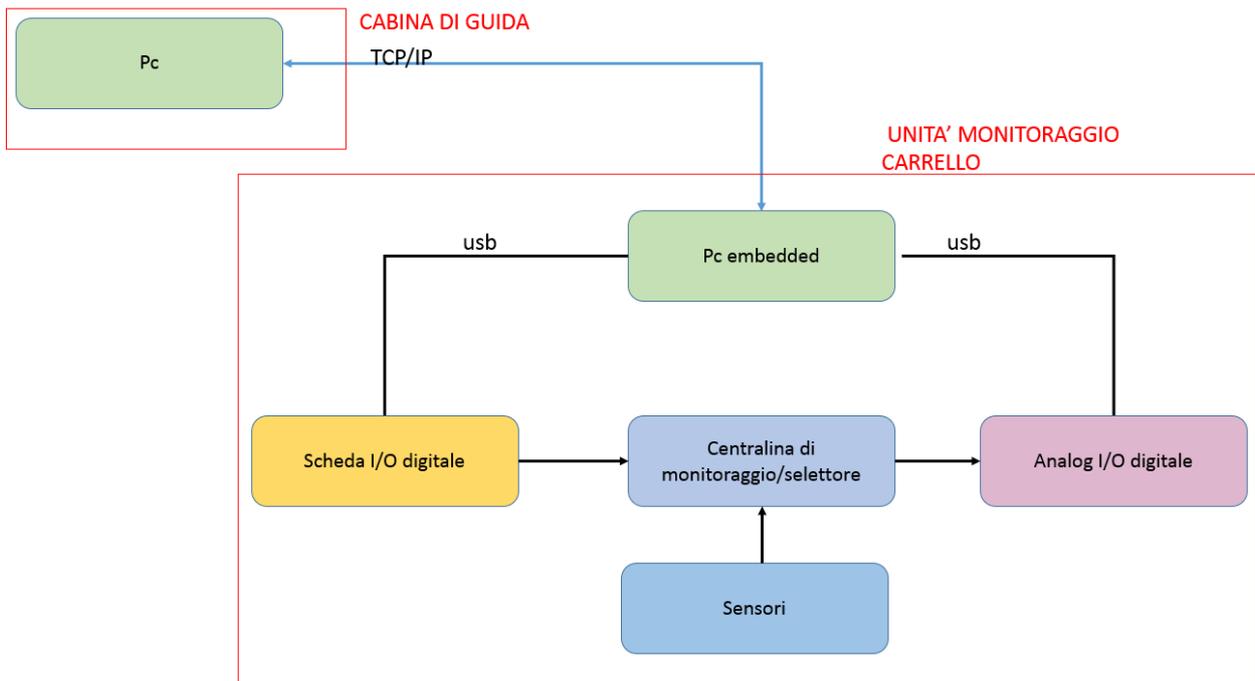


Figura 25. Dettaglio acquisizione e condizionamento dati

4.1.1 Tappo boccola sensorizzato

Una delle caratteristiche fondamentali di un sistema di monitoraggio destinato ai veicoli ferroviari di tipo merci è sicuramente la sua economicità e semplicità. Infatti, la sua installazione non deve richiedere importanti modifiche della configurazione originale dei veicoli, perché questo comporterebbe elevati costi aggiuntivi non sostenibili in questo settore.

A tale scopo il primo dimostratore descritto[10], prevede un nuovo tappo boccola con un design tale da permettere il posizionamento al suo interno di tutti i sensori necessari a monitorare i parametri fisici in boccola, ma allo stesso tempo non richiede alcuna modifica per la sua installazione, infatti, sfrutta gli stessi fori filettati del tappo boccola originale. I coperchi boccola seguono un preciso standard costruttivo quindi realizzando poche tipologie di tappo boccola sensorizzato si riesce a coprire il retrofit dell'intera gamma di veicoli esistenti. In figura 26 si riporta la sezione di un coperchio boccola sensorizzato, adatto per il retrofit di un carrello di tipo Y25.

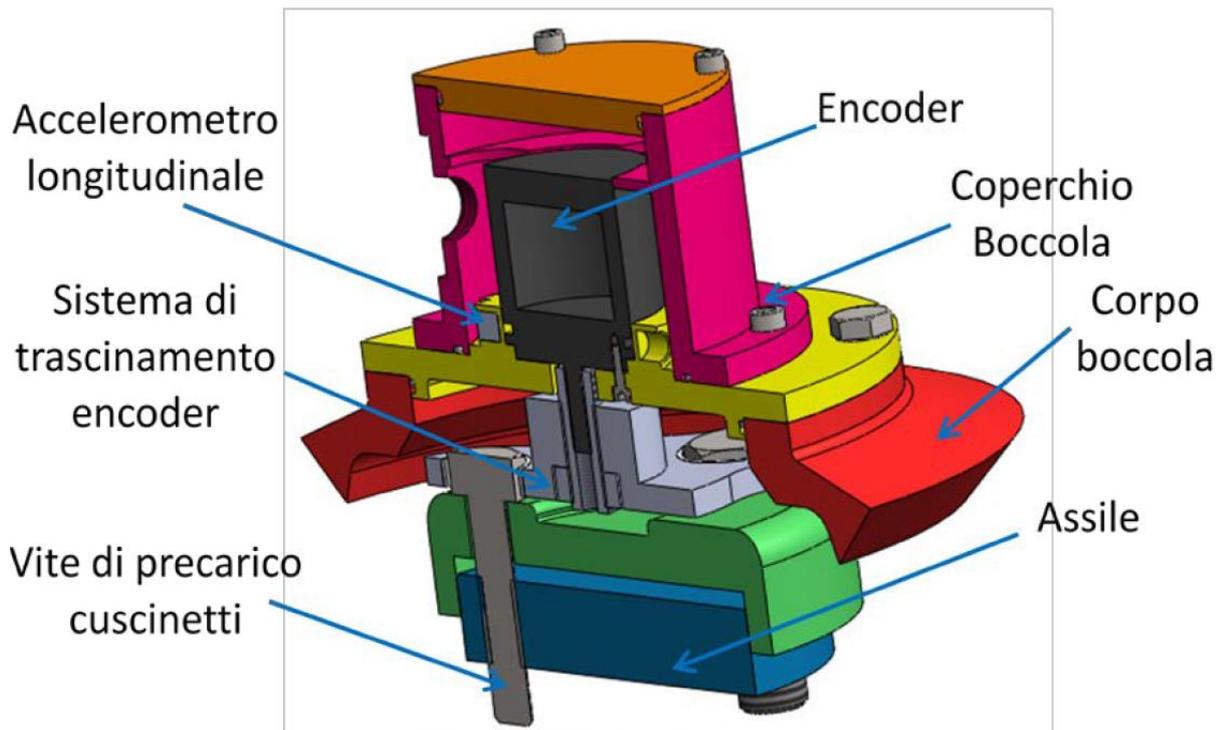


Figura 26. Tappo boccola sensorizzato

Fonte: N.Zampieri [10]

In figura è ben visibile il sistema di trascinamento dell'encoder, accoppiato mediante un sistema a vite alla flangia che ospita le viti per il precarico dei cuscinetti.

Sul coperchio boccola vero e proprio (in figura rappresentato di colore giallo), dalla parte più vicina al cuscinetto viene installata una termoresistenza per avere un'indicazione della temperatura più prossima a quella del cuscinetto.

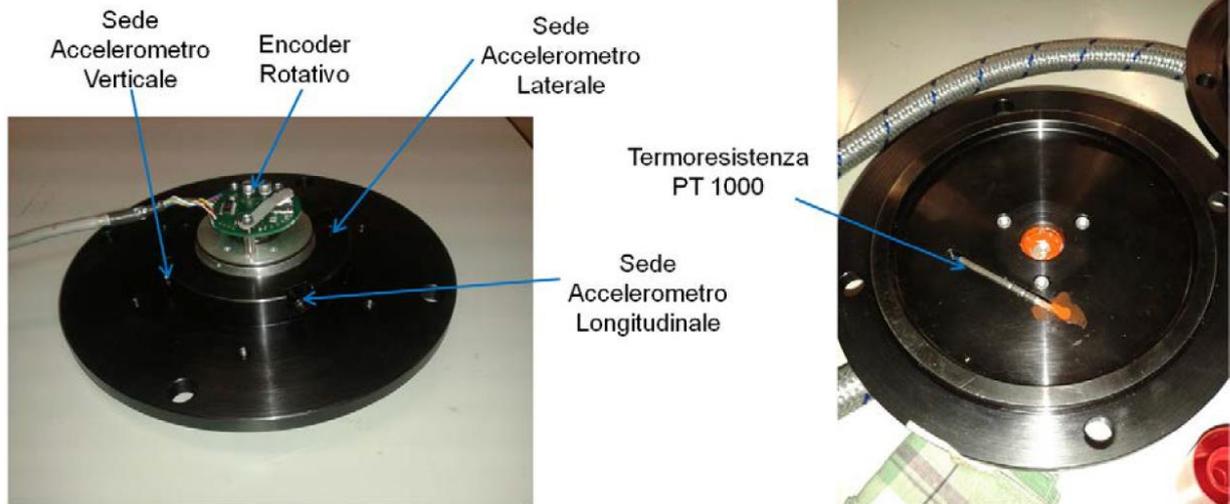


Figura27.Particolare dell'installazione encoder rotativo e termoresistenza

Fonte: N.Zampieri [10]

Nell'immagine, è possibile anche vedere come il tappo sia stato dotato di sedi per gli accelerometri del tipo piezoelettrico monoassiali, prodotti dalla PCB (serie 660). La realizzazione di tali sedi è importante per rendere più facile l'incollaggio dei sensori ed evitare che questi si stacchino andando a finire nel cuscinetto danneggiandolo.

In Tabella 2 si riportano le principali caratteristiche elettriche di questo tipo di sensore, non bisogna infatti, tralasciare l'aspetto dei consumi energetici che, come più volte esposto, risulta essere di fondamentale importanza in un ambiente come quello del trasporto merci ferroviario, povero e caratterizzato dall'assenza di elettrificazione a bordo carro.

Accelerometri ICP (Integrated Circuit Piezoelectric) sono accelerometri con un circuito elettronico integrato all'interno del trasduttore, non necessitano pertanto di preamplificatore esterno, ma solo di un alimentatore esterno a corrente continua. Il segnale in uscita dall'accelerometro è una differenza di potenziale. L'alimentatore esterno o accoppiatore può avere anche la funzione di amplificare il segnale attraverso un guadagno regolabile. Negli accelerometri ICP il segnale in uscita dal trasduttore è come detto una tensione e pertanto la sensibilità del trasduttore si misura in $mV/(m/s^2)$ o in mV/g dove g è l'accelerazione di gravità.

Tabella 2 Caratteristiche accelerometro ICP

Accelerometro a 2 fili ICP T08	
Sensibilità ($\pm 20\%$)	100mV/g
Range di misurazione	$\pm 50g$
Range di frequenza ($\pm 3dB$)	da 0.32 a 10KHz
Frequenza di risonanza	>25 KHz
Tensione di alimentazione	da 18 a 28 VDC
Assorbimento di corrente	da 2 a 20 mA
Temperatura di esercizio	da -54 a +85 °C

Per quel che riguarda i sensori di temperatura, vengono utilizzati delle termoresistenze del tipo PT 1000, prodotte da Pixsys (modello 2000.90.232). E' importante sottolineare come per una corretta installazione del sensore è stato usato un collante termoconduttivo che permetta al flusso di calore di passare dall'ambiente boccola al sensore senza alterarne la misura.

Tabella 3 Caratteristiche delle termoresistenze installate in boccola

Termoresistenza PT 1000	
Temperatura d'esercizio	-50° + 110 °C
Sensore	PT1000 B 0.12% 1000 Ohm a 0°C
Materiale cavo	GSC silicone
Precisione	Norme IEC 751

Infine, l'ultimo sensore del sottosistema boccola sensorizzato è un encoder rotativo differenziale con 1024 impulsi giro, il quale viene montato all'interno della sua scatola. Questa svolge una duplice funzione, protegge l'encoder da urti o corpi esterni e permette la realizzazione di una sede per il connettore multipolare sul quale vengono saldati i cavi provenienti dai diversi sensori.

Nella seguente tabella vengono riportate le principali caratteristiche elettriche del tipo di encoder scelto. Tale sensore permette di misurare la velocità angolare della sala montata.

Tabella 4 Caratteristiche elettriche encoder EM520

Caratteristiche elettriche encoder EM520	
Alimentazione	15V
Assorbimento di corrente	da 30 a 80 mA
Numero impulsi/giro	1024
Segnali di uscita	Due onde quadre sfasate di $90^\circ \pm 15^\circ$ Impulso di zero larghezza $90^\circ \pm 15^\circ$
Impulso zero	Un impulso a giro
Frequenza max	da 100 a 200 KHz

4.1.2 Dimostratore cablato installazione e considerazioni

L'hardware di monitoraggio appena descritto è stato installato e testato su un carrello merci di tipo ORE della società "ferrovie del Gargano" all'interno del progetto Europeo ACEM-Rail.

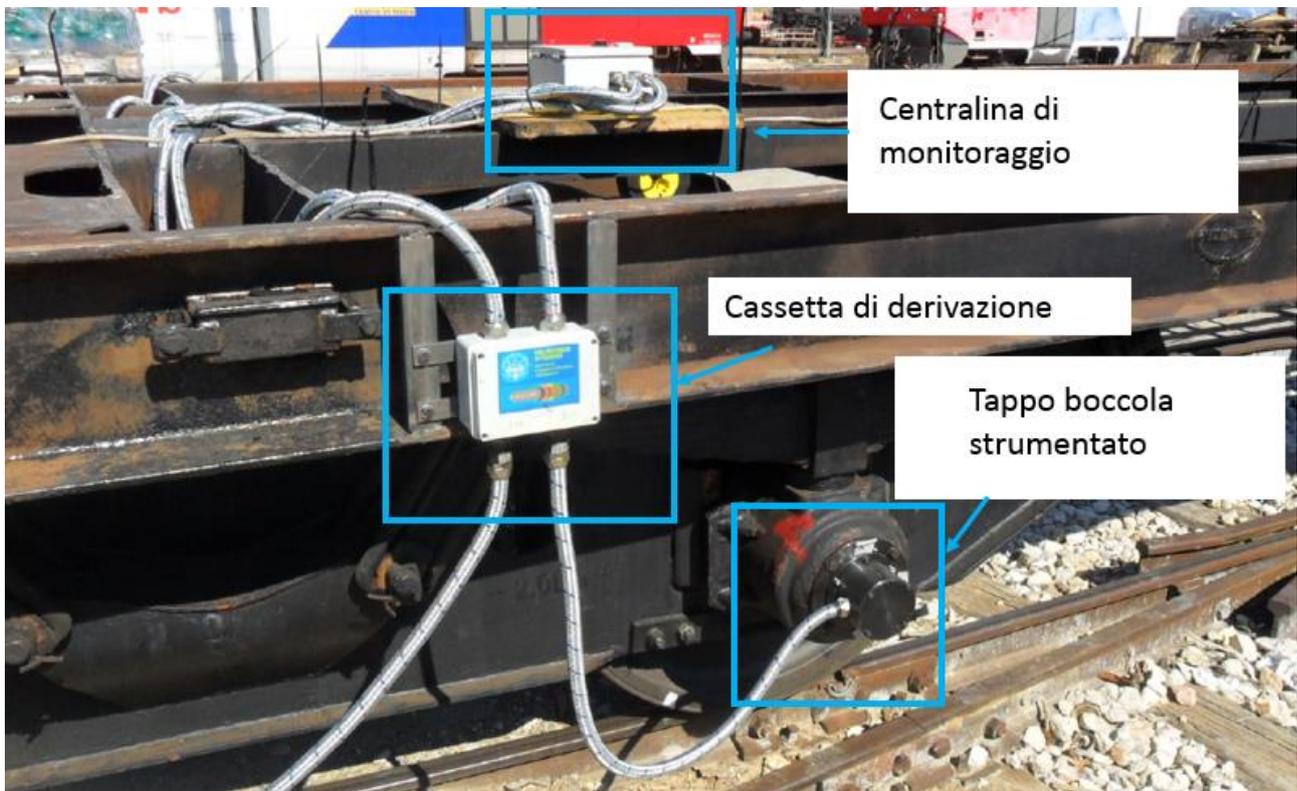


Figura28.Installazione su carro merci di tipo ORE.

Fonte: N.Zampieri [10]

Come si può facilmente riscontrare dall'immagine dell'installazione, un sistema cablato come quello appena descritto, a causa della presenza dei numerosi cavi dato l'elevato numero di sensori, è caratterizzato da un'installazione non particolarmente semplice, ma alquanto invasiva e con costi piuttosto elevati. Inoltre, la presenza di un pc embedded e di schede di acquisizione NI porta ad avere consumi energetici molto alti (un consumo di potenza elettrica di qualche decina di Watt) che difficilmente può essere soddisfatta con sistemi di energy harvester.

Da qui l'esigenza di procedere allo studio di un sistema di monitoraggio che seppur andando a monitorare gli stessi parametri fisici, utilizzi dei componenti con bassi consumi energetici e un protocollo di comunicazione wireless, che non richieda la necessità di un cablaggio tra il sottosistema boccola e l'unità centrale di monitoraggio.

Un sistema wireless, infatti, porta sicuramente elevati vantaggi dal punto di vista del costo, dei consumi energetici, della flessibilità e della mobilità, seppur con potenziali limitazioni per la continuità della trasmissione dati, in un ambiente come quello di un terminal o di una stazione ferroviaria caratterizzato dalla presenza di numerose fonti di disturbo elettromagnetico.

Tabella 5 Confronto tra un sistema Wireless e cablato

<u>Caratteristica</u>	<u>Wired</u>	<u>Wireless</u>
<u>Costo</u>	X	✓
<u>Consumi</u>	X	✓
<u>Affidabilità</u>	✓	X
<u>Mobilità</u>	X	✓
<u>Sicurezza</u>	✓	X
<u>Flessibilità</u>	X	✓

4.2 La realizzazione di un sistema di monitoraggio ibrido wireless-cablato.

In questo paragrafo viene presentato un ulteriore sistema di monitoraggio [22], per la diagnostica ed il monitoraggio delle condizioni operative dei carri merce. Tale sistema realizzato e testato in linea, è, come il precedente, caratterizzato da un'unità centrale ed un sottosistema boccola, in grado di comunicare tra loro, ma questa volta mediante un protocollo di comunicazione wireless. Il sistema è caratterizzato anche dalla presenza di sensori, collegati con l'unità centrale di monitoraggio mediante

cablaggio. In particolare, si tratta di sensori di pressione, per monitorare lo stato operativo del sistema frenante (la sua parte pneumatica), ed anche sensori di temperatura per monitorare la temperatura delle suole freno.

Le caratteristiche principali di questo sistema sono:

- ✓ Costo ridotto;
- ✓ Basso consumo e tale da rendere possibile l'autoalimentazione;
- ✓ Semplicità di installazione

In figura 29 viene riportato lo schema di funzionamento del dispositivo di monitoraggio boccola, in cui l'unità intelligente è un microcontrollore ATmega 328P. La scelta di tale dispositivo viene fatta perché nel sottosistema boccola non sono richieste grandi prestazioni computazionali, dovendo gestire solo due accelerometri e un sensore di temperatura, oltre alla parte di trasmissione radio. Una memoria micro SD, svolge la funzione di black box, registrando tutti i parametri campionati.

La novità rispetto al precedente prototipo descritto risiede nell'utilizzo di un protocollo di comunicazione wireless che rende non necessari il cablaggio tra sottosistema boccola ed unità centrale di monitoraggio.

Tale configurazione rende anche estremamente pratica l'installazione e permette di monitorare tutte le boccole sfruttando più nodi sensoriali. L'utilizzo di nodi aumenta la modularità del sistema che può essere adattato a veicoli con diverso numero di assi e carrelli.

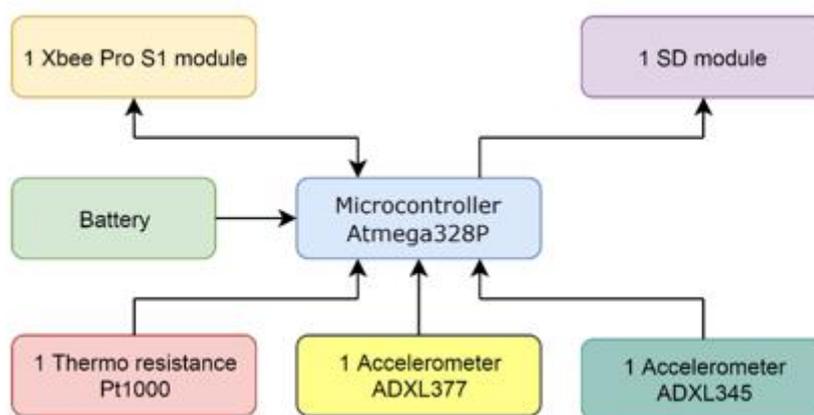


Figura 29. Schema logico dispositivo di monitoraggio boccola

I sensori utilizzati sono due accelerometri mems, una termo resistenza del tipo PT 1000 per monitorare la temperatura sulla parte esterna del coperchio boccola e un modulo Xbee Pro S1 per la

comunicazione radio. Viene scelta la parte esterna del coperchio, perché seppur caratterizzata da un valore un po' più basso di temperatura rende l'installazione non invasiva, non andando a modificare in nessun modo l'ambiente all'interno del corpo boccola.

L'accelerometro triassiale ADXL377, prodotto dall'Analog Device, è utilizzato per monitorare l'accelerazione in un range $\pm 200g$ che permette di rilevare valori di accelerazione che durante un urto (impatto) possono tranquillamente eccedere il valore di $10g$, la sua risoluzione $0.5 g$ lo rende non adatto per monitorare le normali condizioni dinamiche di marcia.

Per monitorare la dinamica durante le normali condizioni operative del veicolo si è scelto un accelerometro digitale, sempre della Analog Device, il modello ADXL345. Tale dispositivo, infatti ha il vantaggio di essere a basso costo ed avere consumi energetici ridotti. La sua risoluzione in un range di $\pm 2g$ è $0.39mg$. Tale risoluzione permette di misurare i due parametri dinamici più importanti dal punto di vista diagnostico, ossia l'accelerazione verticale e quella longitudinale. La prima permette di stimare le forze di contatto tra ruota e rotaia, oltre a consentire il possibile rilevamento di difetti sia sulla ruota che sulla linea percorsa. Fornisce anche la base per un corretto dimensionamento di un harvester vibrazionale che alimenti il WSN (Wireless Sensor Networks).

L'accelerazione longitudinale fornisce informazioni importanti nelle fasi di decelerazione e può essere usata per lo sviluppo di un indice diagnostico relativo allo stato operativo del sistema frenante.

