



Sviluppo e sperimentazione di URV: prototipo di veicolo ferroviario a guida autonoma per il monitoraggio dell'infrastruttura

Development and testing of URV: prototype of unmanned railway vehicle for infrastructure monitoring

Fabio SENESI^(*)
Arturo AMENDOLA^(****)
Lorenzo BARRUFFO^(**)
Salvatore DE SIMONE^(**)
Dario D'AVINO^(**)
Giovanniluca DE VITA^(***)
Domenico Ernesto GARRUBBA^(***)
Innocenzo MUNGIELLO^(**)
Sergio REPETTO^(***)
Diana SERRA^(**)

(<https://www.medra.org/servlet/view?lang=it&doi=10.57597/IF.12.2024.ART.1>)

Sommario - URV (*Unmanned Railway Vehicle*) è il primo prototipo di veicolo ferroviario a guida autonoma attrezzato per viaggiare sulle linee Alta Velocità (AV) e creato per svolgere attività ispettive in un contesto di sicurezza che consentirà di verificare lo stato delle linee in anticipo rispetto al passaggio del primo treno del giorno.

Nato dalla necessità di migliorare l'ispezione e la sicurezza delle infrastrutture ferroviarie, URV combina tecnologie di automazione avanzata, visione artificiale ed un sistema di trazione ibrida con un'autonomia di 400 km e una velocità massima di 200 km/h.

Grazie ad interfacce operatore dedicate, URV offre due modalità di guida innovative: una remota e una autonoma, il tutto supervisionato da un sistema ERTMS/ETCS che assicura la massima sicurezza, gestendo riduzioni di velocità e frenature di emergenza.

1. Introduzione

Il Progetto URV (*Unmanned Railway Vehicle*) di Rete Ferroviaria Italiana, presentato al pubblico ad Innotrans 2024 [1] a Berlino, rappresenta una nuova opportuni-

Summary - URV (*Unmanned Railway Vehicle*) is the first prototype of unmanned railway vehicle equipped to travel on High Speed (HS) lines and created to carry out inspection activities in a safety context that will allow checking the condition of the lines in advance of the transit of the first train of the day.

Designed from the need to improve the inspection and safety of railway infrastructures, the URV combines advanced automation technologies, artificial vision and a hybrid traction system with an autonomy of 400 km and a maximum speed of 200 km/h.

Thanks to dedicated operator interfaces, the URV offers two innovative driving