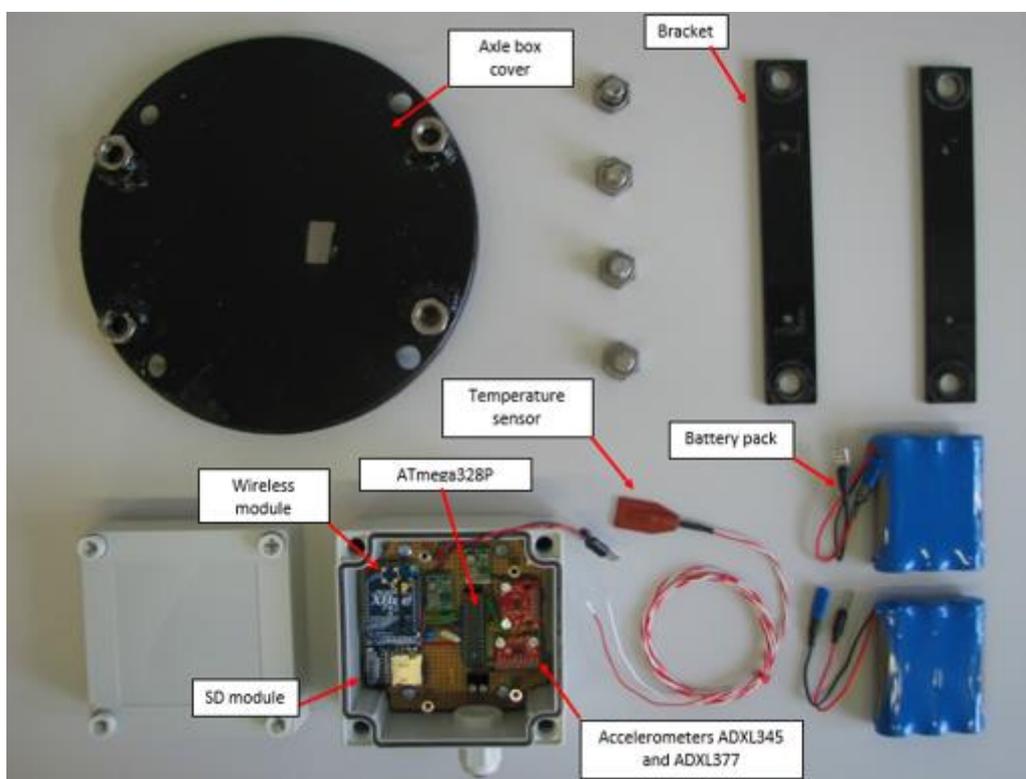


Figura 30. Hardware sistema di monitoraggio boccola

In figura 30 viene riportata, il sottosistema boccola strumentata. Anziché sostituire il tappo boccola originale con un nuovo tappo strumentato, si è modificato il tappo esistente permettendo il posizionamento di una scatola in ABS che contenesse l'elettronica al suo interno. Tutto il sistema è alimentato a batteria, seppur tale soluzione non può essere adottata in una versione finale che deve prevedere la presenza di dispositivi di energy harvesting per non incidere negativamente sulla frequenza di interventi richiesti per la sostituzione delle batterie.

L'unità centrale di monitoraggio presenta diversi componenti in comune con il sottosistema boccola, come un accelerometro ADXL 345 per monitorare la dinamica della cassa, una termo resistenza PT 1000 per monitorare la temperatura delle soles freno e una memoria SD con funzione di black box per registrare i dati campionati.

L'unità intelligente è questa volta costituita da un microcontrollore Atmega 2560 ad 8 bit operante a 16 MHz, che offre una memoria otto volte superiore rispetto all'ATmega328P. Attraverso l'utilizzo di sensori di pressione differenziali del tipo MPX5700 DP è possibile monitorare la pressione nella condotta generale dell'impianto frenante, come anche nel cilindro freno.

In questo dimostratore si sono usati tre sensori di pressione al fine di poter misurare la pressione anche della valvola pesatrice ed avere un'indicazione sul carico a cui è soggetto il carro ferroviario. Sulla sospensione di ciascun carrello è infatti installata una valvola pesatrice che fornisce un valore di pressione proporzionale al carico per regolare al meglio la pressione del cilindro freno. Quest'ultima, ossia la pressione nel cilindro freno, è quasi proporzionale alla caduta di pressione nella condotta generale. Infatti, la valvola è un attuatore che confronta la pressione nella condotta e nel serbatoio di controllo e, se c'è una caduta di pressione nella condotta, mette in comunicazione il serbatoio ausiliare con il cilindro freno, determinando la frenata. In altre parole, il distributore eroga la massima pressione in uscita al cilindro freno in conseguenza di una riduzione di pressione in condotta generale.

Infine, l'unità centrale è dotata anche di modulo GPS con antenna esterna che permette di ottenere informazioni sulla posizione e sulla velocità del treno. Per la comunicazione wireless tra unità centrale e il sottosistema boccola si è utilizzato un modulo radio Xbee Pro S1 che sfrutta lo standard IEEE 802.15.4. In letteratura [6], [16], [20], [23] sono numerosi gli esempi nei quali si usa un modulo Xbee/Zigbee o moduli radio a bassa frequenza per sistemi di monitoraggio dedicati al settore ferroviario. Infatti, tali moduli permettono facilmente lo sviluppo di un WSN (Wireless Sensor Network).

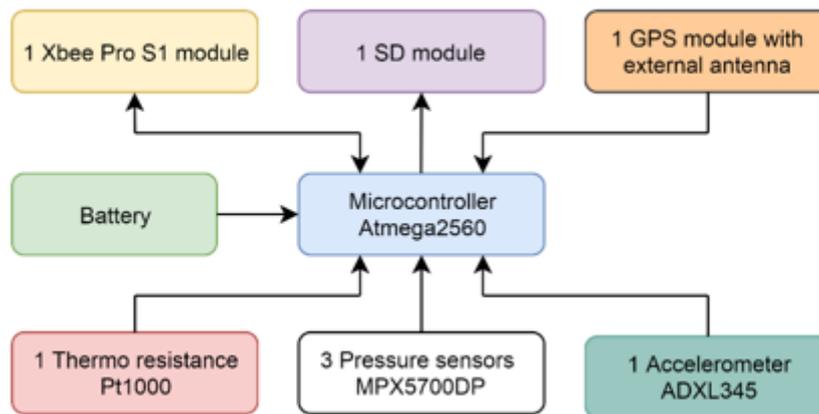


Figura 31. Schema logico Unità centrale di monitoraggio

La scelta finale per il case dell'elettronica dell'unità centrale di monitoraggio, una scatola in ABS dalle dimensioni 400x360x15 mm che viene posizionata mediante due staffe saldate sul profilato a C del carrello centrale, il più caricato, quindi soggetto a maggior stress durante la frenatura.

In figura viene mostrato il layout dei diversi sensori oltre che la disposizione delle batterie. Le batterie installate sono batterie da 12V 35 A al piombo collegate in parallelo, in maniera da assicurare un'autonomia energetica sufficiente a monitorare il veicolo per due viaggi completi (andata/ritorno) senza la necessità di sostituirle.

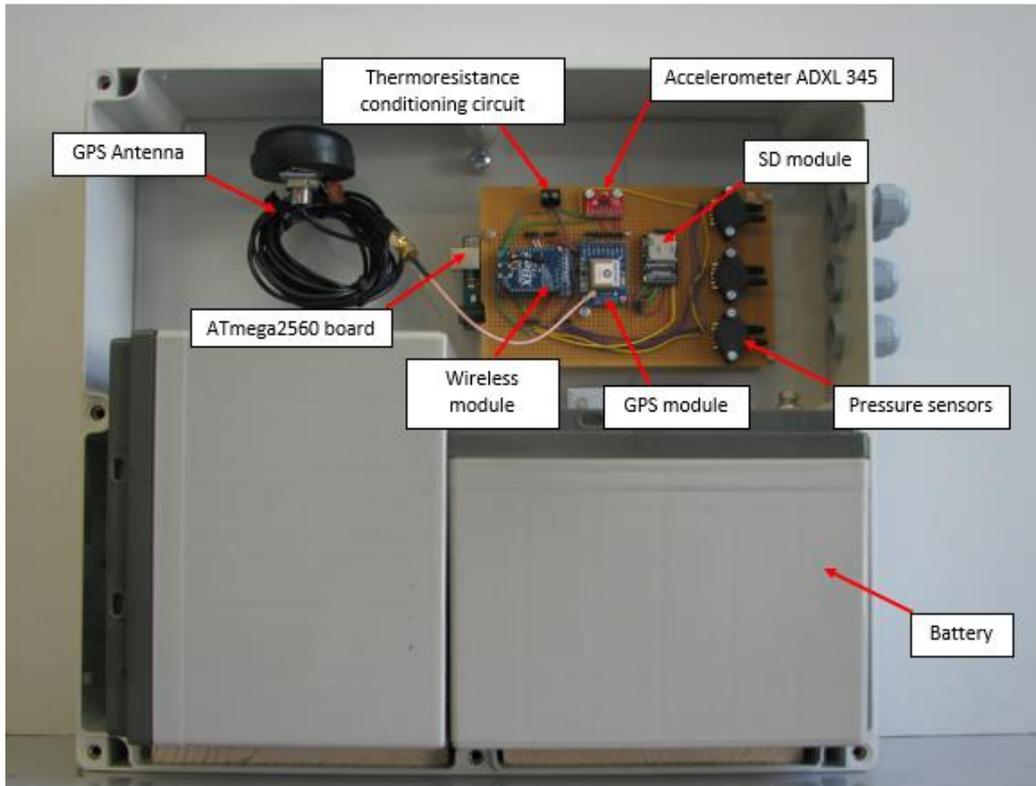


Figura 32. Hardware unità centrale di monitoraggio

Nella figura seguente viene invece riportato il layout di installazione su un carro di tipo Sggmrss, un carro dotato di sei assi.



Figura 33. Installazione del sistema di monitoraggio su carrello centrale a sei assi

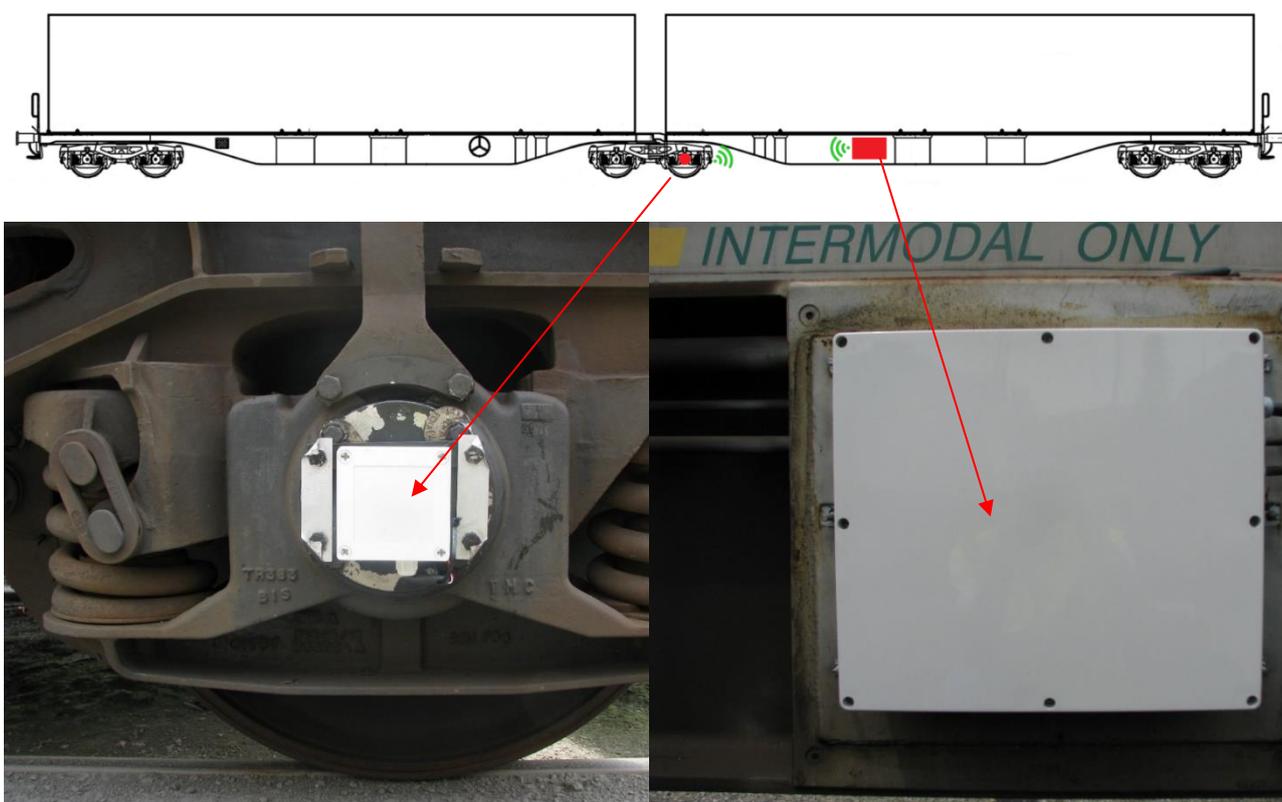


Figura 33b. Installazione del sistema di monitoraggio su carrello centrale a sei assi

4.2.1 La comunicazione wireless attraverso un modulo radio a bassa frequenza

Le esperienze maturate nel campo del monitoraggio dei veicoli ferroviari di tipo merci, appena descritte, hanno permesso di capire come per la realizzazione di un sistema efficace e a basso costo, sia la comunicazione wireless che l'autonomia energetica rappresentano due aspetti fondamentali.

In particolare, la comunicazione wireless rappresenta una sfida importante se si considera l'ambiente non particolarmente favorevole, come può essere un terminal ferroviario, a causa della presenza di diversi fattori in grado di interferire e disturbare la comunicazione tra i diversi nodi di un Wireless Sensor Network. Infatti, la grande quantità di "materiale metallico" presente in un terminal ferroviario è una delle principali ostruzioni che assorbono o riflettono le onde radio.

Stabilità la necessita di un Wireless Sensor network, il quale permette di limitare i costi e ridurre i tempi di installazione, si è esplorata la possibilità di usare in alternativa ad un modulo Xbee o ZigBee, un modulo radio operante in un range di frequenze molto più basse che permetta a parità di consumi energetici di raggiungere distanze pari a quelle di un intero convoglio.

Il protocollo di comunicazione 802.15.4 è uno standard per le comunicazioni wireless definito dall'IEEE e definisce il protocollo di trasmissione a basso livello tramite comunicazione radio, tra diversi dispositivi rientranti in una "Personal Area Network" (PAN). Lo standard 802.15.4 è stato concepito essenzialmente per soddisfare requisiti di basso consumo, ovvero:

- Velocità di trasferimento basse;
- Consumi ridotti;
- Semplice connettività.

Le frequenze definite da questo standard sono tutte frequenze ISM (Industrial, Scientific and Medical): 868-868.8 MHz, 902-928 MHz e 2.400-2.4835 GHz.

L'utilizzo di un modulo radio, se da un lato permette di limitare i consumi energetici dall'altro presenta alcuni fattori che vanno tenuti in considerazione in fase di sviluppo di un algoritmo di comunicazione. Infatti, i moduli radio possono trasmettere solo un numero limitato di bytes, e quindi in funzione della velocità di trasmissione, vi è un tempo limitato in cui il singolo nodo riesce a trasmettere il suo pacchetto di dati. Inoltre, bisogna evitare le collisioni radio tra i vari nodi durante la trasmissione, ricercando una funzione in grado di fornire la frequenza massima di campionamento, partendo dalla risoluzione delle misurazioni, dal numero dei nodi della rete e dalla velocità di campionamento di un sensore.

Nella tabella seguente vengono riassunte le principali differenze tra un modulo Xbee e un modulo radio commerciale preso ad esempio che opera alla frequenza di 915 MHz.

Tabella 6 confronto da modulo radio a 2.4 GHz e 915MHz

Performance	XBee- PRO® Digi International	Modulo radio zeta plus rf solutions
Indoor/Urban Range	Fino a 60 m	2 km
Outdoor RF line-of-sight Range	Fino a 1600m	2km
Transmit Power Output (software selectable)	63mW (18dBm)	+13dBm
RF Data Rate	250 bps	500 Kbps
Receiver Sensitivity	-100 dBm	-116dBm
Transmit Current (typical)	250mA (@3.3 V)	18 mA
Idle/Receive Current	55mA (@ 3.3 V)	10 mA
Power-down Current	< 10 µA	0.5 nA
Operating Frequency	ISM 2.4 GHz	433/868/915 MHz

Appare evidente dal confronto di due dispositivi presenti sul mercato, come i moduli radio che utilizzano frequenze operative al di sotto del GHz riescano ad assicurare la copertura di distanze più elevate, maggiore velocità di trasmissione e soprattutto minor consumi energetici, aspetto quest'ultimo che risulta fondamentale nella creazione di un WSN in un ambiente, come quello del trasporto merci caratterizzato dall'assenza di elettrificazione a bordo carro.

Inoltre, spesso i moduli radio, come quello preso ad esempio, sono dotati di differenti canali di trasmissione che operano in range di frequenza diversi, e ciò potrebbe risultare molto comodo per gestire la trasmissione dati tra due nodi vicini al fine di evitare interferenze di segnale, situazione frequente pensando alla vicinanza tra due boccole in un carrello a sei assi di tipo sggmrss.

Alcuni moduli radio sono stati usati per prove preliminari indoor in laboratorio, al fine di verificarne l'applicabilità nel campo reale. Buoni risultati sono stati ottenuti riguardo la copertura della distanza di trasmissione, facendo emergere come maggiore attenzione va posta nella sincronizzazione della trasmissione tra più nodi al fine di evitare collisioni tra segnali radio e conseguente perdita dei pacchetti dati trasmessi. Per le prove sono stati utilizzati un arduino mega 2560 connesso al modulo radio Zetaplus 915 della RF Solutions mediante una connessione UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter). Il software scritto in ambiente Arduino IDE ha permesso di settare i moduli radio attraverso l'uso di AT command e verificare la trasmissione e ricezione di un pacchetto dati tra più moduli, per avere indicazione della potenza del segnale trasmesso, a differenti distanze e con ostacoli interposti tra loro, al fine di simulare il più possibile l'ambiente di un terminal ferroviario.

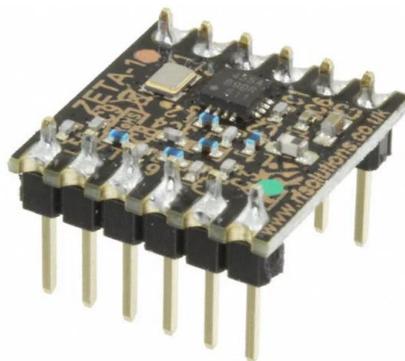


Figura 34. Modulo radio Zetaplus 915 della RF Solutions usato per prove preliminari in laboratorio

Nella scrittura del software si è indagata anche la possibilità di usare per differenti nodi un canale di trasmissione differente, cioè caratterizzato da una frequenza di trasmissione con uno step incrementale, questo per evitare la collisione tra messaggi trasmessi da nodi vicini, situazione che si

può verificare facilmente nelle reali condizioni operative. Inoltre, sempre al fine di evitare la collisione tra i pacchetti trasmessi si sono usati bytes di sincronizzazione differenti tra più nodi, per un corretto indirizzamento del messaggio trasmesso.

Queste prove hanno fatto emergere, quanto già sommariamente esposto, ossia che tale protocollo di comunicazione, presenta due aspetti che devono essere analizzati in maniera dettagliata, attraverso continue prove sul campo. Da un lato la continuità della trasmissione in presenza di ostacoli che assorbono e rifrangono le onde radio, dall'altro la necessità di una corretta sincronizzazione tra i differenti moduli.

Ulteriori prove sono state effettuate con un diverso microcontrollore e con un diverso modulo radio, entrambi con caratteristiche più performanti.

Infatti, al fine di indagare la possibilità di trasmettere un pacchetto dati a distanze maggiori si è voluto semplicemente testare un modulo di trasmissione radio Lora e, per farlo si è utilizzato un microcontrollore ARMCortex integrato sulla piattaforma STM32 Nucleo della ST Microelectronics. La tecnologia Lora è una tecnologia Wireless sviluppata per creare una LPWANs (Low-Power Wide-Area Networks) richiesta per applicazioni Machine to Machine e Internet Of Things.

Gli aspetti fondamentali di tale tecnologia sono:

- Bassi consumi (Low Power)
- Basso costo (Low Cost)
- Ampio range coperto (da 1 a 10 Km)

La parte firmware molto semplice, data la natura del test è stata sviluppata in ambiente Keil.

Più che entrare nel dettaglio di tale tecnologia, lo scopo per ciò che riguarda questo lavoro di tesi è stato valutarne l'applicabilità per migliorare la trasmissione dei parametri diagnostici in campo ferroviario. Infatti, un dispositivo che copre un range così ampio di trasmissione può essere usato per segnalare direttamente in cabina di guida un evento anomalo che si verifica nell'ultimo carrello di un convoglio (la lunghezza di un convoglio varia da 375 m in Italia e 750 m in Europa) e che presuppone l'immediato intervento del macchinista. La migliore affidabilità, velocità e le migliori prestazioni di tale tecnologia possono permettere di superare gli ostacoli che un semplice modulo radio a basso costo presenta, o comunque rappresentare una tecnologia complementare che assicura un monitoraggio sicuro e affidabile nei diversi scenari che possono presentarsi.

4.3 Il progetto S.W.A.M. Rail

La realizzazione di un dimostratore, come quello descritto nel precedente paragrafo, l'esperienza e il know-how maturati nel corso degli anni da parte del gruppo di ricerca del Politecnico hanno portato alla nascita di un nuovo gruppo di ricerca con la finalità di perfezionare e rendere disponibile sul mercato un sistema di monitoraggio e diagnostica, semplice affidabile e a basso costo.

Il progetto S.W.A.M. (acronimo per Sistema Wireless Autoalimentato di Monitoraggio per la sicurezza dei veicoli Ferroviari merci) vede la collaborazione di altre tre aziende, ognuna specializzata in un determinato campo, insieme al gruppo di ricerca del Politecnico di Torino.

Le tre aziende sono LCA Ballauri, Movimatica srl e Capetti elettronica.

LCA Ballauri è un'azienda specializzata in meccatronica, in particolare nella produzione di sensori di velocità, temperatura utilizzati in ambito ferroviario.

Movimatica Srl è una azienda che si occupa di monitoraggio remoto, diagnostica e gestione delle flotte mediante dispositivi avanzati che integrano tecnologie GPS/GPRS e sensori MEMS, sviluppando prodotti e servizi telematici di logistica per il controllo della mobilità di veicoli aziendali e macchine operatrici da lavoro. Nel corso degli ultimi anni l'azienda ha portato avanti diverse ricerche e sviluppato dispositivi per il monitoraggio autonomo delle flotte dei veicoli ferroviari di tipo merci. In particolare, i dispositivi per il settore ferroviario di tipo merci sono autoalimentati mediante uno specifico generatore, basato sulla tecnologia energy harvesting, capace di convertire in potenza elettrica l'energia vibratoria presente sul carro durante la sua movimentazione.

Capetti elettronica è un'azienda specializzata nel design e produzione di apparati elettronici con particolare attenzione a partire dal 2005 alla ricerca e sviluppo di tecnologie wireless, utilizzata per la creazione di WSNs in ambito monitoraggio civile ed industriale.

Al fine di poter testare sul campo il dispositivo, il gruppo di ricerca appena descritto collabora con un'azienda, leader nel settore del trasporto intermodale, la Ambrogio Trasporti.

La disponibilità dell'azienda a fare da End User del progetto, oltre che il loro ricchissimo bagaglio di esperienza nel settore ferroviario merci, permette il continuo miglioramento del sistema di monitoraggio, oltre a fornire un feedback sulla sua affidabilità durante i test in linea.

Il sistema in fase di realizzazione prevede il monitoraggio completo di ogni carro, mediante l'utilizzo di un sottosistema boccola per ogni asse del carrello ferroviario e di una unità centrale in grado di ricevere i dati da ciascun sottosistema ed inviarli ad un cloud per permetterne la consultazione dei dati da remoto. Per la prima volta, a differenza degli altri dimostratori analizzati, tale dispositivo permette la consultazione in tempo reale di tutti i parametri monitorati semplicemente accendo al centro servizi.

Uno dei principali punti di forza di questo sistema è sicuramente costituito dalla comunicazione wireless sia a livello di rete locale che a livello di rete globale.

La rete locale prevede la comunicazione tra le boccole slaves e una boccola master, la quale riceve i dati di monitoraggio e li trasmette alla unità centrale.

L'unità centrale riceve tutti i dati, li trasmette ad un cloud tramite rete GSM/GPRS.

Lo scopo ultimo del dispositivo è quello di migliorare la sicurezza generale di trasporto e fornire uno strumento utile per la logistica, ma anche migliorare la manutenzione dei veicoli ferroviari passando da una manutenzione prefissata ad intervalli temporali costanti ad una manutenzione basata sulle reali condizioni operative di ciascun carro.

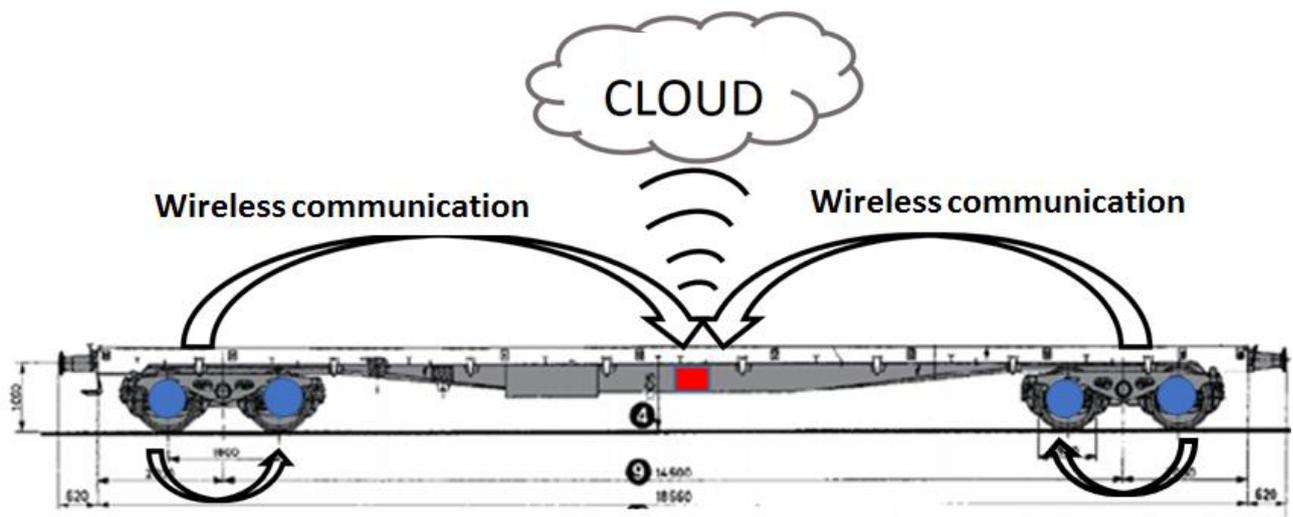


Figura 35. Layout del sistema

● Sottosistema boccola sensorizzato

■ Sottosistema di monitoraggio cassa veicolo

Nella figura 36 viene mostrato il nuovo tappo boccola, pensato per sostituire l'attuale coperchio boccola, senza bisogno di alcuna modifica, infatti sono usati anche gli stessi fori per i bulloni di serraggio. Inoltre, l'estensione assiale del coperchio non supera gli standards europei.

Questo coperchio contiene al suo interno sia la parte circuito elettronico sia un dispositivo di energy harvester che rende il sistema autonomo dal punto di vista energetico. Il retrofit di qualsiasi veicolo ferroviario risulta particolarmente semplice ed immediato.

Inoltre, la particolare forma permette un posizionamento dell'antenna, tale per cui è garantita la migliore performance del sistema di comunicazione radio. In figura non è visibile, ma a completare il tappo boccola sensorizzato vi è un coperchietto realizzato in abs che garantisce la tenuta ermetica, ma allo stesso tempo non influisce sulla rifrazione e riflessione delle onde radio.



Figura 36. Tappo boccola sensorizzato progetto S.W.A.M Rail sinistra, installazione su carro a destra

Nella foto a destra è, però visibile la protezione del coperchietto (una versione provvisoria), che ne impedisce il danneggiamento in seguito ad urti, durante la marcia del veicolo.

Dal punto di vista delle specifiche tecniche l'unità centrale di monitoraggio è costituita da:

- Modulo GPS con modem GSM/GPRS;
- Accelerometro mems 3 assi $\pm 16g$;
- Scheda SD che svolge funzione di black box;
- Microcontrollore con diversi ingressi analogici/digitali;
- Modulo Wireless per comunicare con il nodo master;
- Batteria tampone
- Auto alimentazione attraverso dispositivo di energy harvesting magnetico

L'unità di monitoraggio boccola, deve essere in grado di campionare i principali parametri operativi, essere dotata di un microcontrollore in grado di processare i dati raccolti ed inviarli alla boccola master/unità centrale sotto forma di indici.

Essere in grado di inviare una segnalazione direttamente al macchinista in caso di eventi anomali/emergenze.

Le principali specifiche che caratterizzano l'unità di monitoraggio boccola sono:

- Accelerometro mems 3 assi $\pm 16g$;
- Accelerometro mems 3 assi $\pm 250g$ (*crash detection*);
- Modulo GPS
- Sensore di temperatura
- Memoria che svolge funzione «BLACK BOX»
- Comunicazione wireless
- Auto alimentazione attraverso dispositivo di energy harvesting magnetico
- Batteria tampone
- Odometro

Sia l'unità centrale che il sottosistema boccola sono dotati di un dispositivo di energy harvester, che rende l'intero sistema autonomo dal punto di vista energetico.

Nel monitoraggio della boccola, si utilizza un dispositivo in grado di sfruttare la rotazione dell'assile, mentre nel caso dell'unità centrale la fonte di energia è il moto verticale del veicolo. I due dispositivi, pur sfruttando lo stesso principio fisico sono differenti dal punto di vista costruttivo e permettono di raggiungere il quantitativo di energia in grado non solo di alimentare il sistema, ma anche di ricaricare la batteria tampone per garantire il funzionamento dell'intero sistema anche quando il veicolo è fermo, per esempio in un terminal ferroviario.

La trasmissione dei dati in cloud permette di avere un controllo real time sia sulla posizione sia su tutti i parametri funzionali del sistema semplicemente mediante una connessione internet, accedendo al centro servizi.

4.4 L'evoluzione dell' Internet of things: un autonomous internet of things mediante l'uso di energy harvester

A-IoT un Internet delle cose autonomo dal punto di vista energetico, in cui l'oggetto monitorato fornisce anche l'energia per alimentare il network che lo monitora. Come accennato nel precedente paragrafo il dispositivo di monitoraggio all'interno del progetto di ricerca S.W. A. M. Rail è dotato di due differenti sistemi di Energy harvester che ne permettono l'autonomia dal punto di vista energetico.

Il più grande ostacolo alla digitalizzazione dell'attuale rolling-stock è sicuramente costituito dall'assenza di energia elettrica a bordo carro, condizione che spinge a considerare la possibilità di recuperare energia dall'ambiente circostante, evitando l'uso di semplici batterie, non efficienti in quanto introdurrebbero ulteriori necessari interventi di manutenzione (per la sostituzione delle stesse).

L'autoalimentazione del dispositivo unità centrale di monitoraggio è garantita da uno specifico generatore basato sulla tecnologia energy harvesting, capace di convertire in potenza elettrica l'energia vibratoria presente sul carro durante la sua movimentazione, mentre l'autoalimentazione del sottosistema boccola è garantita da un generatore assiale a magneti permanenti che viene inserito all'interno del tappo boccola sensorizzato. Il moto rotativo dell'assale è trasformato in energia elettrica, utile non solo ad alimentare il sistema, ma anche a ricaricare la batteria tampone.

In figura 37 è mostrato l'andamento della percentuale di carica della batteria in funzione del tempo. In un dispositivo alimentato semplicemente a batteria, la carica si esaurisce nel tempo, al contrario in un dispositivo dotato di energy harvester, la tensione della batteria segue il normale processo di scarica durante i periodi di sosta del veicolo, ma viene reintegrata non appena il carro ritorna in movimento.



Figura 37 Confronto percentuale di carica a parità di dati trasmessi nell'unità di tempo

Il dimensionamento dell'harvester non può prescindere dalla conoscenza del sistema posto a valle e dei suoi fabbisogni energetici, perciò più che del dimensionamento dell'harvester sarebbe più corretto parlare di progettazione del sistema autoalimentato. La definizione di un'architettura efficiente e funzionale del sistema è alla base dell'ottimale funzionamento del sistema stesso. È necessario che l'energia prodotta dall'harvester, prima di essere utilizzata, venga immagazzinata in una batteria tampone, dopo aver trasformato la corrente da alternata in continua mediante un raddrizzatore. Questa conversione, seppur penalizzante in termini energetici permette di aver una disponibilità di energia con continuità prescindendo dall'aleatorietà di generazione dell'harvester. L'energia prodotta dall'harvester ed immagazzinata nella batteria, può essere utilizzata quando, ad esempio, il carro rimane in sosta e, di conseguenza, viene meno la produzione di energia, perciò è necessario che si raggiunga una soglia minima di accumulo tale da garantire almeno la potenza istantanea richiesta dagli utilizzatori. Anche la definizione del tempo ciclo del sistema, inteso come il tempo che comprende due successive misure e trasmissione dei dati, deve essere definita in funzione dell'energia consumata nell'unità di tempo.

Come già accennato la scelta di un'architettura di sistema efficiente e funzionale, oltre che l'adozione di accorgimenti volti a ridurre i consumi energetici attraverso operazioni di power management risulta fondamentale per il corretto funzionamento del sistema.

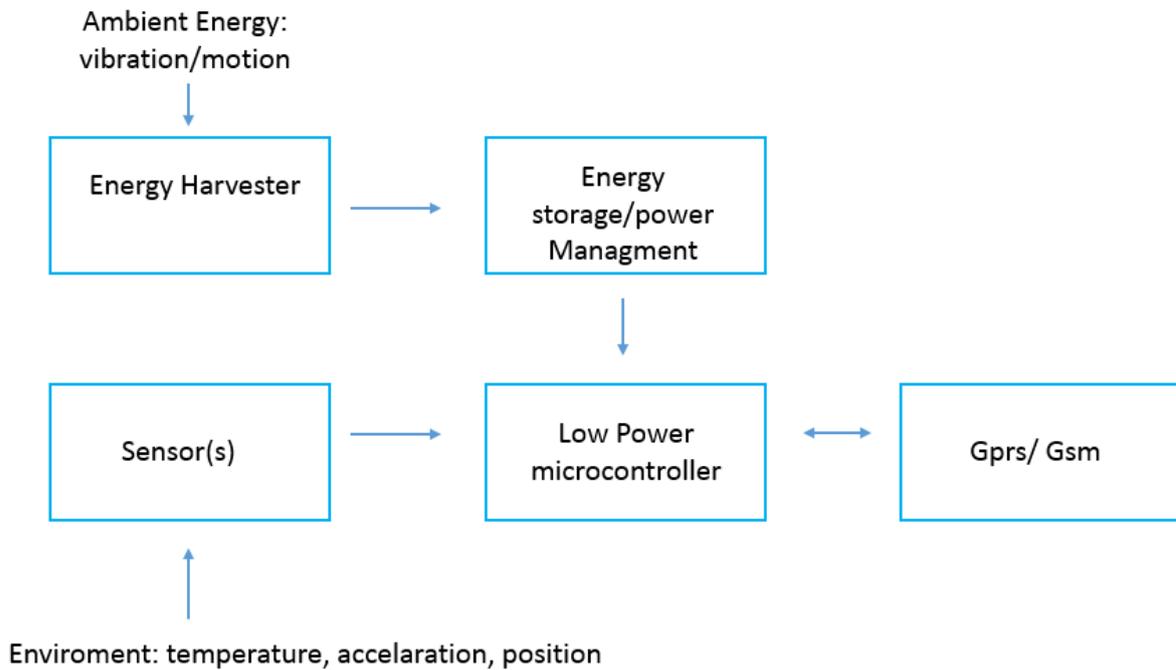


Figura 38. Architettura di autoalimentazione del dispositivo

L'unità centrale di monitoraggio è alimentata mediante un generatore a levitazione magnetica che sfrutta il moto vibratorio (accelerazione verticale in cassa):

Un generatore a levitazione magnetica prevede l'utilizzo di magneti con polarità opposte a quelle del magnete sismico come elementi che conferiscono la rigidità, anziché usare un elemento molla.

Sono possibili due configurazioni differenti:

- due magneti fissi alle estremità,
- un solo magnete fisso all'estremità inferiore.

La seconda tipologia è conveniente, in quanto permette la riduzione della rigidità del sistema e quindi a parità di massa, un miglior tuning della frequenza di risonanza.

Il comportamento dinamico del generatore può essere modellato con un sistema massa-molla-smorzatore ad un grado di libertà. Il sistema è di tipo non lineare perché la forza magnetica esercitata tra magneti e la massa sismica varia in maniera non lineare con lo spostamento. La forza magnetica rappresenta quindi la rigidità, invece il contributo smorzante è di due tipi, uno smorzamento elettrico a causa del passaggio della corrente indotta nell'avvolgimento e uno di tipo viscoso dato dai moti dell'aria nella guida (espansione, compressione e trafileamento ai bordi del magnete libero di muoversi in direzione verticale).

Nella seguente figura viene riportata schematicamente l'architettura usata per l'applicazione in esame, considerando il tipo di trasduzione scelta, i vincoli geometrici, e il requisito di sviluppare un sistema semplice ed affidabile.

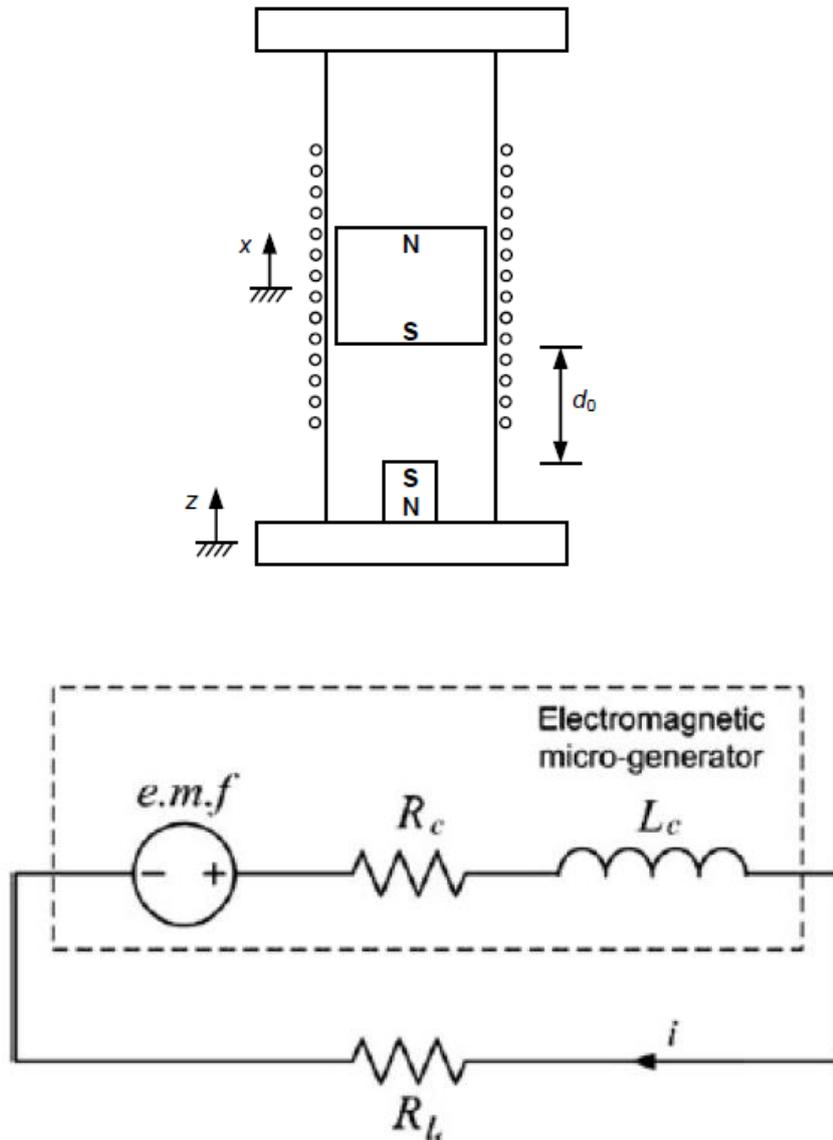


Figura 39 Modello energy harvester vibrazionale

Le prestazioni del generatore in termini di potenza elettrica sono dipendenti da numerosi fattori tra i quali:

- massa oscillante
- frequenza naturale del sistema
- smorzamento meccanico
- smorzamento elettrico

- intensità dell'accelerazione imposta al generatore dalle vibrazioni lungo il suo grado di libertà.

Il generatore viene reso solidale alla cassa del carrello. In tale posizione la forza trasmessa dal veicolo al generatore è funzione dell'accelerazione verticale del veicolo stesso (verticale perché corrisponde al grado di libertà del generatore). L'accelerazione verticale del veicolo è direttamente correlata alle irregolarità del tracciato, di conseguenza il generatore è soggetto ad un segnale di tipo random.

Per quel che riguarda l'autoalimentazione del sottosistema boccola si è pensato ad un generatore assiale a magneti permanenti. La prima fase è stata quella di esaminare la boccola e i componenti dei cuscinetti a rulli (comunemente usati) al fine di individuare un posizionamento ottimale per il rotore del generatore. Il montaggio del generatore deve essere pratico veloce e non deve in alcun modo modificare la configurazione esistente sia dei cuscinetti che del corpo boccola.

Per la progettazione della parte rotorica si sono considerati i seguenti aspetti, ritenuti fondamentali:

1. Montaggio rapido e compatibile con la configurazione attuale del corpo boccola;
2. Bassa inerzia;
3. Superficie utile per il posizionamento ottimale dei magneti permanenti;
4. Spessore minimo necessario per la concatenazione del flusso;
5. Dimensioni (rispetto degli ingombri esistenti)
6. Materiale Ferro-silicio

Al fine di rendere il montaggio veloce e senza modificare in alcun modo la configurazione attuale dei cuscinetti e del corpo boccola si è scelto di ancorare il rotore alla piastrina di bloccaggio dei bulloni di serraggio, in maniera da renderlo solidale all'asse.

Al fine di individuare sperimentalmente l'effetto dei principali parametri funzionali si è scelto di fare diverse prove realizzando un banco prova in poliossimetilene (POM).

Nei risultati ottenuti si tiene conto del fatto che tale materiale scelto sia per la parte rotorica che per la parte statorica influisce negativamente sulle prestazioni elettriche, in quanto risente maggiormente delle vibrazioni durante il moto, non permette la concatenazione del flusso nella parte rotorica, consente una minore precisione e rispetto delle tolleranze. Presenta il vantaggio di essere estremamente leggero e adatto a prove preliminari condotte in laboratorio.

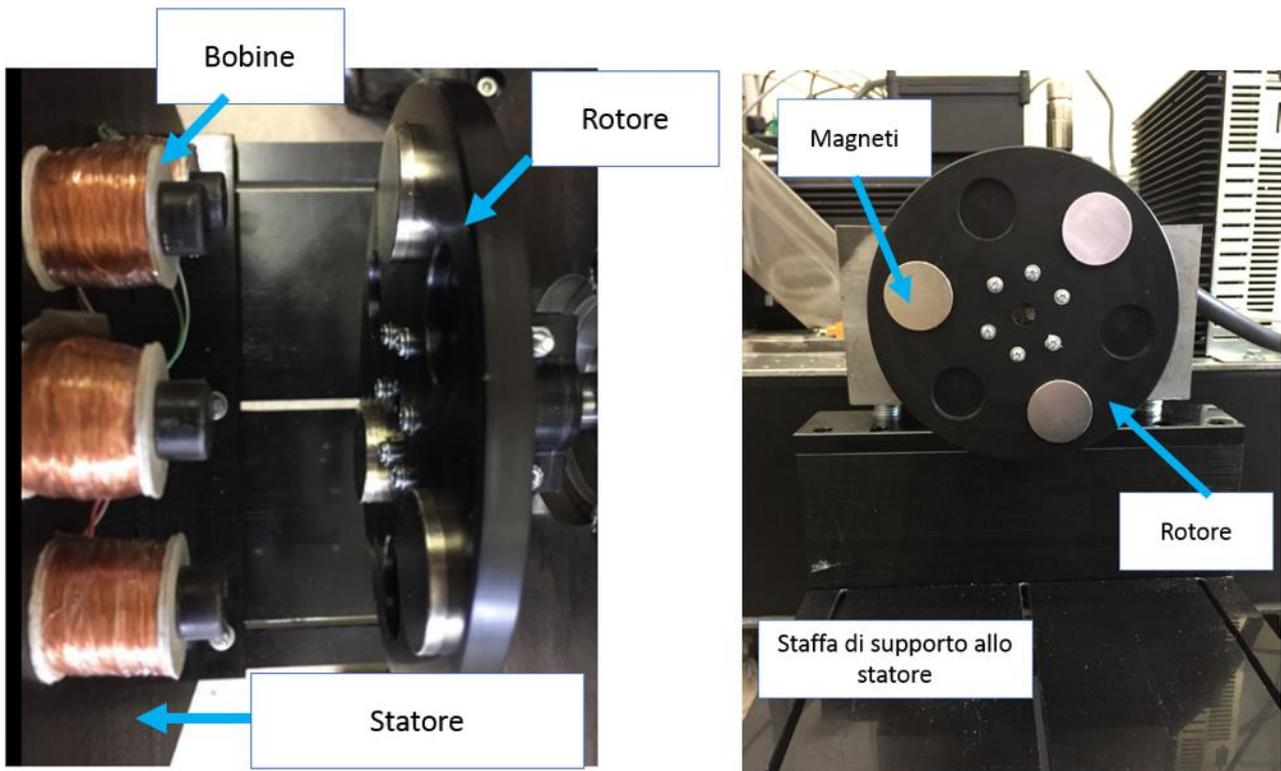


Figura 40 Banco prova generatore assiale a magneti permanenti

Le prove condotte in laboratorio hanno portato alla realizzazione di primi prototipi, con un generatore a 6 poli sincrono a magneti permanenti che riesce a produrre una potenza di alcuni watt alla velocità del treno di circa 30Km/h.

Tale potenza riesce a soddisfare le richieste del sistema posto a valle e a ricaricare la batteria tampone.

Per quel che riguarda gli ingombri, nel dimensionamento del generatore bisogna considerare i seguenti componenti:

- Rotore con magneti permanenti;
- Statore;
- Avvolgimenti;
- Coperchio parte elettronica (non strettamente funzionale ma necessario per il corretto funzionamento dell'intero sistema di monitoraggio);
- Metodo di regolazione dei giochi (traferro).

Capitolo 5

5 Funzioni diagnostiche

Viene riportato nei successivi paragrafi l'analisi di ciascuno dei parametri monitorati. L'integrazione delle conoscenze teoriche e dei dati rilevati sperimentalmente attraverso le attività di monitoraggio condotte con i diversi dimostratori descritti, deve costituire la base per l'individuazione di algoritmi di monitoraggio ed indici diagnostici che permettano da un lato la tempestiva rilevazione di un guasto incipiente con evidenti benefici dal punto di vista della sicurezza di trasporto, dall'altro migliorino il controllo preventivo dello stato di efficienza dei vari sottosistemi meccanici del veicolo (cuscinetti, ruote, impianto frenante) consentendo una pianificazione degli interventi di manutenzione mirata a migliorare le prestazioni del servizio limitando i costi e i disservizi.

Il veicolo monitorato è un vagone intermodale del tipo "Sggmrs" costituito da due vagoni con tre carrelli di tipo Y25, per un totale di sei assi.

Tabella 7 Dati carro ferroviario monitorato

Carro a 6 assi	
Massa telaio	27,68 ton
Massa carrello (completo di sale)	4,4 ton
Molla di tara (esterna) tipo 344 AR	20 mm/10 ³ daN
Molla di carico (interna) tipo 345 AR	12,3 mm/10 ³ daN

Il container viene agganciato di volta in volta sul vagone ferroviario mediante attrezzature specifiche (gru, carriponte). In fase di installazione presso il terminal intermodale della Ambrogio Trasporti a Gallarate si è avuto modo di visionare anche il sistema di carico veloce delle casse mobili mediante l'uso di una gru a portale.



Figura 41 Sistema di carico delle casse mobili presso terminal Ambrogio Trasporti Gallarate

5.1 Temperatura boccola

La temperatura è uno dei parametri fondamentali per il controllo delle condizioni operative di un carrello ferroviario. Il repentino e prolungato aumento di temperatura in boccola può essere sicuramente un indice del malfunzionamento dell'assile a livello di cuscinetto, causando un'instabilità di marcia e al limite il deragliament del carrello.

Difetti nei cuscinetti, lubrificazione insufficiente o un'ambiente ricco di corpi estranei (sporcizia, parti metalliche, detriti etc) possono portare al drammatico aumento della temperatura, a causa dell'eccessivo attrito esistente tra ruote, assili e boccole nei veicoli ferroviari.

La fonte di calore principale che porta ad un aumento di temperatura della boccola risulta, quindi, esser l'attrito che si genera nel movimento relativo tra assile e telaio del carrello, che si realizza all'interno del cuscinetto volvente. I corpi rotolanti a contatto con le piste aumentano di temperatura fino al raggiungimento dell'equilibrio termico del sistema, in cui la potenza termica generata per attrito è pari alla potenza ceduta verso l'esterno.

In [21] vengono riportati i risultati di un'indagine sulle principali cause di innalzamento della temperatura nel corpo boccola.

La figura 42 mostra come le fonti principali del surriscaldamento sono dovute alla contaminazione del lubrificante (il 38% su 97 corpi boccola esaminati), la presenza di parti metalliche nella tenuta, il danneggiamento della gabbia interna del cuscinetto.

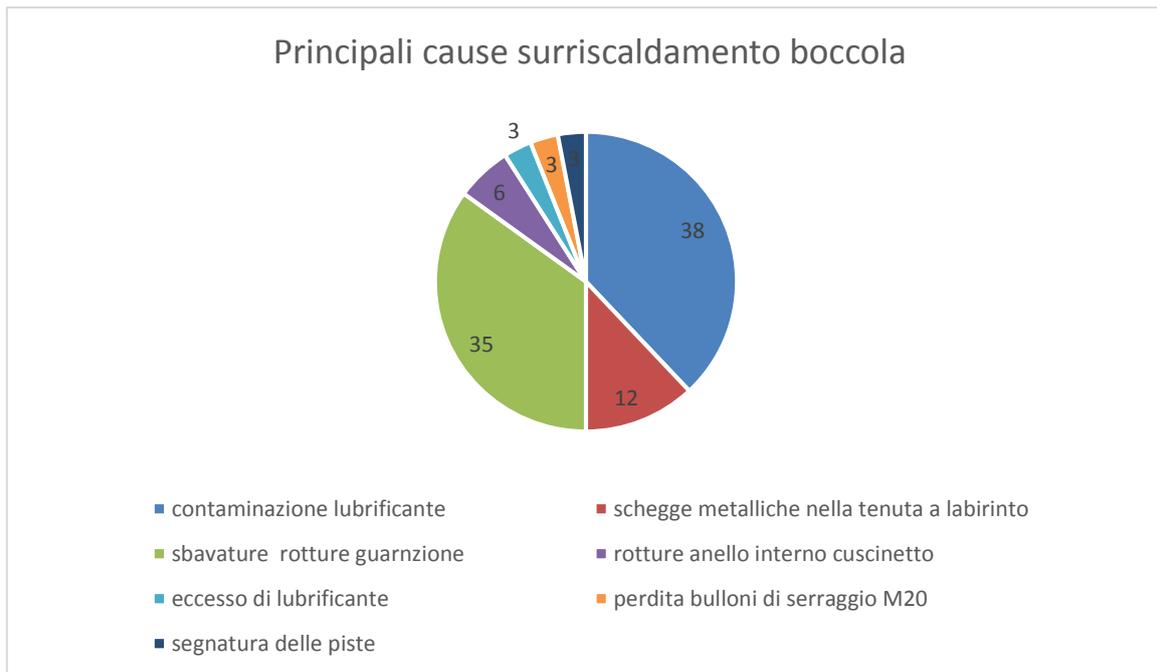


Figura 42. Principali cause surriscaldamento boccola [21]

Questo report statistico testimonia come l'attrito tra le varie parti in moto relativo è sicuramente la fonte principale di danneggiamento e di conseguenza come una corretta lubrificazione sia fondamentale per il funzionamento in condizioni ottimali. Quasi tutti i cuscinetti usati oggi all'interno delle boccole ferroviarie sono lubrificati a grasso. Questo tipo di lubrificante presenta un vantaggio dal punto di vista manutentivo, perché rimane in sede più facilmente grazie alla sua alta viscosità. In generale, un olio minerale o sintetico e un addensante costituiscono il grasso lubrificante. Il range di temperature raggiunte all'interno della boccola, è fondamentale per il corretto mantenimento delle proprietà fisiche e funzionali del lubrificante, perché un surriscaldamento eccessivo, oltre una certa temperatura limite, causa invecchiamento e ossidazione del lubrificante. I sottoprodotti dell'ossidazione hanno effetti molto negativi sull'azione lubrificante e, inoltre, con l'aumento della temperatura diminuisce la viscosità del grasso, portandolo al limite a fuoriuscire dalla sede. Una non adeguata lubrificazione o peggio l'attrito secco metallo-metallo tra piste e corpi volenti porterebbe alla segnatura delle piste o ancora al consumo rapido del fusello, con conseguente innalzamento repentino della temperatura fino al limite del deragliamento del treno, a causa del cedimento di un asse.



Figura 43. Esempio lubrificazione anello interno cuscinetto boccola

Il controllo della temperatura in boccola è sicuramente un parametro fondamentale nel monitoraggio delle condizioni operative e come visto può essere indice di diversi tipi di problematiche. Una volta stabilita l'importanza di tale parametro occorre tuttavia riuscire ad individuare quali sono i valori soglia, per cui è necessario l'attivazione di un pre-allarme o di un allarme vero e proprio che spinga il personale ad intervenire a livello manutentivo. Seppur banale, è importante sottolineare come in un sistema di monitoraggio segnalazioni che non corrispondono ad una reale situazione di criticità sono altamente controproducenti.

Da qui la necessità di un algoritmo che possa permettere di stabilire con precisione il verificarsi di un'anomalia e generare un allarme. La possibilità di poter monitorare, la temperatura su ciascuna boccola degli assili del carrello rappresenta un grande vantaggio, infatti se l'aumento di temperatura si riscontra solo su una boccola, mentre le altre hanno un valore di temperatura abbastanza prossimo, sicuramente quella determinata boccola è soggetta ad un malfunzionamento. Da qui la necessità di sottolineare ancora una volta, come la possibilità di monitorare ciascun asse di un convoglio è realizzabile solo mediante un sistema wireless, che non complica l'installazione con la presenza di numerosi cablaggi.

È bene chiarire come un aumento di temperatura, non debba essere per forza interpretato come indice di guasto, ma questo può verificarsi anche nelle normali condizioni di funzionamento, ossia a causa dell'aumento della velocità o per esempio per l'esposizione alla radiazione solare, quando il treno è fermo nel terminal. Per tale motivo, un controllo incrociato tra la temperatura, la velocità misurata su

ogni asse, e le coordinate GPS, permette di distinguere tra un aumento della temperatura dovuto al normale funzionamento da un altro causato da un danneggiamento del sistema. A conferma di quanto appena esposto si mostrano nelle seguenti figure (44 - 48) i risultati di un test in linea, nel quale vengono campionate le temperature di quattro boccole, di un carrello tipo “Sggmrss” della Ambrogio Trasporti che percorre la linea **Gallarate -Neus (Dussendorff)**. L’installazione a bordo carro è avvenuta in data 17 aprile con temperatura ambiente di 23 °C alle ore 13:00 e vengono riportati i dati campionati durante il viaggio di andata e ritorno per un totale di 1756 km percorsi.

La temperatura monitorata è quella all’interno del tappo sensorizzato (Progetto S.W.A.M.). Per come è montato il cuscinetto l’anello esterno dello stesso è a contatto con la superficie interna della boccola, assumendo che il cuscinetto tutto abbia la stessa temperatura grazie all’alta conducibilità del metallo, si avrà la stessa temperatura all’interfaccia cuscinetto/boccola. Si avrà uno scambio termico per conduzione verso la superficie esterna del tappo boccola e quindi uno scambio termico per convezione tra superficie esterna del tappo boccola e aria dell’ambiente esterno. Aumentando la velocità del treno aumenta lo scambio termico per convezione, al contrario considerando velocità più basse la temperatura sulla superficie esterna del tappo boccola sarà prossima alla superficie interna della boccola.

Al fine di meglio interpretare i dati di temperatura ottenuti si riporta il layout di installazione dei tappi boccola sensorizzati. Infatti, sensori di temperatura posti dallo stesso lato del carrello devono mostrare valori di temperatura analoghi.

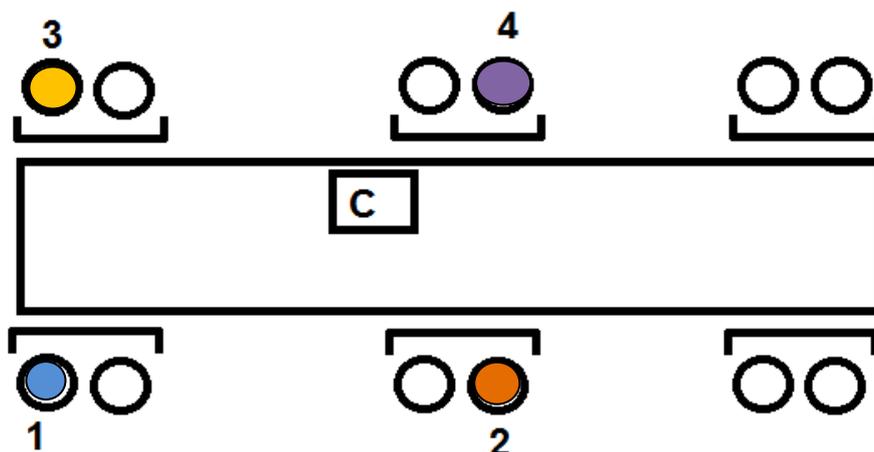


Figura 44. Layout installazione 4 tappi boccola sensorizzati e concentratore © su carro Sggmrss a sei assi

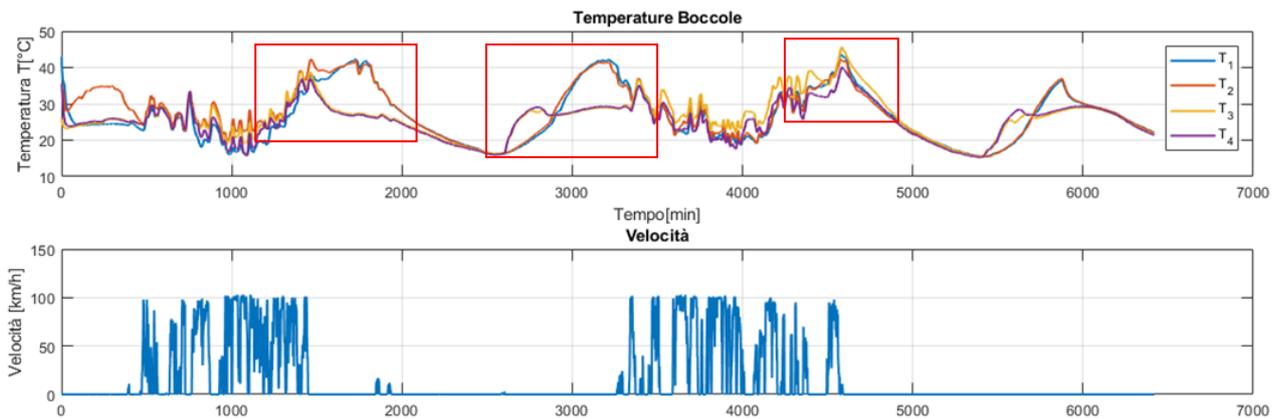


Figura 45. Andamento delle temperature intero viaggio

Nel grafico riportato in figura 45, è evidente come le 4 boccole monitorate presentano andamenti di temperatura tra di loro coerenti, infatti ad un aumento della velocità corrisponde dapprima un aumento della temperatura causato dall'attrito nel moto relativo, conseguentemente un abbassamento della stessa dovuto al calore ceduto per convezione durante la marcia. Quando il treno è fermo, viene a mancare la convezione forzata con l'aria esterna quindi il flusso di calore viene ceduto all'esterno con tempi più lunghi.

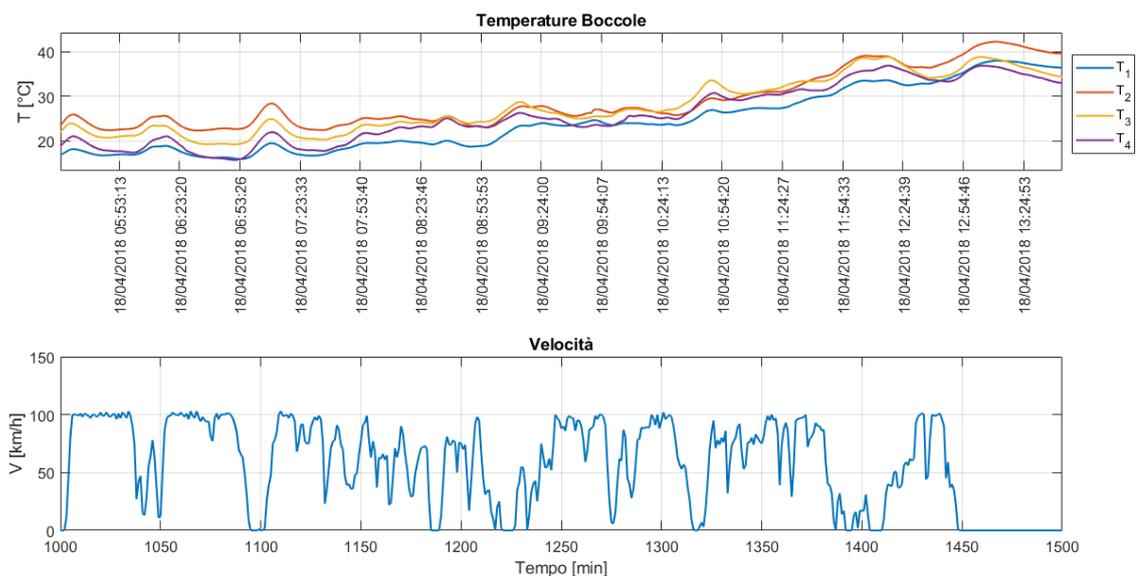


Figura 46 Stesso andamento delle temperature per le quattro boccole strumentate

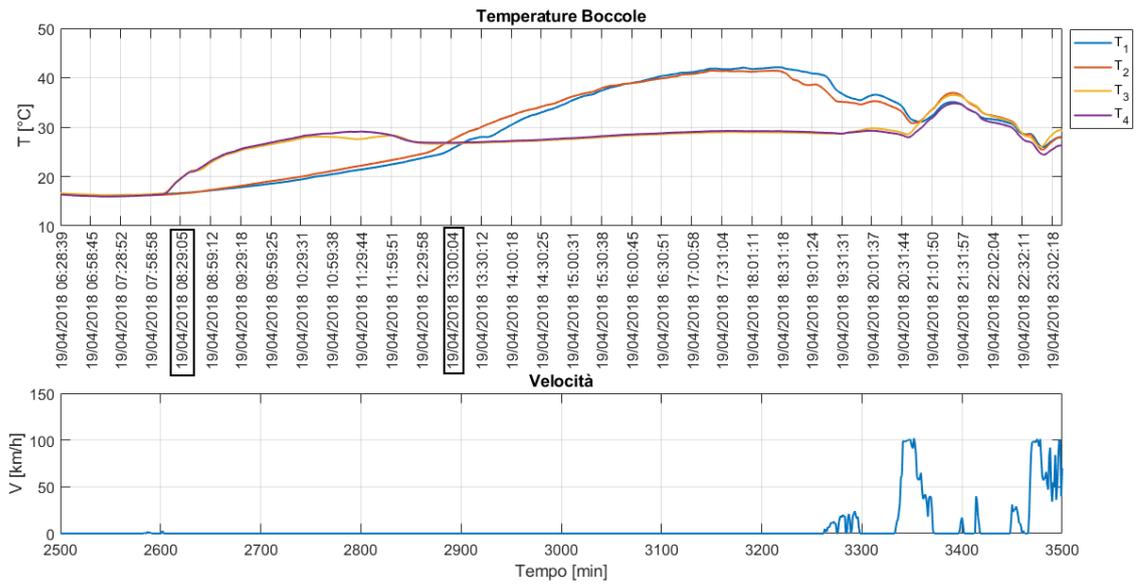


Figura 47. Differente esposizione al sole

In figura 47, incrociando i dati delle temperature con l'orario e la posizione del treno è facile riscontrare come i valori di temperatura di due boccole poste dallo stesso lato del carrello, si discostino dai valori delle altre due semplicemente a causa della diversa esposizione al sole quando il treno rimane fermo in stazione.

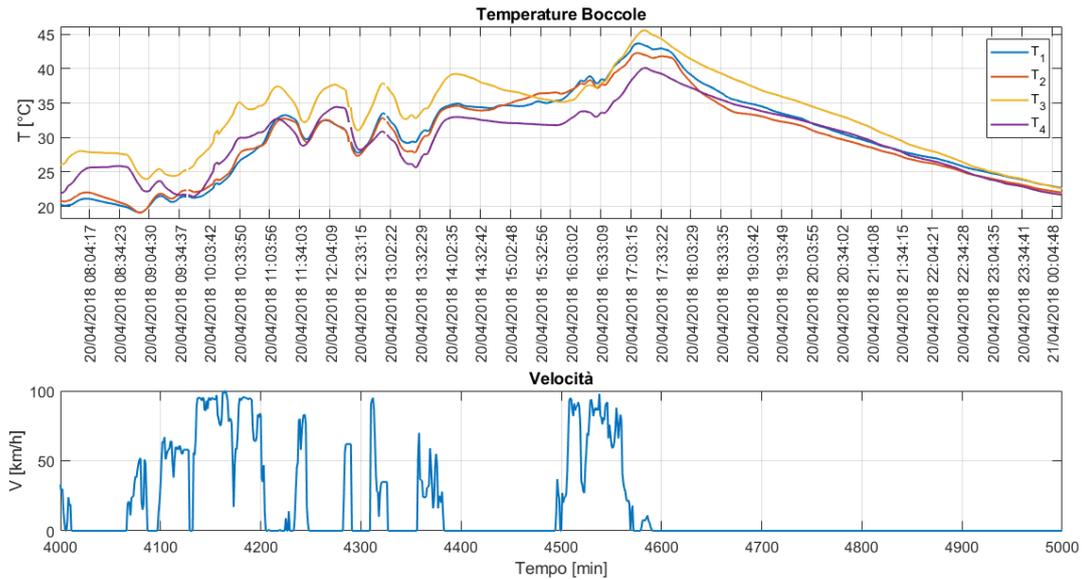


Figura 48 Temperature delle 4 boccole uniformi con treno fermo e senza esposizione solare

Allo stesso modo, in figura 48, è possibile vedere come i valori di temperature ritornino uniformi in un intervallo di tempo maggiore con treno fermo nel terminal senza esposizione ad altre fonti di calore come l'irraggiamento solare, quando tutto il calore accumulato viene ceduto all'esterno. In figura i valori di temperatura sono confrontati con la velocità globale del carro, ottenuta mediante il modulo GPS, tuttavia tale confronto in un'ottica diagnostica deve essere fatto con la velocità relativa a ciascun asse. Infatti, un aumento repentino della temperatura può anche essere causato da un ceppo freno rimasto ancorato sulla ruota. In questo caso particolare la temperatura e la velocità di rotazione dell'asse permettono di individuare il problema all'impianto frenante e conseguentemente intervenire. Per questo motivo, oltre a sensori di temperatura e accelerometri si è dotato il sistema sensorizzato in boccola anche di un odometro che permetta di misurare la velocità di rotazione di ciascuno degli assi del carro.

Allo stesso modo con cui nella norma disposizione RFI n°48 del 09/11/01 nota sotto il nome di "Normativa per l'esercizio degli impianti di rilevamento temperatura boccole (RTB) in vigore sulle linee tradizionali e sulle linee AC/AV attrezzate con ERTMS/ETCS L2, si individuano due livelli di allarme, diversi livelli di criticità per la temperatura assoluta delle boccole devono essere assunti in ambito diagnostico. Un primo livello di pre-allarme quando si supera una temperatura assoluta, per esempio di 70/80°C, e un secondo livello, un allarme vero e proprio quando la temperatura supera i 110 °C (valori presenti in letteratura)

Sotto questi valori soglia, l'algoritmo si limita a confrontare tra loro i valori di temperatura di ciascuna boccola che devono mantenersi in un delta di 15/20 °C. Un confronto può essere fatto con una temperatura di riferimento per quel sistema boccola, caratterizzato da un determinato tipo di cuscinetto, determinato tipo di carrello, velocità e temperatura ambiente.

Infatti, il monitoraggio della temperatura di ciascuna boccola, andrebbe fatto in maniera differenziale, ossia utilizzando due sensori di temperatura per ciascuna boccola che permettano di avere una temperatura di riferimento, rispetto alla quale rapportare ciascuna temperatura misurata. Questo permetterebbe anche di avere un feedback di fondamentale importanza in caso di danneggiamento di uno dei due sensori di temperatura. Infatti, per esempio monitorando la temperatura interna della boccola e la temperatura sulla superficie interna del tappo, si dovrebbero riscontrare uguali quando il treno è fermo e valori molto vicini con differenza di qualche grado con treno in marcia.

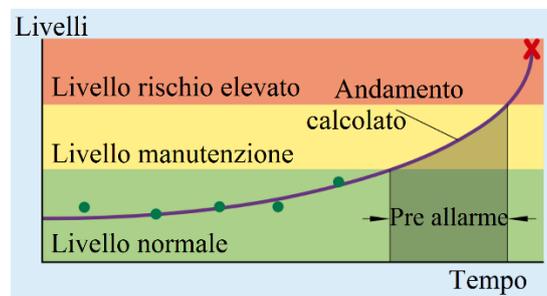


Figura 49. Livelli soglia per l'andamento di temperatura

L'esperienza maturata nel corso di diverse installazioni del dispositivo di monitoraggio ha messo in evidenza come, per ottenere dati affidabili ed evitare di trasmettere una mole di dati senza alcun significato, una fase di filtraggio preliminare dei dati è necessario. Tuttavia, dovendo limitare al minimo i tempi ed i costi energetici, l'operazione di filtraggio deve essere a basso costo computazionale.

Innanzitutto, si deve evitare di registrare valori che non hanno significato fisico ma che derivano da errori di comunicazione del pacchetto dati, o dati di default che il sensore registra quando non alimentato con tensione corretta (situazione che si può verificare in fase di scarica della batteria), dopodiché usare tecniche di filtraggio dei segnali semplici ed immediate.

Ad esempio, una media mobile, tecnica con la quale si sostituisce il valore del campione con la media dei campioni vicini, potrebbe essere utilizzata. Si dice a media mobile perché il numero di elementi considerati rimane lo stesso ma l'intervallo temporale avanza.

Altra attività fondamentale è la corretta fase di calibrazione dei sensori, prima della loro installazione.

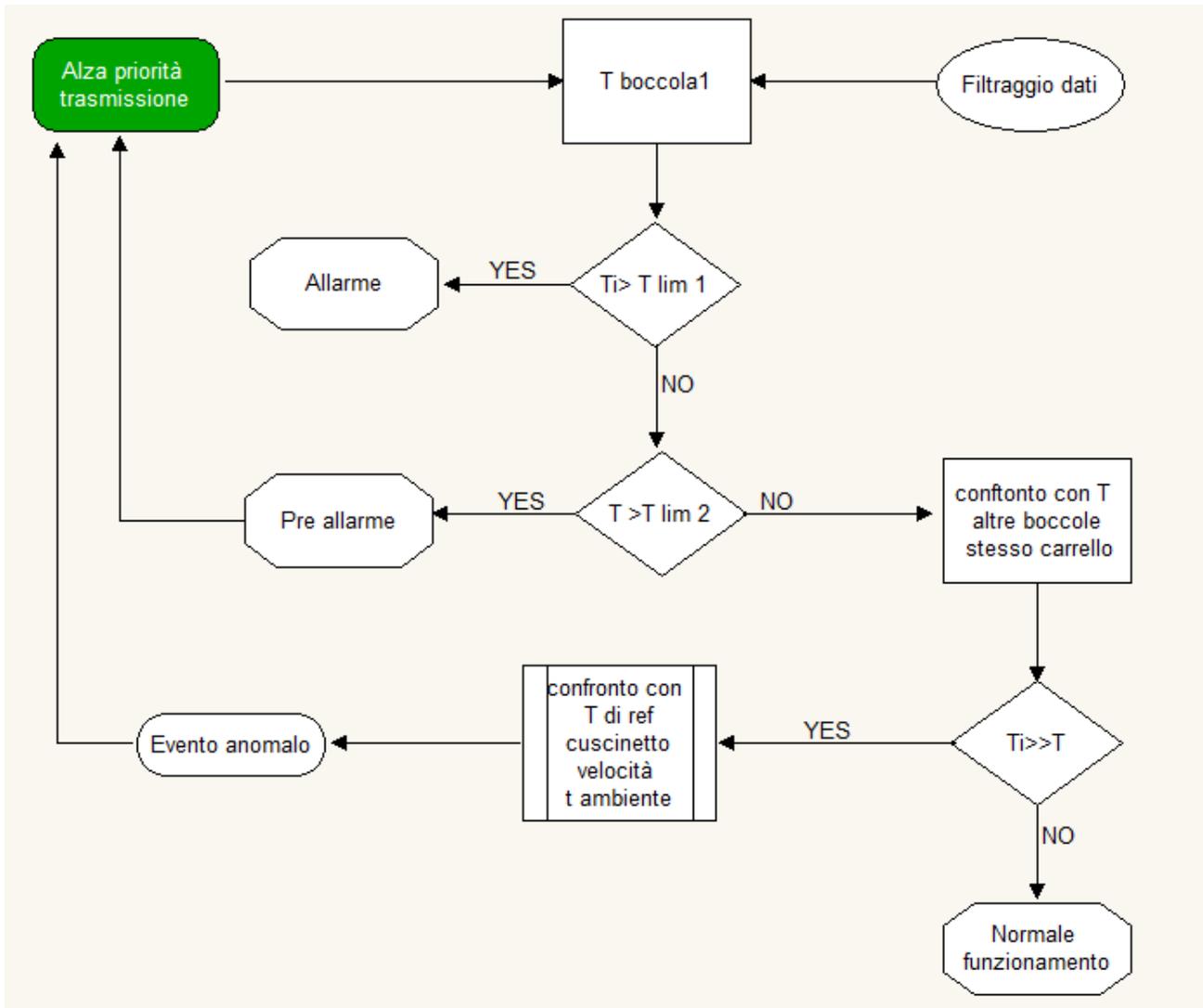


Figura 50. Esempio algoritmo monitoraggio temperatura boccola

In figura 50 viene mostrato il diagramma di flusso di un possibile algoritmo per monitorare la temperatura in boccola indice del corretto stato operativo del cuscinetto.

Dopo una fase di filtraggio dati la temperatura viene confrontata con due temperature limite, stabilite a priori. Il superamento di una delle due temperature limite, la più alta deve immediatamente generare un allarme. Una seconda temperatura limite, serve invece a segnalare un potenziale pericolo e per questo si alza la priorità di trasmissione di quel dato alla boccola master, per permettere un monitoraggio efficace ed evitando di trasmettere dati non utili alla diagnosi dello stato di salute dei vari componenti.

Se il confronto con le temperature limite, non segnala situazioni da osservare con maggiore frequenza, si passa ad un confronto della temperatura di una boccola, con la temperatura media delle altre boccole dello stesso carrello. Nel caso in cui la temperatura di una boccola sia di molto maggiore (20°C) si passa al confronto della stessa con una temperatura di riferimento, una stima della temperatura conoscendo il tipo di cuscinetto, la velocità del treno e la temperatura ambiente (valutando in caso il carro sia fermo se esposto a fonti di calore come la radiazione solare).

Un valore di temperatura prossimo per tutte le boccole di uno stesso carrello, indica un corretto funzionamento del sistema boccola/cuscinetto.

A testimonianza di quanto la fase di filtraggio dei dati sia fondamentale, si riporta nella figura seguente, una registrazione di dati privi di alcun significato fisico, causati dalla fase di scarica della batteria.

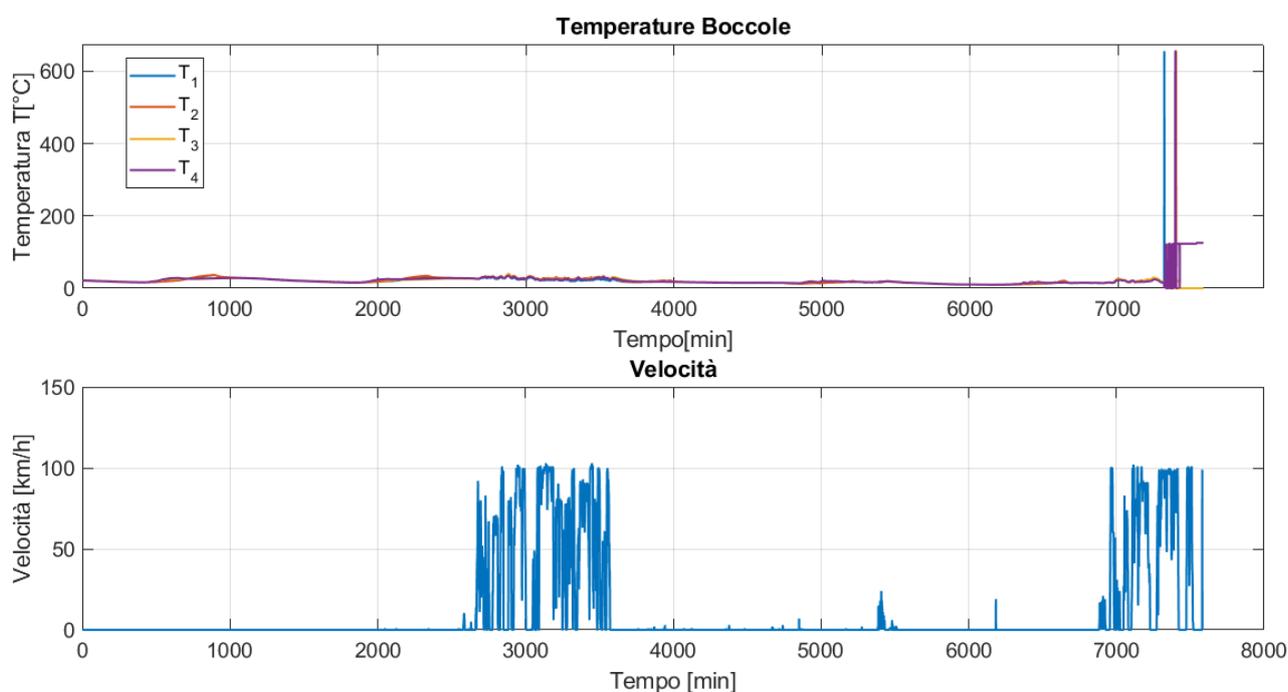


Figura 51. Dati rilevati privi di significato fisico a causa della batteria in fase di scarica

5.2 Temperatura soole, impianto freni.

Come già anticipato in uno dei primi paragrafi, generalmente nei treni merci si usano freni ad attrito con ceppi in ghisa, in materiale composito o sinterizzato, che vengono premuti sulla superficie di rotolamento delle ruote in acciaio. Negli ultimi anni sono state realizzate diversi tipi di soole in

materiale composito, destinate a sostituire i ceppi tradizionali in ghisa, principale causa della rugosità delle ruote e quindi del rumore.

Le nuove soles consentono di ridurre il rumore percepito fino al 50%. L'efficacia delle cosiddette "soles K" è stata dimostrata sui carri nuovi, ma i costi per l'adeguamento dei carri esistenti sono notevoli. Per questo motivo sono attualmente in fase di sviluppo soles di tipo diverso, chiamate "soles LL", progettate specificamente per l'adeguamento dei carri esistenti. Le soles "K" sono costituite da materiali compositi organici e presentano proprietà frenanti diverse rispetto ai ceppi tradizionali, per questo l'adeguamento richiede delle modifiche al sistema frenante che comportano costi aggiuntivi fino a diecimila euro per carro. Tali soles riducono il rumore in maniera molto efficace (fino a 10 dB, pari al 50%) e in generale sembrano non incidere sui costi dei nuovi veicoli.

Le soles LL richiedono solo modifiche minime del sistema frenante e sono progettate per avere caratteristiche di frenata abbastanza simili a quelle in ghisa. Sono realizzate in materiali compositi organici o in metallo agglomerato per sinterizzazione e consentono una riduzione del rumore della stessa portata delle soles K.

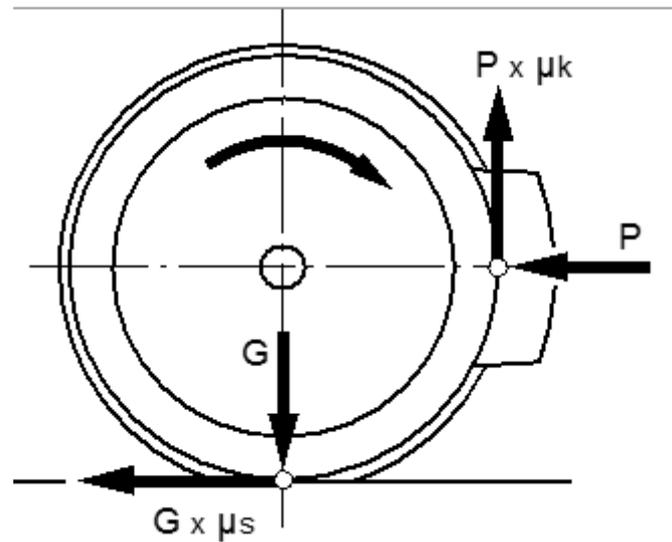
In assenza di specifiche tecniche pertinenti a livello europeo, i freni a ceppi sono omologati dall'UIC, l' Union Internationale des Chemins de Fer . L'UIC sottopone i freni a ceppi a prove per verificare la corrispondenza con le proprie specifiche relative a efficienza della frenatura, sicurezza e problematiche relative all'uso (ad esempio rigide condizioni atmosferiche invernali). L'omologazione provvisoria viene concessa quando le prove tecniche sono completate con successo; successivamente possono essere avviate prove in condizioni operative su scala più ampia e, se queste vengono superate, segue l'omologazione definitiva.

Grazie alla tecnologia disponibile attualmente, l'adeguamento comporterebbe costi d'investimento nell'ordine di 200-700 milioni di euro (soles LL) o 1,0-1,8 miliardi di euro (soles K) e spese di manutenzione aggiuntive per 200-400 milioni di euro (dati aggregati fino al 2025, per entrambe le tecnologie).

L'attrito prodotto dalla pressione del ceppo sul cerchione genera una forza applicata tangenzialmente alla circonferenza della ruota che agisce in senso contrario alla rotazione della ruota. Contemporaneamente fra la rotaia e la ruota viene generata una uguale forza contraria (forza di attrito statico), la quale agisce in senso contrario al movimento del veicolo.

Per evitare che le ruote slittino sulla rotaia e si producano sfaccettature (si questo problema se ne parlerà nel paragrafo successivo), è necessario che la forza d'attrito del ceppo sulla ruota non superi mai la forza d'aderenza della ruota sulla rotaia. Questa particolarità fisica comporta che, a causa dell'attrito inferiore rispetto ai veicoli stradali, si hanno distanze di frenatura sensibilmente più lunghi.

In questo caso, limitatori di pressione massima impediscono che si crei una pressione eccessiva nel cilindro del freno e quindi lo slittamento delle ruote.



Forza esercitata dal cilindro freno

μ_k coefficiente d'attrito ceppo ruota

μ_s coefficiente d'aderenza ruota rotaia.

Figura 52 Schema forze che si generano durante la frenata

Durante la frenata, l'energia cinetica del vagone in corsa, si trasforma in calore che si distribuisce tra il ceppo e la ruota. Un sistema con freni ad attrito con ceppi seppur molto semplice dal punto di vista meccanico e a basso costo ha delle grandi limitazioni. Una di queste è sicuramente l'aumento della temperatura a livello ruota/assale, che sottopone la ruota ad un alto livello di sollecitazione circonferenziale di compressione, subito seguito da una sollecitazione circonferenziale di trazione, durante il raffreddamento. Queste sollecitazioni possono chiaramente portare alla creazione e crescita di cricche. Un altro grande problema di un tale sistema frenante è sicuramente l'elevato livello di rumore. Infatti, il livello di rumore è influenzato dalla rugosità della ruota che dipende anche dalle caratteristiche del materiale del freno a ceppo.

Il rumore prodotto durante la marcia è causato in linea di massima dalla rugosità di ruote e rotaie. Se queste rimangono lisce, la rumorosità può essere ridotta in misura significativa. E per fare sì che le ruote rimangono lisce, è poi necessario sostituire i freni a ceppo in ghisa con soles in materiale composito.

Si riportano 4 configurazioni di suole. La lunghezza di un ceppo, quando montato singolarmente è 320 mm, mentre si riduce a 250 mm quando si montano due ceppi (tandem). Una configurazione con due blocchi o con 4 ceppi per ruota permette una migliore dissipazione del calore rispetto ad una suola a blocco unico. Questo vuol dire che la suola potendo dissipare meglio il calore sarà soggetta a minori sollecitazioni termiche che possono portare alla formazioni di cricche. Il calore che si redistribuisce tra ruota e ceppo è fortemente influenzato dalla configurazione delle suole, perché chiaramente cambia l'area di contatto, la capacità termica totale e anche le condizioni di raffreddamento.

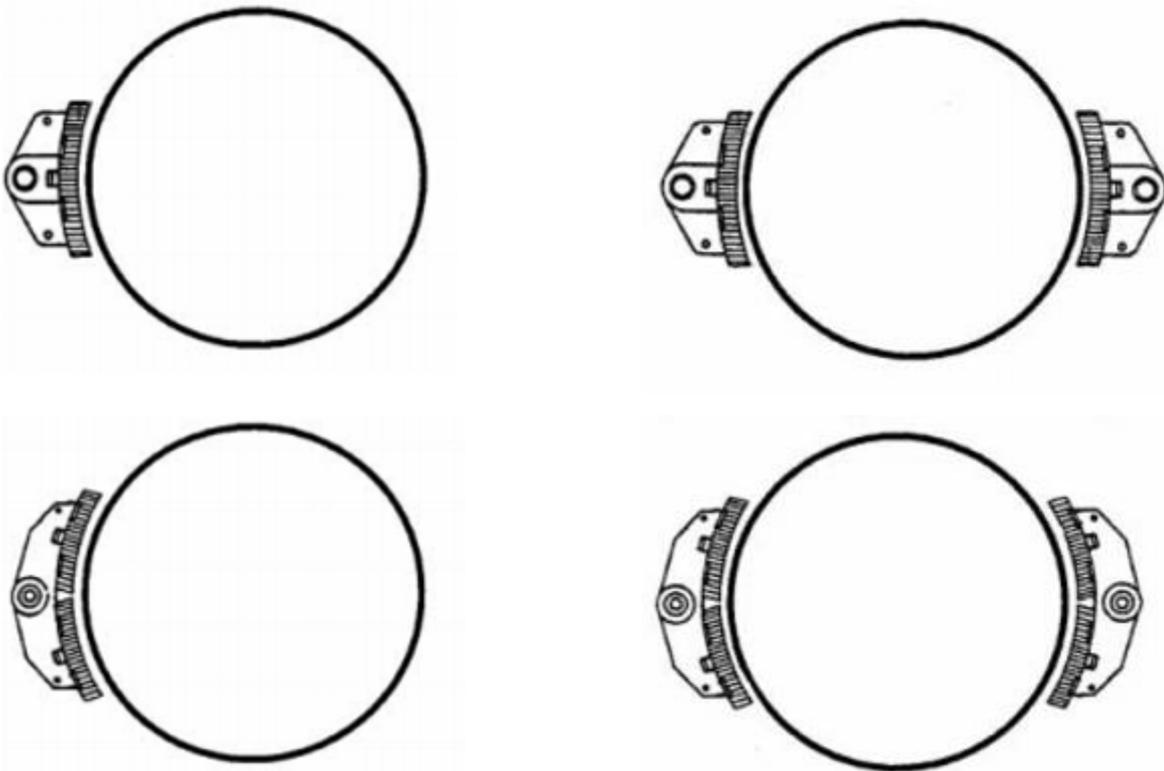


Figura 53. Possibili configurazioni delle suole freno [8]

Il calore totale dissipato nei freni a ceppo, può essere ricavato per esempio, conoscendo la velocità del treno e la forza d' attrito tangenziale applicata alla ruota dalla suola.

In [8] si fa riferimento alla seguente formula per l'indice di ripartizione del calore tra ruota e suola.

$$\beta = \left\{ 1 + \left(\frac{\kappa_w}{\kappa_b} \right)^{1/2} \frac{\lambda_b A_b}{\lambda_w A_w} \right\}^{-1} \quad (1)$$

Con la formula precedente si indica il fattore di distribuzione del calore e A_b e A_w sono le aree spazzate dal contatto. La parte di calore che raggiunge la suola freno è $(1-\beta)$

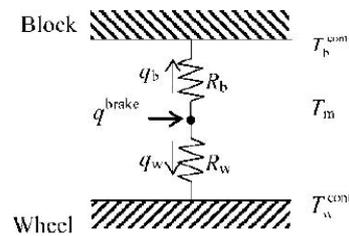


Figura 54. Ripartizione del calore tra ceppo e ruota

Il secondo tipo di sensore viene utilizzato per rilevare, in ambito diagnostico se, per esempio, un ceppo freno rimane frenato durante il normale funzionamento. I sensori di temperatura sono installati nei pressi della pinza freno la loro temperatura è rilevata in modo iterativo rispetto alla temperatura ambiente.

In [22] viene riportato un modello agli elementi finiti che simula come la temperatura di ceppi in ghisa cambi durante le operazioni di frenatura, e il modello simulato viene confrontato con dati sperimentali ottenuti applicando un sensore di temperatura del tipo Pt 1000 ad una suola in ghisa, visibile in figura 55.



Figura 55 Installazione di una termoresistenza su una suola in ghisa

Al fine di avere un'indicazione sul corretto funzionamento del sistema frenante, la temperatura della suola può essere confrontata dapprima con la temperatura ambiente (visto il punto di installazione del sensore lontano dall'interfaccia suola/ ruota) quando si è lontani da eventi di frenatura, nel caso si abbia una temperatura troppo alta si ha un'indicazione del malfunzionamento del sistema frenante, al contrario se si ha una temperatura troppo bassa in concomitanza con eventi di frenatura significa che c'è un problema sul sistema frenante, cioè che il ceppo non sta premendo contro il cerchione della ruota.

Un ulteriore confronto con i valori di pressione della condotta generale e della pressione del cilindro freno posso specificare più nel dettaglio se il guasto riguarda la parte meccanica (cinematismi timoneria/bloccaggio ruota) oppure la parte pneumatica.

Gli eventi di frenatura sono facilmente rilevabili incrociando i dati di temperatura della suola freno con la riduzione della velocità, o anche il profilo altimetrico ricavato mediante le coordinate Gps.

Al fine di ricavare un indice sul livello di salute dell'impianto frenante, un algoritmo in cui la temperatura di una suola viene confrontata con la temperatura ambiente e con la temperatura delle altre suole facenti parti dello stesso carrello può essere usato.

Il confronto tra le temperature appena menzionate deve avvenire distinguendo tra eventi di normale marcia o sosta del carrello ed eventi durante una frenatura o appena successivi ad essa. Infatti, se durante la marcia, una suola continua ad avere un livello alto di temperatura, anche a distanza di tempo da un evento di frenatura, questo è sicuramente un indice di un guasto nel sistema, perché può significare che un ceppo freno è rimasto bloccato sul cerchione.

Allo stesso modo se durante una frenatura la temperatura della suola rimane bassa, un potenziale guasto nella parte pneumatica del sistema frenante potrebbe essersi verificato.

Si potrebbe anche fornire una stima della temperatura della suola freno partendo da alcune indicazioni come la velocità del veicolo la temperatura ambiente, l'altimetria, ma questa procedura non è in accordo con un sistema di monitoraggio a basso consumo, infatti il costo computazionale sarebbe molto più alto.

Per cui si può semplicemente confrontare il valore di temperatura campionato con un valore di temperatura di riferimento, scelto a seconda della configurazione delle suole, della velocità del treno e del profilo altimetrico percorso, in quanto una differente altimetria implica un maggior o minor utilizzo dell'impianto frenante.

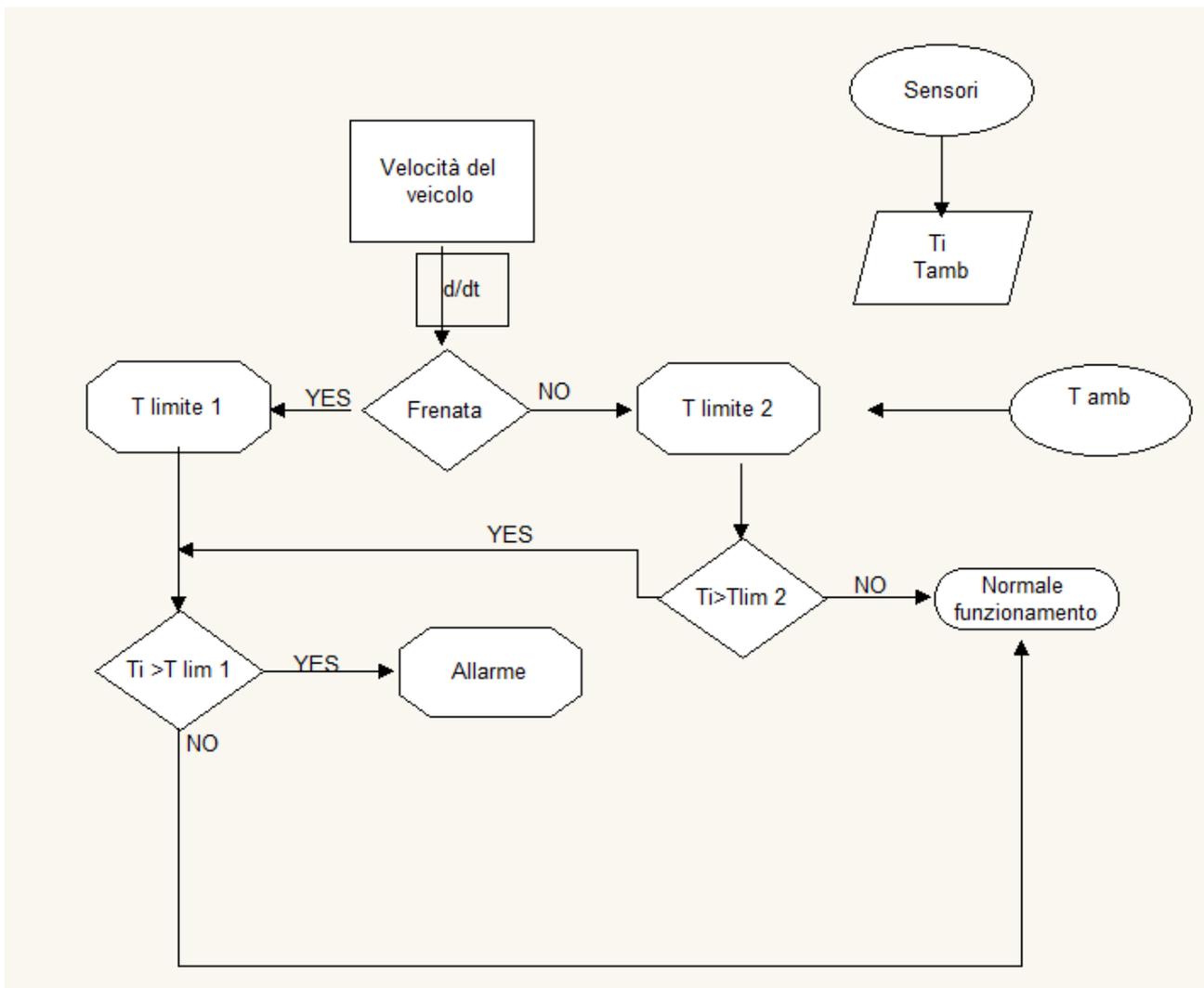


Figura 56. Schema logico di un algoritmo di monitoraggio per il sistema frenante

Nella figura 56 viene riportato un possibile algoritmo per il monitoraggio della temperatura delle soole freno. Il primo step è quello di individuare se il carrello si trova in un evento di frenatura o meno. Infatti, nel caso in cui si stia verificando un evento di frenatura la temperatura campionata e filtrata va confrontata con una temperatura limite più alta.

Le due temperature limite con le quali confrontare la temperatura rilevata vanno scelte a priori, basandosi sulla configurazione delle soole, altimetria della linea percorsa, velocità.

È importante confrontare la temperatura di una suola con quella di un'altra suola agente sullo stesso asse per avere un riscontro sul funzionamento del treno, infatti se da un lato una temperatura troppo alta anche successivamente alla frenatura può indicare un ceppo freno rimasto bloccato sulla ruota, dall'altro lato una temperatura troppo bassa può indicare un ceppo che non si è attivato, quindi un problema pneumatico nella pressione del cilindro freno.

Si riportano i risultati di un'installazione eseguita, sempre su un carro di tipo Sgms della Ambrogio trasporti, con il dimostratore ibrido cablato-wireless. La linea monitorata questa volta è la linea **Candiolo(IT)-Moguerre (FR)** 1400 Km, si sceglie di riportare i dati campionati lungo questa tratta perché essa è caratterizzata dall'attraversamento del tunnel ferroviario del Frejus che corre sotto il Monte Frejus fra le città di Modane in Francia e Bardonecchia in Italia. Tale percorso mette a dura prova l'impianto frenante a causa del profilo altimetrico con pendenze che superano il 30%. Per dare un'idea la galleria ferroviaria del Gottardo raggiunge pendenze del 26 %, il traforo del Brennero raggiunge solo il 25 %. Il profilo altimetrico della tratta è una delle principali cause di alta usura delle suole freno. Come visibile nella figura sottostante vi è anche un ampio tratto pianeggiante.

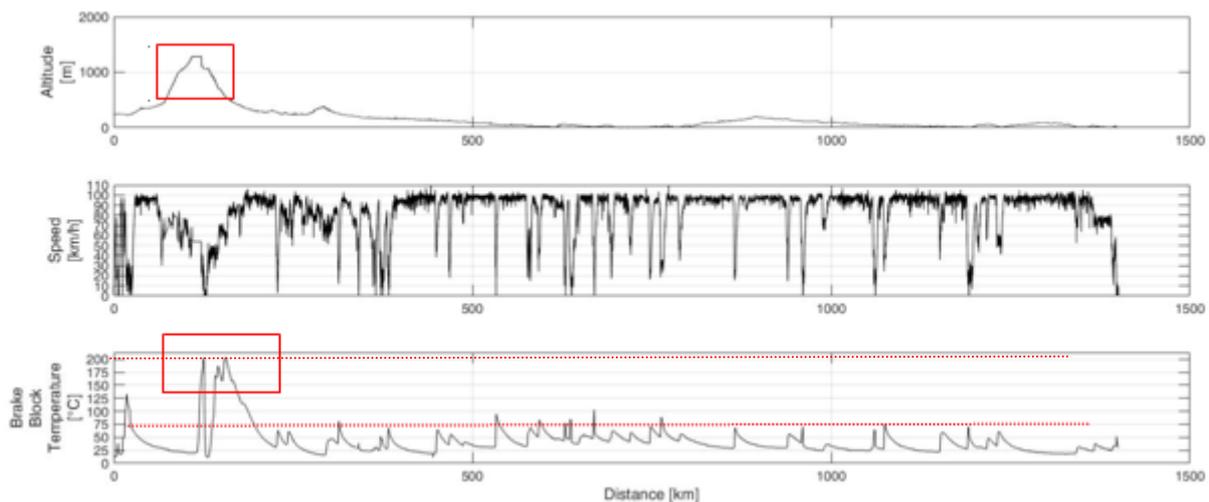


Figura 57. Altimetria, Velocità e Temperatura della suola freno campionate sulla tratta Candiolo-Moguerre

Dall'analisi dei risultati, ottenuti durante i test in linea si evince chiaramente come sia facile individuare le temperature limite di riferimento. Infatti, in condizioni di marcia pianeggianti, quindi senza necessità di ricorrere frequentemente all'uso del sistema frenante, la temperatura del ceppo freno non supera mai i 100°C, anzi piuttosto ha un andamento costante intorno ai 70°C.

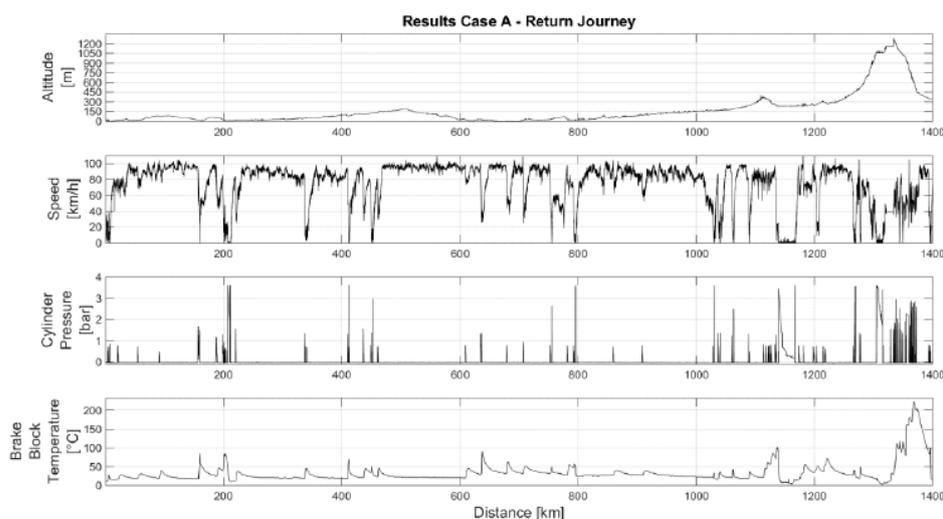


Figura 58. Altimetria, Velocità e Temperatura della suola freno campionate sulla tratta Moguerre-Candiolo

È utile sottolineare che nei test in linea riportati sono stati usati sensori di temperatura cablati fissati sulla suola freno. Il cablaggio come già detto non è la soluzione ideale, perché complica di molto l'installazione, dotando di sensori tutte le suole freno di un convoglio. Inoltre, il cavo, data la particolare posizione del sensore si può facilmente danneggiare non permettendo di fatto di continuare il monitoraggio.

La soluzione più adatta sarebbe quella di utilizzare sensori wireless, ma questo sposterebbe il problema sulla fonte di alimentazione di tali sensori.

5.3 Accelerazione verticale in boccola

L'accelerazione verticale in boccola può fornire diverse indicazioni riguardo la corretta dinamica del veicolo, la presenza di difetti o irregolarità sia sulla linea che sulla ruota. Diversi sono gli studi in letteratura che, per individuare problemi di spiattellamento o poligonalizzazione della ruota usano il segnale accelerometrico (accelerazione verticale in boccola).

Le ruote sono soggette a meccanismi di danneggiamento che ne modificano la loro geometria nominale. Questi difetti di forma inducono elevati livelli di stress sia sul veicolo che sul tracciato ferroviario, che tra le altre cose, aumentano il livello di rumore emesso. Difetti localizzati sulla superficie, noti come sfaccettature delle ruote, sono principalmente causati dal bloccaggio della ruota durante la frenatura, dovuto ad una non sufficiente adesione tra ruota e rotaia. Non essendoci nei

veicoli ferroviari di tipo merci, alcun dispositivo di antipattinaggio, l'unico modo per prevenire il bloccaggio della ruota durante la frenata è limitare la forza del cilindro freno, in relazione al peso a cui è soggetto il carrello, del quale se ne può avere un'indicazione mediante la valvola pesatrice. Tuttavia, questo metodo non può prevenire il bloccaggio delle ruote in tutte le condizioni per cui le ruote dei veicoli ferroviari di tipo merci sono soggette a fenomeni di usura localizzata, la "sfaccettatura" della ruota.

Un difetto localizzato, appena formato, è tipicamente modellato come con una corda di circonferenza di lunghezza L e perdita di materiale con profondità d come mostrato in figura:

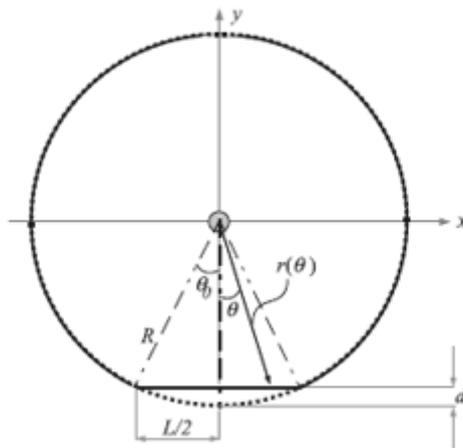


Figura 59. Geometria di un difetto localizzato, appena formatosi (dimensioni del disegno non in scala)

In questo stadio i bordi della sfaccettatura sono punti singoli e il raggio di curvatura tende ad infinito

$$L = 2\sqrt{2Rd - d^2} \approx \sqrt{8Rd} \quad (2)$$

Il moto di rotolamento della ruota fa sì che i bordi del difetto, soggetti a deformazione plastica assumono una forma parzialmente rotondeggiante. L'usura della ruota può portare al crescere della lunghezza L del difetto, con un processo lento, mentre la profondità del materiale asportato d rimane quasi costante.

Inoltre, il peso a cui ciascun carrello è sottoposto e l'intensità delle sollecitazioni di contatto, sono anche collegati al cambiamento di fase nel materiale della ruota con la formazione di martensite e

possono rivestire un importante ruolo nella formazione e crescita di difetti dovuti al fenomeno della fatica da contatto.



Figura 60. Foto di una sfaccettatura

Un algoritmo di monitoraggio, basato accelerazione verticale in boccia campionata mediante un accelerometro, può essere usato per individuare le condizioni della ruota, sviluppato analizzando il segnale vibratorio con le tecniche di analisi dei segnali. In letteratura [11], [12] sono presenti diversi studi che analizzano il segnale di accelerazione verticale in boccia nel dominio delle frequenze usando tecniche di analisi del segnale come FFT (fast fourier trasform), analisi spettrale, densità spettrale di potenza.

In letteratura [12] si fa riferimento anche alla funzione Cepstrum per individuare la presenza di echi nel segnale registrato che testimonierebbero la presenza di impatti ruota /rotaia della stessa natura, ripetuti.

La funzione Cepstrum utilizzata in numerose applicazioni nell'ambito industriale di monitoraggio, consente di evidenziare ripetizioni nel segnale accelerometrico, quindi individuare la presenza di sfaccettature delle ruote senza effettuare controlli di soglia.

Si ritiene che tali strumenti a causa dell'elevato costo computazionale non sia adatti ad un sistema real time a basso consumo energetico.

Tutti i rilevatori di ruote sfaccettate sono basati sul controllo di un valore soglia di un determinato parametro fisico, tipicamente il rumore o le accelerazioni misurate sul binario. In letteratura sono presenti anche studi per la creazione di un rilevatore di ruote sfaccettate adottando un estensimetro elettrico a resistenza per la misura delle deformazioni delle rotaie e delle traverse, o un cavo

piezoelettrico[11], [12]. Tutti i dispositivi descritti però riguardano l'infrastruttura e non il veicolo ferroviario e ciò comporta i problemi già citati, ossia l'impossibilità di un monitoraggio continuo e conseguentemente l'impossibilità di individuare un guasto incipiente se questo si presenta in un intervallo spaziale lontano dai punti di misura.

L'individuazione di un potenziale difetto della ruota, coinvolge un periodico impatto sulla rotaia, periodicità caratterizzata dalla velocità del treno e dal diametro della ruota, come è facilmente visibile nella seguente figura 61, in cui si riporta il segnale accelerometrico verticale in funzione del tempo campionato durante una campagna di prove sperimentali [13]:

la presenza di una sfaccettatura di 15mm genera picchi nel valore dell'accelerazione verticale che si ripetono periodicamente.

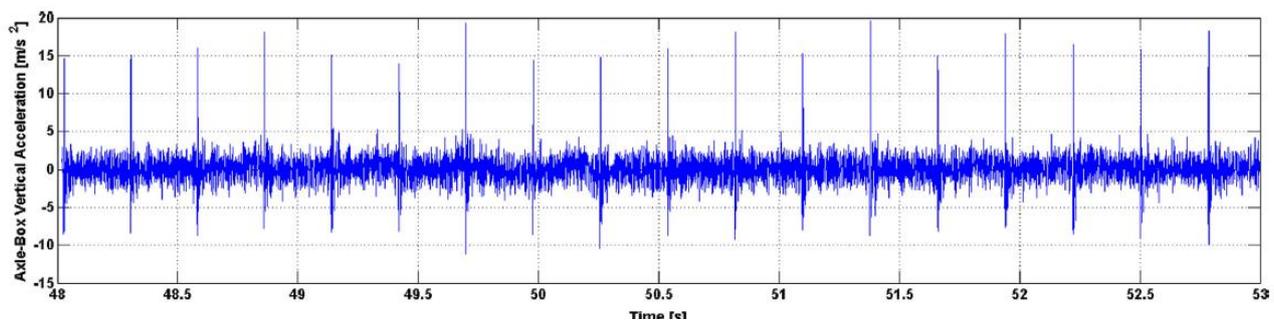


Figura 61 Accelerazione verticale in boccola alla velocità di 37 Km/h con una sfaccettatura di 15mm

Fonte immagine: N. Bosso, [13]

L'accelerazione verticale del carrello è un parametro fondamentale per il monitoraggio dei veicoli ferroviari, perché da essa possono essere estrapolati parametri che descrivono lo stato operativo delle sale e della linea.

Per il monitoraggio dell'accelerazione verticale, dovendo realizzare un dispositivo con ridotti consumi energetici, si sceglie di usare un solo parametro, ossia il valore RMS. Il valore RMS è calcolato su 200 valori campionati con una frequenza di 200Hz. Partendo dall'analisi del segnale campionato è possibile individuare algoritmi e logiche che permettano di identificare lo stato operativo della ruota e della sala monitorata. In caso di presenza di sfaccettatura della ruota l'accelerazione verticale, o meglio il suo valore RMS si discosta notevolmente dal valore usuale, intorno a 0.2 g (noto da campagne sperimentali), raggiungendo picchi più alti.

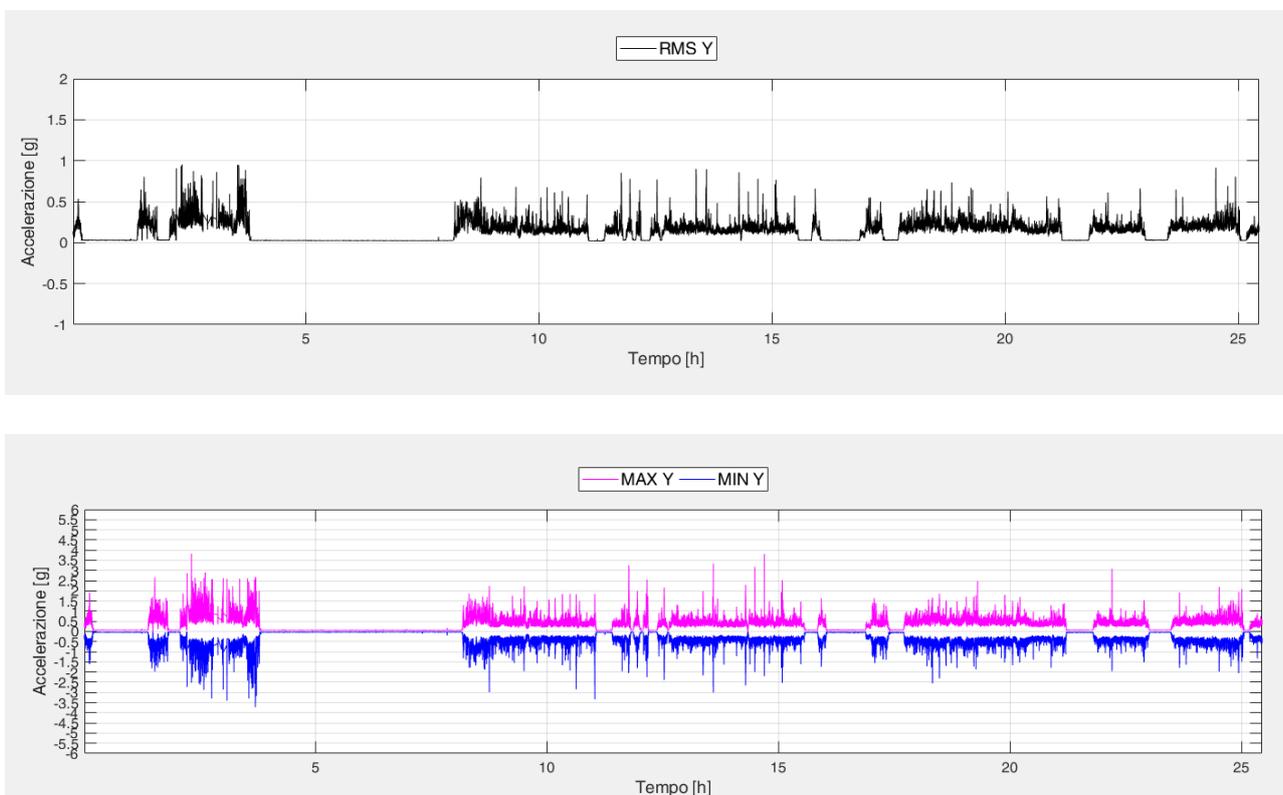


Figura 62 Accelerazione verticale, valore RMS, Max e Min

Il valore dell'accelerazione verticale può superare la soglia sopra menzionata di 0.2 g anche in altri casi come ad esempio la presenza di uno scambio ferroviario, di un passaggio a livello o la presenza di irregolarità sulla linea dovute ad assenza di manutenzione. Un algoritmo di monitoraggio deve essere in grado anche di riconoscere anomali incrementi del valore di accelerazione verticale dovuti, non ad un guasto incipiente del rotabile ferroviario, ma a determinate condizioni che ci sono sulla linea.

Questo, tra le altre cose, permette di avere, una volta raccolti un volume di dati sufficiente, un feedback anche sullo stato della linea ferroviaria. Se al contrario ogni assile del veicolo è dotato di un sistema di monitoraggio che ne misura l'accelerazione verticale un possibile difetto della linea è individuabile anche con un solo è passaggio del treno in quella determinata posizione. Una conferma della presenza di un'irregolarità nel tracciato viene data da ogni assile che presenterà lo stesso incremento di accelerazione verticale in quel punto e in assenza di altre possibili cause (scambi, passaggi a livello, etc.). Come noto, da diverse campagne sperimentali condotte con il dimostratore wireless/ cablato confrontando diversi passaggi su una linea di un veicolo ferroviario è possibile

usando le coordinate GPS acquisite, verificare come sempre nello stesso punto corrispondente ad uno scambio ferroviario o ad un passaggio a livello si verifica un incremento dell'accelerazione verticale.

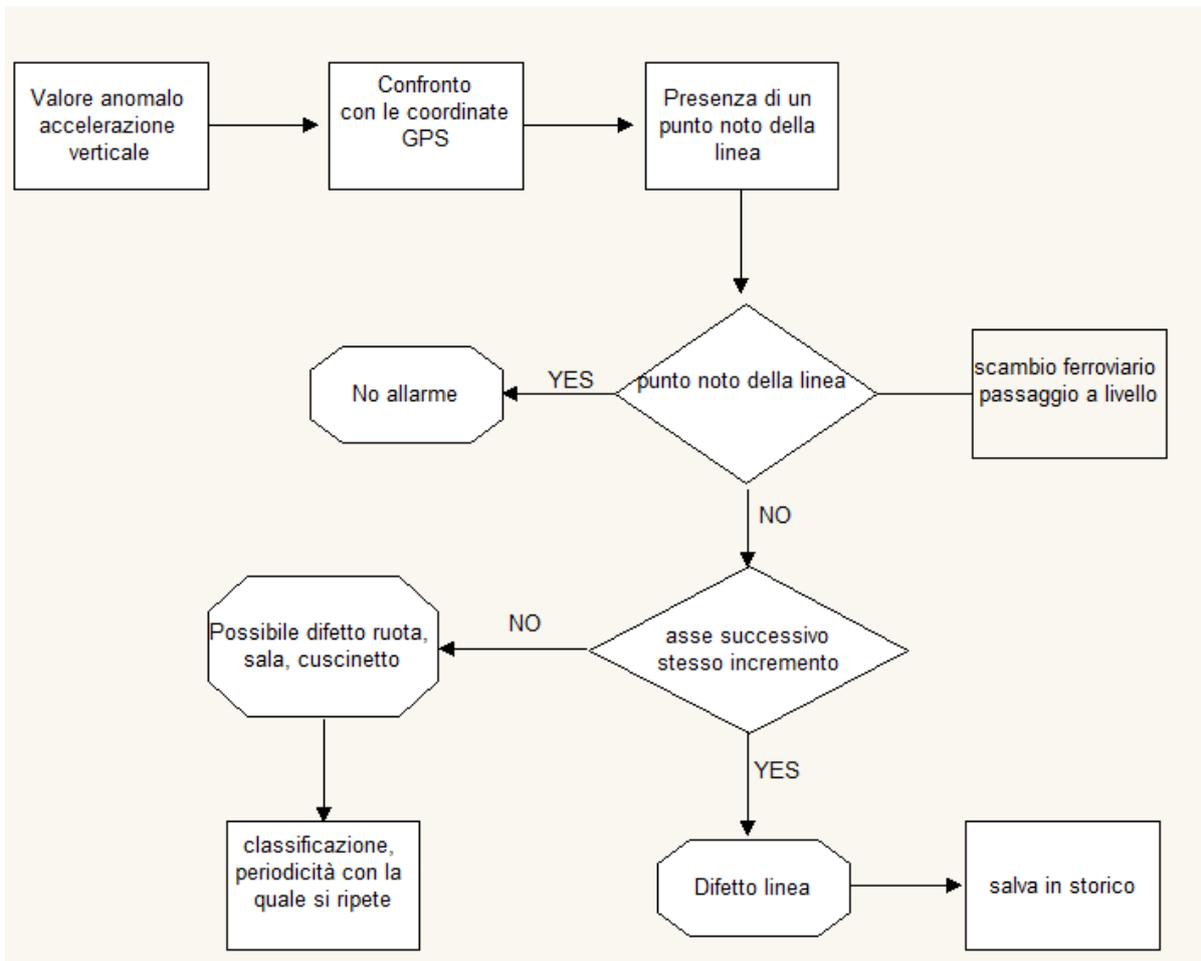


Figura 63 Schema logico di un algoritmo di monitoraggio per l'accelerazione verticale in boccola

Oltre al monitoraggio delle condizioni operative del singolo carro, per permettere un tempestivo intervento manutentivo in caso di riscontro di valori anomali, si può anche ricostruire le condizioni operative dell'infrastruttura ferroviaria al fine di mantenerla nelle condizioni ottimali.

5.4 Decelerazione longitudinale /pressione

Un sistema di monitoraggio e diagnostica deve campionare anche l'accelerazione/decelerazione longitudinale, perché essa può fornire indicazione dello stato di salute del sistema frenante. Infatti la decelerazione longitudinale media è direttamente proporzionale alla forza del cilindro freno che chiaramente dipende dalla pressione nel cilindro freno.

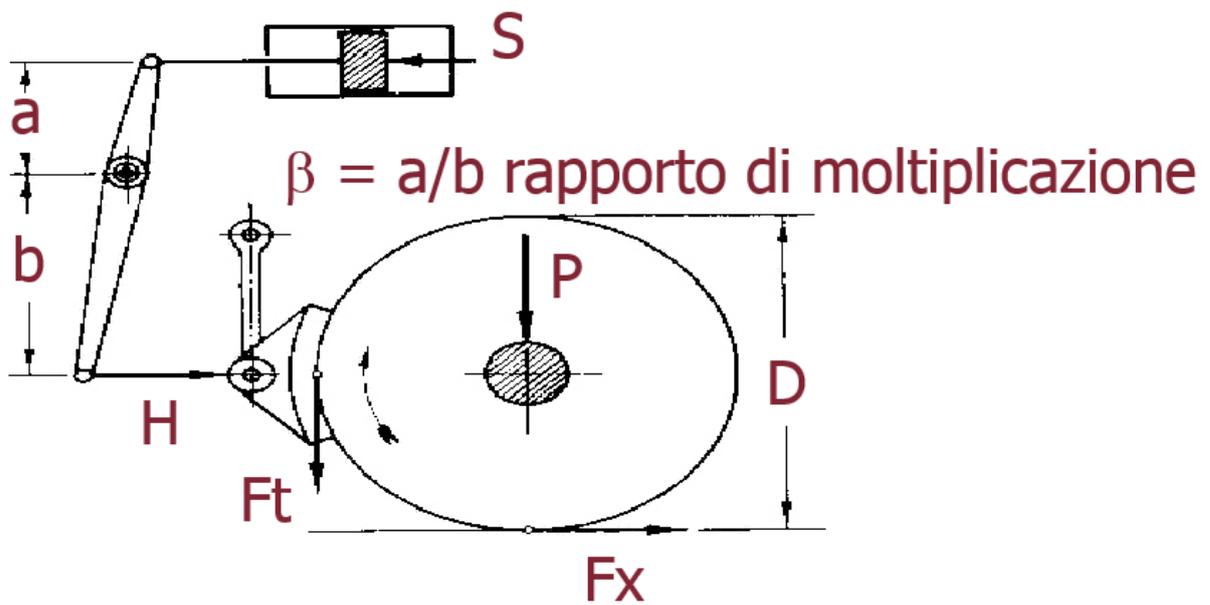


Figura 64. Schema forze in gioco nella trasmissione pneumatica

Una trasmissione pneumatica produce la forza S in conseguenza del comando del freno.

La forza S genera sull'organo frenante una forza H funzione del rapporto β (rapporto di moltiplicazione $b/a > 1$):

$$H = \beta S \quad (3)$$

La forza totale agente sul cilindro freno può essere definita anche come:

$$H = p A \beta \quad (4)$$

Dove p è la pressione nel cilindro freno, A è l'area del cilindro freno e β il rapporto di moltiplicazione.

La forza media agente sul cilindro freno può essere, invece, calcolata come:

$$H_{mean} = \frac{1}{t_f - t_s} \int_{t_s}^{t_f} H(t) dt \quad (5)$$

Dove t_f e t_s sono gli istanti iniziali e finali della frenata

Calcolando la decelerazione media come:

$$a_b = \frac{s_s^2 - s_f^2}{2d} \quad (6)$$

dove S_s è la velocità all'inizio della frenata, S_f è la velocità alla fine della frenata e d è la distanza della frenata. Tali parametri sono stati ricavati mediante il modulo GPS che fornisce indicazioni sulla velocità del carro e sulla distanza percorsa.

Si arriva a definire il rapporto di linearità tra forza media cilindro freno e decelerazione longitudinale [24]

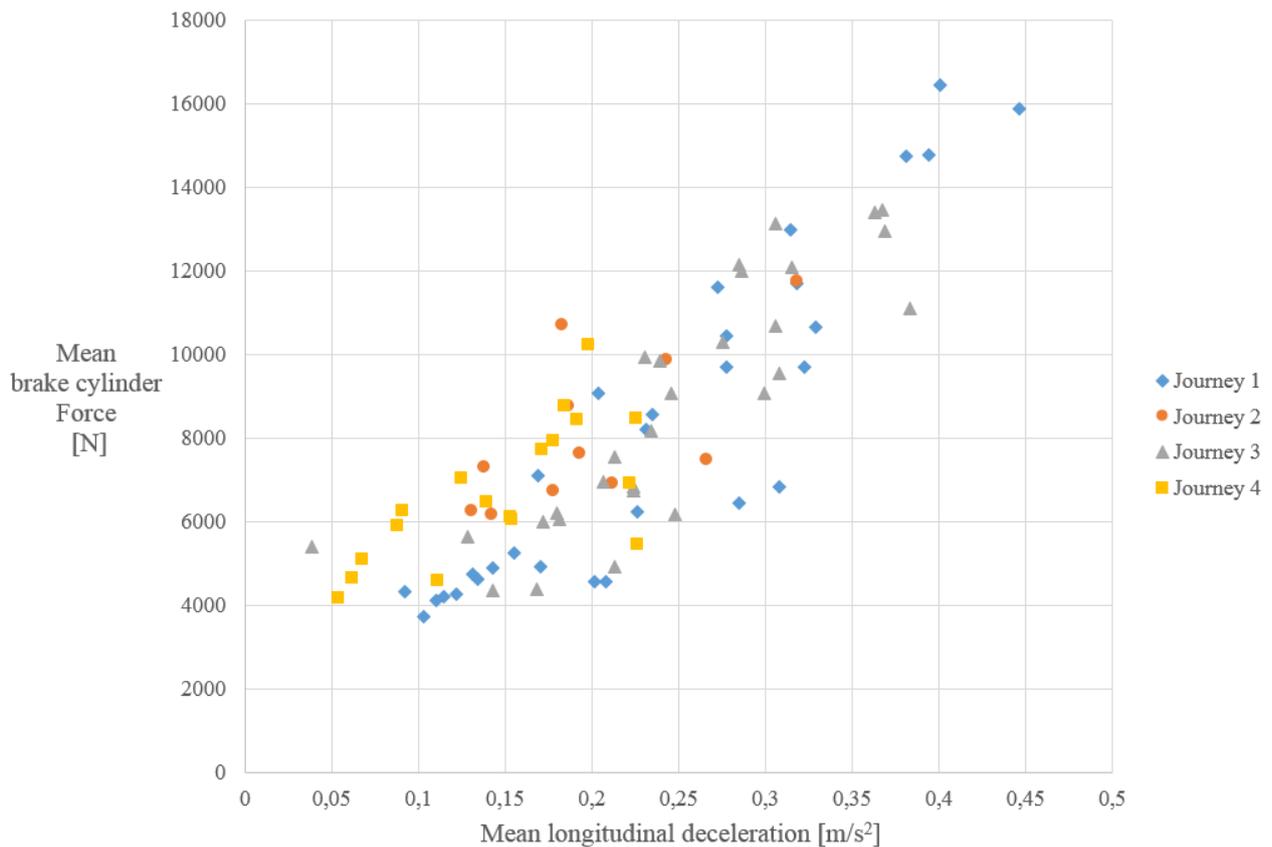


Figura 65. Diretta proporzionalità tra forza cilindro freno e decelerazione longitudinale

Infatti, in figura vengono riportati i risultati di quattro differenti viaggi sulla linea Candiolo-Moguerre che testimoniano la linearità nella relazione tra forza cilindro freno e decelerazione longitudinale.

La possibilità di poter ricavare indicazioni sulla pressione del cilindro freno semplicemente monitorando la dinamica longitudinale del veicolo ed in particolare la sua accelerazione

longitudinale, permetterebbe di fatto di bypassare il problema riguardante il cablaggio dei sensori di pressione.

Infatti confrontando il trend del valore RMS di accelerazione longitudinale e di pressione nel cilindro freno si vede che hanno lo stesso andamento.

A causa del principio di funzionamento del freno continuo ed automatico di tipo ferroviario, in cui l'azione frenante non avviene simultaneamente sui diversi carri in composizione, ciascun carro deve essere dotato di nodi sensoriali e considerando lo stesso carro si può risalire dalla pressione cilindro freno alla decelerazione longitudinale e viceversa

Dall'analisi delle funzione diagnostiche, emerge come il numero di parametri e conseguentemente di sensori risulti abbastanza elevato per ottenere un monitoraggio completo di un veicolo ferroviario. L'importanza di una rete network con sensori wireless appare, da quanto fin qui detto, evidente, perché solo una rete wireless permette di avere numerosi nodi e ottenere un sistema modulare ed in grado realmente di adattarsi alle esigenze di ciascun utilizzatore finale.

Per esempio, nei dimostratori descritti, realizzati all'interno del gruppo di ricerca del Politecnico di Torino si è solo accennato all'uso di sensori per permettere di individuare il carico su ciascun carrello. La conoscenza di questo parametro è fondamentale dal punto di vista dei noleggiatori dei carri, perché permetterebbe di controllare che non si ecceda mai il carico limite per asse consentito a vantaggio delle corrette condizioni operative del veicolo e della sicurezza di marcia. Dato che un monitoraggio di tale parametro richiederebbe pochi dati campionati e trasmessi, al limite solo quando il container viene caricato, potrebbe essere alimentato con una batteria.

Allo stesso modo per avere indicazioni sul livello di rumore emesso, soprattutto quando i convogli passano in centri abitati si potrebbe integrare un sistema di monitoraggio con un sensore che permetta di rilevare i livelli di rumore che sono presenti in prossimità dell'apparecchio.

Questi cenni solo per ribadire come, per rispondere realmente a tutte le esigenze che vi sono nel settore ferroviario e in particolare in quello del trasporto merci, l'unico sistema di monitoraggio possibile è costituito da una rete wireless di sensori modulare, che di volta in volta deve adattarsi alle specifiche esigenze dell'utilizzatore finale. Da qui l'importanza del protocollo di comunicazione radio e dell'uso di sensori che possano lavorare in low power e rimanere in sleep mode negli intervalli di tempo in cui non è necessario campionare alcun dato.

Capitolo 6

6 Scelta dei parametri da trasmettere via radio

Avendo più volte sottolineato come, dato l'elevato numero di sensori presenti in un sistema di monitoraggio completo, la scelta di una trasmissione dei dati wireless sia quella più efficiente, si vuole porre l'attenzione sulla scelta degli indici da trasmettere a livello di rete locale, per evitare di trasmettere una mole di dati non rilevanti e che avrebbero come risultato solo quello di allungare i tempi di comunicazione. Nell'ultima parte di questo capitolo si riportano anche i risultati di campagne di prove sperimentali condotte in linea per verificare l'efficienza della trasmissione radio a bassa frequenza.

Le scelte di funzionamento architetturali adottate sono per il WSN sono:

1. salvataggio dei dati sulla memoria SD (Funzionalità BLACK BOX);
2. comunicazione wireless locale BS - BM (Boccola Master - Boccola Slave);
3. comunicazione wireless locale BM - UCM (Boccola Master – Unità centrale Monitoraggio);
4. comunicazione UCM - Cloud.

Si sceglie come frequenza di campionamento per le accelerazioni 200Hz, la più bassa frequenza naturale del carrello è intorno ai 3-4 Hz, dunque la frequenza di campionamento scelta è sufficiente per monitorare le accelerazioni e inoltre concorde con un sistema di monitoraggio a basso consumo energetico.

Ogni singola boccola strumentata del carro deve essere in grado di campionare, dunque, a 200Hz i dati dei due accelerometri presenti (16g /200g), calcolarne i valori minimo, massimo e il valore RMS sui tre assi. Inoltre deve campionare i dati di temperatura boccola, tensione della batteria tampone per verificarne lo stato e la velocità relativa a ciascun asse mediante l'odometro

Da ciò deriva che un pacchetto dati da trasmettere risulta essere costituito da

Tabella 8 stringa completa dati campionati da boccola strumentata

Accelerometro 16g									Accelerometro 200g									Altro		
Ax	Ax	Ax	Ay	Ay	Ay	Az	Az	Az	Ax	Ax	Ax	Ay	Ay	Ay	Az	Az	Az	Odm	Tmp	VBt
min	max	RMS	min	max	RMS	min	max	RMS	min	max	RMS	min	max	RMS	min	max	RMS			

Dove:

- A (-): accelerazione lungo l'asse (x,y,z) e valori (min, max, RMS);
- Odm: odometro;
- Tmp: Temperatura boccola;
- Vbt: Tensione batteria tampone.

La scelta più vantaggiosa risulta essere quella di trasmettere ciascun parametro, utilizzando una variabile di tipo numero intero e solamente in seguito alla trasmissione ricostruire il valore con il suo formato, cioè con una variabile numero a virgola mobile. Così facendo si ha un risparmio sul numero di bytes da inviare. Infatti, alla stringa appena menzionata vanno aggiunti altri byte di indirizzamento e i dati relativi al Gps

Risulta evidente che la trasmissione di una serie di informazioni così lunga per le tutte le 8 boccole (se si considera un carrello a due assi) implica:

- Tempi di trasmissione troppo lunghi in cui la boccola Master resta in ricezione troppo a lungo (non potendo funzionare come trasmettitore verso il locomotore / UCM);
- aumento della possibilità della perdita di pacchetti di dati.

Si scelgono quindi strategie di trasmissione più *lean* per rendere la rete più pronta anche nel rispetto delle regole del *fairplay* radio. Ossia la stringa come descritta in precedenza viene salvata da ogni boccola strumentata sulla sua memoria SD, ma ciascuna boccola che nella rete assume il ruolo di slave, trasmette alla boccola master solo alcuni indici, riportati in Tabella 9.

Si sceglie di utilizzare il Crest factor: tale valore indica quante volte il valore efficace (RMS) è contenuto nel valore di picco.

$$CF = \frac{\text{Valore di picco}}{RMS} \quad (7)$$

Il valore efficace (RMS) di una grandezza variabile nel tempo è un indice dell'energia ad essa associata, tuttavia tale valore non è influenzato da spike di breve durata nel segnale accelerometrico, perché non modificano il contenuto energetico del segnale in maniera significativa. Invece il CF risulta influenzato da spikes anche di breve durata.

Tabella 9 stringa trasmessa dalla BS alla BM

		Accelerometro 16g			Accelerometro 200g			Altro		
CR	PS	CFx	CFy	CFz	CFx	CFy	CFz	Odm	Tmp	VBt

dove:

- CR: conferma ricezione;
- PS: Priority State (0: normal; 1: allert);
- CF: Crest Factor (assi x,y,z);
- Odm: odometro;
- Tmp: Temperatura boccola;
- Vbt: Tensiona batteria tampone.

La Boccola Master una volta raccolti tutti i dati dalle Boccole Slaves implementa due diverse strategie di comunicazione verso l'unità di monitoraggio centrale a seconda che almeno uno dei dati ricevuti dalle BS o BM indichi un livello di allarme.

Nella trasmissione sotto soglia, cioè quando ciascuna delle boccole non presenta valori di allarme o pre allarme, la boccola master trasmette all'unità centrale di monitoraggio solamente i valori della boccola strumentata meno preoccupanti (Best case) e quelli della boccola strumentata più vicini ad un valore di soglia limite (Worst case). Tutte le altre boccole avranno valori dei parametri compresi in questo range, indicanti un normale funzionamento.

Tabella 10 Trasmissione sotto soglia da Boccola Master a Unità centrale

		Accelerometro 16g						Altro					
PS	SR	CFbx	CFby	CFbz	CFwx	CFwy	CFzw	Odmb	Tmpb	VBtb	Odmw	Tmpw	VBtw

- PS: Priority State (0: normal; 1: allert)
- SR: Stato rete;
- CF: Crest Factor (assi x,y,z) con b:best e w:worst;
- Odm: odometro con b: best e w: worst;
- Tmp: Temperatura boccola con b: best e w: worst;
- Vbt: Tensiona batteria tampone con b: best e w: worst.

Nel caso in cui uno dei parametri campionati superi o meglio raggiunga un livello di allarme, la boccola master trasmette all'unità centrale di monitoraggio, quel dato con identificazione della

boccola strumentata in esame. In tabella 11, si riporta un esempio di stringa in caso di valore sopra soglia di uno dei parametri campionati.

Tabella 11 stringa trasmessa in caso di valore sopra soglia da BM a UCM

PS	SR	ID	Logistica	Valore/i fuori soglia	Risposta UCM
----	----	----	-----------	-----------------------	--------------

dove:

- PS: Priority State (0: normal; 1: alert)
- SR: Stato rete;
- ID: ID Boccola

L'unità centrale di monitoraggio, in caso di comunicazione sotto soglia di allarme riceve i dati li bufferizza e attende accensione centralina per trasmissione in cloud, in caso di comunicazione sopra soglia forza l'accensione della centralina.

Si riportano infine i risultati di un test sulla linea Gallarate-Neuss, per quel che riguarda la trasmissione radio tra boccole strumentate e unità centrale di monitoraggio.

Come indice della qualità della comunicazione radio si è usato il valore RSSI, (Receive Signal Strenght Indicator), un parametro utilizzato nelle telecomunicazioni, che in generale misura la potenza di un segnale. Tale parametro da un'indicazione sulla potenza del segnale ricevuto. Per tradurre il valore da dBm a indicazione della qualità del servizio si è usata la seguente scala fornita dall'azienda Capetti srl, fornitrice dei moduli radio utilizzati.

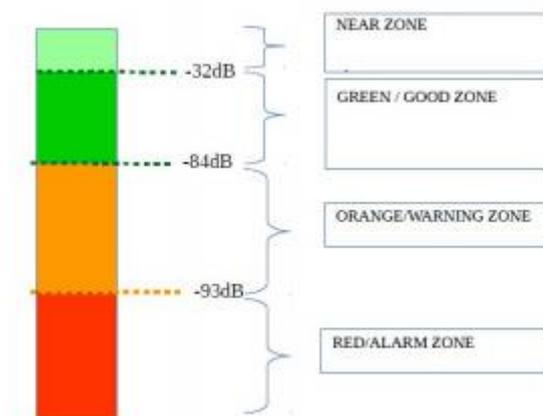


Figura66.Traduzione da RSSI (dBm) in qualità del servizio

I dati acquisiti sono stati ottenuti per un viaggio di andata e ritorno fra Gallarate e Neuss, di cui viene indicato l'itinerario seguito.

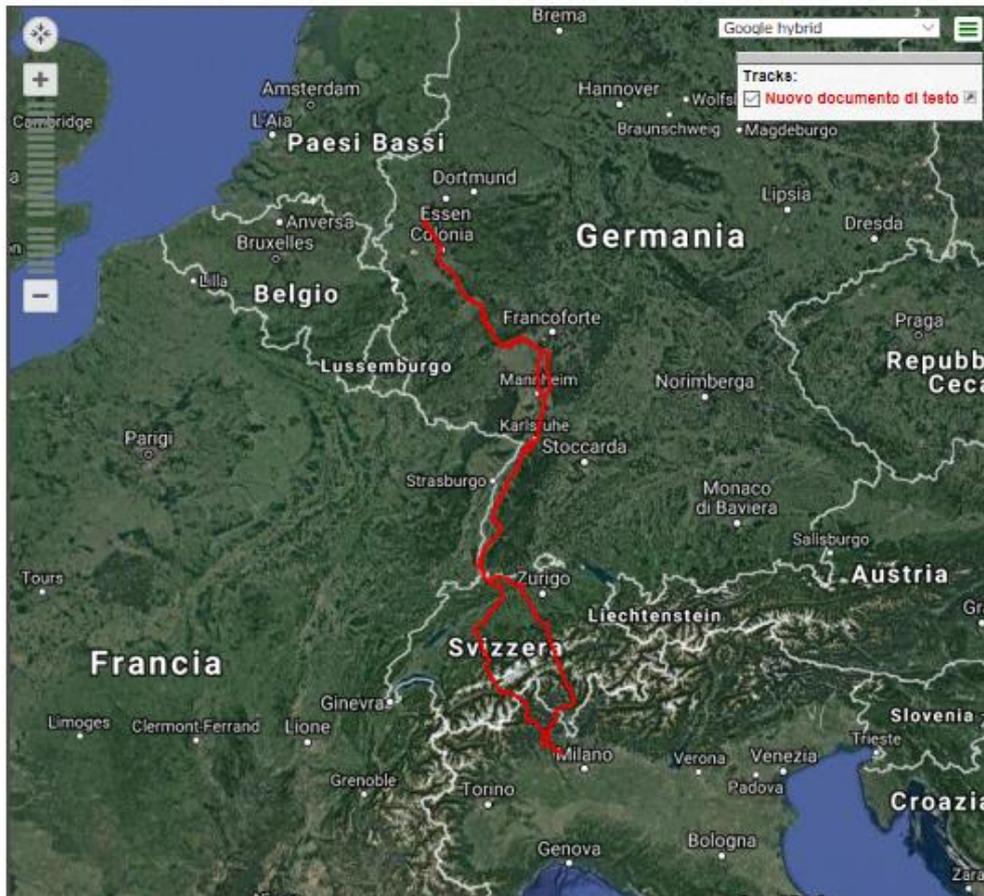


Figura 67. Linea percorsa per test in linea trasmissione radio

Il layout di installazione è lo stesso di Figura 44, per cui le boccole strumentate 2 e 4 si trovano più vicine all'unità centrale di monitoraggio.

I risultati ottenuti, in un viaggio di andata e ritorno Gallarate-Neuss vengono riportati nelle seguenti figure, suddividendo i dati in tre aree, che contraddistinguono una ricezione ottima, discreta e scarsa del segnale inviato dalle quattro boccole strumentate.

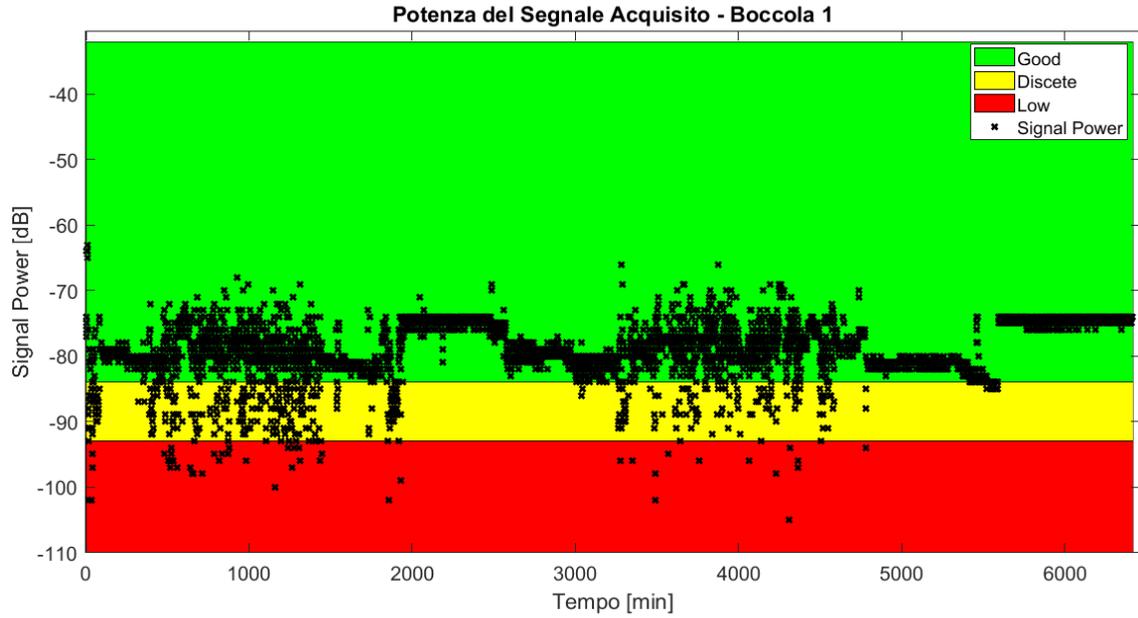


Figura 68 Potenza del segnale trasmesso dalla boccola 1

Il 91.84% dei dati acquisiti ha un valore RSSI superiore a -84 dBm, indicando una buona trasmissione del segnale trasmesso. Il 7.41% dei dati ha una qualità discreta, mentre solo lo 0.75% dei dati è stato ricevuto con scarsa qualità. Valori molto simili sono stati ottenuti nei pacchetti dati trasmessi dalla boccola 2, i risultati vengono mostrati nella seguente figura.

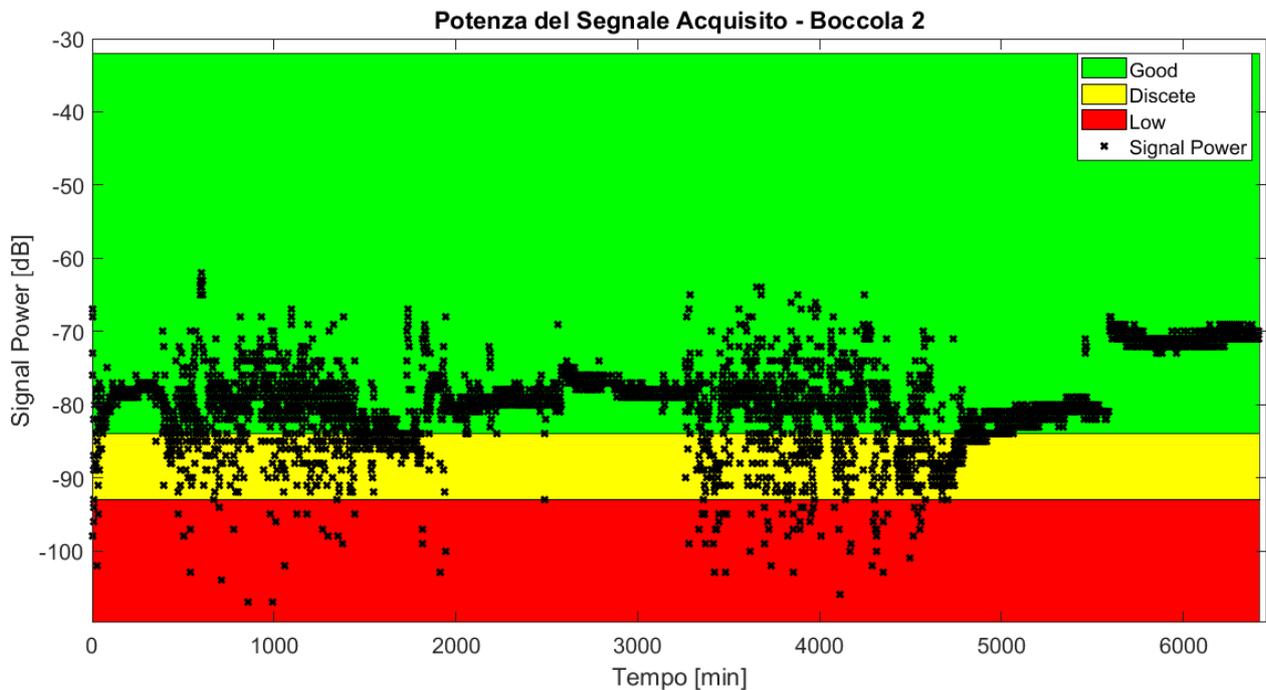


Figura 69 Potenza del segnale trasmesso dalla boccola 2

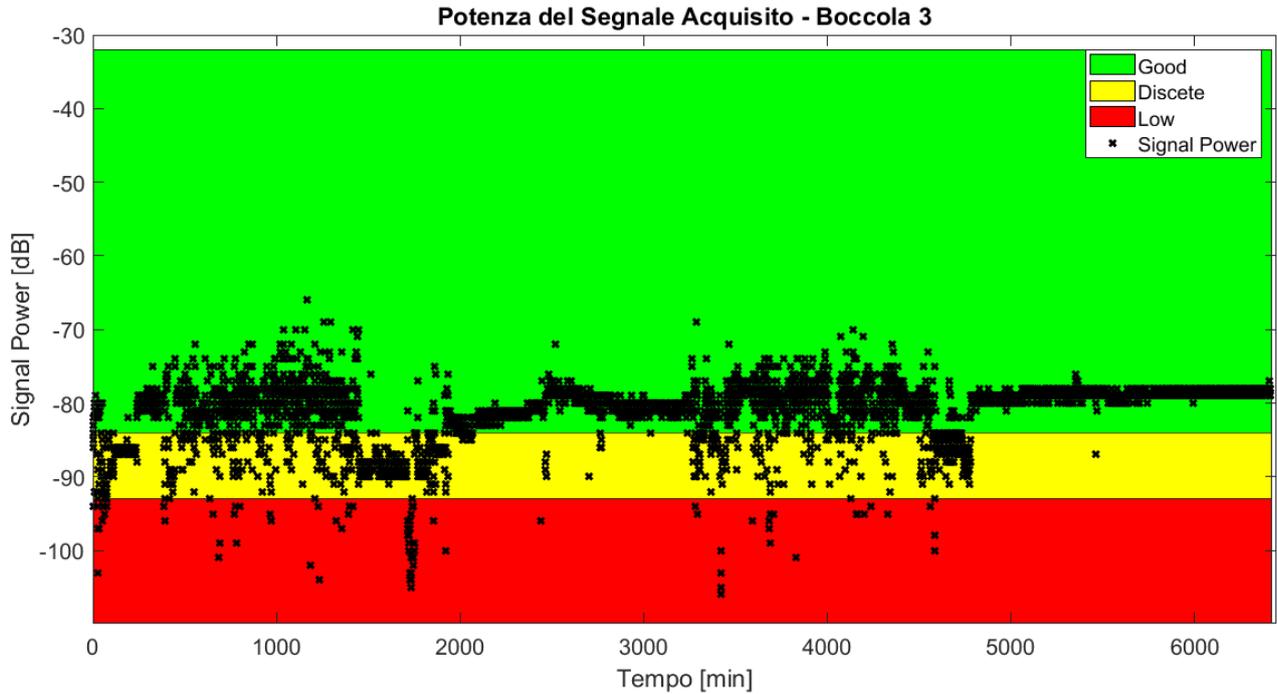


Figura 70 Potenza del segnale trasmesso dalla boccola 2

L'81% dei dati trasmessi dalla boccola 3 presenta una buona qualità di trasmissione, mentre il 17.45% e l'1.45% dei dati trasmessi presentano rispettivamente una trasmissione discreta e di scarsa qualità.

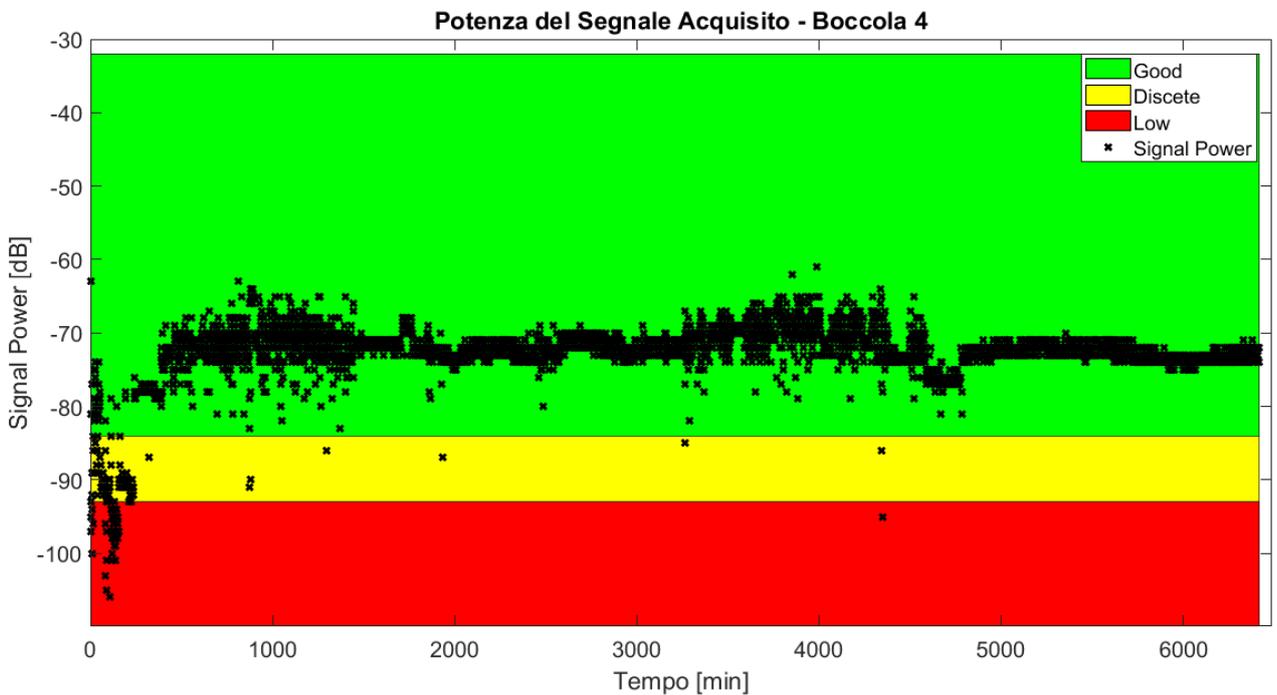


Figura 71 Potenza del segnale trasmesso dalla boccola 4

La boccola 4 è quella che ha presentato la migliore qualità nella trasmissione del segnale con ben il 96.73% dei pacchetti trasmessi con una potenza del segnale molto buona.

In conclusione, il test in linea della trasmissione radio ha dato esiti molto positivi, in quanto la quasi totalità dei dati inviati dalle boccole strumentate sono state ricevute dall'unità centrale di monitoraggio in condizioni ottimali. La percentuale dei pacchetti di dati persi, rispetto a quelli acquisiti risulta molto bassa, intorno allo 0,44%. Tra i pacchetti dati persi circa il 75% è stato perso con treno fermo, mentre il restante 25% è stato perso con treno in movimento. Grazie alle coordinate GPS è stato possibile ricavare i punti in cui i dati non sono stati ricevuti dall'unità centrale di monitoraggio. Come ci si attendeva l'ambiente più ostico per la trasmissione radio è risultato essere quello del terminal ferroviario, infatti quasi un terzo di tutti i pacchetti dati è stato perso presso il terminal ferroviario dell'Ambrogio trasporti, a Gallarate o presso la stazione ferroviaria di Neuss. Confrontando i dati del viaggio di andata e di ritorno non si sono riscontrati altri punti particolarmente negativi per una buona comunicazione dati.

Conclusioni

Nello studio condotto in questa tesi si è cercato di porre l'attenzione sulle principali problematiche legate al monitoraggio dei carelli ferroviari merci, basandosi sia sullo stato dell'arte sia sul miglior modo di rispondere ad alcune esigenze non completamente risolte.

Dopo aver delineato un quadro generale in cui è immerso il settore merci ferroviario, si sono analizzati numerosi dispositivi sia presenti sui mercati, sia frutto di progetti di ricerca con collaborazioni tra università e centri ricerca. Maggior risalto è stato dato ai prototipi/dimostratori studiati e costruiti all'interno del gruppo di ricerca del Politecnico di Torino, i quali hanno permesso di ideare e raggiungere il prototipo in fase di realizzazione all'interno del progetto S.W.A.M. Rail. Alla realizzazione/installazione di quest'ultimo prototipo si è potuto dare un contributo in prima persona, collaborando con i diversi working team creati all'interno del progetto. Una prima installazione del dispositivo non completo è stata effettuata nel mese di aprile 2018, alcuni risultati sono stati esaminati nel presente lavoro, una seconda versione completa sarà installata nelle prossime settimane. Il dispositivo presenta alcune caratteristiche davvero innovative e in grado di far fronte alle esigenze del settore merci ferroviario, prime fra tutte l'autoalimentazione e la comunicazione wireless tra i diversi nodi della rete. Il sistema di monitoraggio completo e wireless presenta punti in comune con i sistemi cablati e ibrido cablato-wireless descritti nel capitolo dedicato ai prototipi realizzati dal Politecnico. In particolare si è cercato di ottimizzare il nodo boccola in modo da creare un'unica rete di sensori in grado di monitorare l'intero convoglio.

Come già accennato l'esperienza maturata con i diversi prototipi ha permesso di raccogliere numerosi dati sperimentali che costituiscono una base fondamentale per sviluppare nuovi sistemi e, soprattutto, per creare efficienti algoritmi diagnostici.

Ulteriori sviluppi futuri vanno proprio in questa direzione, ossia quella di estrapolare, grazie al database raccolto, algoritmi a basso costo computazione che permettano di dare indicazioni sulle reali condizioni operative non solo del parco veicoli strumentato, ma anche della infrastruttura ferroviaria percorsa. Si vuole sottolineare, infatti, come tale lavoro non solo permetta una gestione efficiente del parco vetture, con conseguente risparmio in termini di costi e fermi per manutenzione, ma sia anche uno strumento valido di ausilio alla sicurezza del trasporto ferroviario. Nell'ultimo decennio, infatti il monitoraggio di veicoli ferroviari sta diventando un tema sempre più sensibile, in particolare successivamente a diversi incidenti che sono avvenuti di recente.

Attualmente dispositivi di questo tipo, volti ad assicurare la sicurezza del trasporto ferroviario sono installati su treni ad alta velocità in cui l'elevato costo del sistema è giustificato dalle prestazioni richieste e dall'elevato costo di produzione di questa tipologia di veicolo. Questi stessi sistemi installati su veicoli alta velocità non possono essere impiegati su veicoli tradizionali, e soprattutto merci, in quanto il loro costo è troppo elevato.

Altri possibili sviluppi futuri riguarderanno senza dubbio la possibilità di trasferire l'intero know-how acquisito nel settore trasporto ferroviario merci anche ai treni passeggeri, per i quali l'installazione di sistemi hardware di monitoraggio, presenta sicuramente minori difficoltà rispetto al settore merci, quantomeno per la presenza di elettrificazione a bordo carro.

Episodi come quello di Viareggio nel 2009, o ancora come quello di Pioltello nel febbraio di questo anno non devono più verificarsi. La possibilità di controllare lo stato del rolling stock e, in generale dell'infrastruttura, potrà essere un catalizzatore che permetta al trasporto ferroviario di affermarsi rispetto a quello su strada, con tutti i benefici a livello ambientale ed economico che ciò comporta.

Bibliografia

- [1] R. Pfaff et al, Connected freight rail rolling stock: a modular approach integrating sensors, actors and cyber physical systems for operational advantages and condition based maintenance, Asia Pacific Conference of the prognostics and health management society,2017.
- [2] Relazione Speciale " Il trasporto delle merci su rotaia nell'UE non è ancora sul giusto binario" Corte dei conti europea, Lussemburgo, 2016.
- [3] A.Tagliaferri ,Matricardi A., Nozioni sul freno ferroviario, CIFI collana per la formazione professionale, 2001.
- [4] Edwards M.C. et al., Improving freight rail safety with on board monitoring and control systems, in *Joint Rail Conference*, 2005
- [5] Ngigi R.W., Pislaru C., Ball A., and Gu F., Modern techniques for condition monitoring of railway vehicle dynamics, *Journal of Physics: Conference Series* **364**, 2012
- [6] Mahasukhon P., Sharif H, Hempel M., Zhou T., Ma T., Shrestha P. L. : "A study on energy efficient multi-tier multi-hop wireless sensor networks for freight-train monitoring", 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference
- [7] N. Bosso, D. Macaluso, G. Salvo Effetti dinamici dell'innalzamento de carico per asse di rotabili ferroviari per trasporto merci
- [8] T Vernersson, Temperatures at railway tread braking. Part 1,2, Proc. IMechE Vol. 221 Part F: J. Rail and Rapid Transit, 2007.
- [9] C Gericke , M Hecht, CargoCBM - Feature Generation and Classification for a Condition Monitoring System for Freight Wagons, *Journal of Physics: Conference Series* **364**, 2003
- [10] N.Zampieri Sviluppo di Algoritmi in Tempo Reale per la Simulazione, il Monitoraggio e la Diagnostica di Sistemi Ferroviari. PhD Thesis, Politecnico di Torino, 2014
- [11] A. Bracciali, G. Lionetti, M. Pieralli, Effective wheel flats detection through a simple device, *Techrail Workshop*, 2002, vol. 2, pp. 14–15.
- [12] A. Bracciali, G. Cascini, Detection of corrugation and wheel flats of railway wheels using energy and cepstrum analysis of rail acceleration, Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit **211** (1997) 109–116.
- [13] N. Bosso, A. Gugliotta, N. Zampieri, Wheel flat detection algorithm for onboard diagnostic, *Measurement*, Volume 123, July 2018, Pages 193-202
- [14] N. Bosso, A. Gugliotta, N. Zampieri, Design and testing of an innovative monitoring system for railway vehicles, Proc. Inst. Mech. Eng., Part F: J. Rail Rapid Transit (2016)

- [15] G. de Pasquale, A. Somà, N. Zampieri, "Design, simulation, and testing of energy harvesters with magnetic suspensions for the generation of electricity from freight train vibrations," J. Comput. Nonlinear Dyn., vol. 7, no. 4, p. 041011, Jun. 2012.
- [16] V. Behrends, M. Haunschild, N. Galonske, "Smart telematics enabling efficient rail transport – development of the ViWaS research and development project", Transport Research Procedia 14, 2016.
- [17] M. Aimar, A. Somà, "Study and results of an onboard system for braking monitoring of freight wagons", submitted in Journal of rail and Rapid Transit, 2017.
- [18] M. Aimar, A. Somà, A. Zanardelli, "Experimental data measured with an On Board Unit for condition monitoring of freight railway vehicles", submitted in Ingegneria Ferroviaria, 2017
- [19] R.W. Ngigi, C. Pislaru, A. Ball, F. Gu, "Improving freight rail safety with on board monitoring and control systems", Joint Rail Conference, 2005
- [20] A. Lo Schiavo, "Fully autonomous wireless sensor network for freight wagon monitoring". IEEE Sensors Journal, VOL. 16, No. 24, December 2015.
- [21] O. Lunys*, S. Dailydka, G. Bureika, "Investigation on features and tendencies of axle box heating", Vilnius Gediminas Technical University, Faculty of Transport Engineering, 2015
- [22] M. Aimar, "Study of an onboard health monitoring system for freight railway wagons PhD Thesis, Politecnico di Torino, 2018
- [23] S. Chiochio et al, "A Cloud-based Heterogeneous Wireless Platform for Monitoring and Management of Freight Trains", 8th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT) , 2016
- [24] M. Aimar, A. Somà, "Condition Monitoring and comparison of braking and dynamics in Railway freight wagon", 7th International Conference on Mechanics and Materials in Design, 2017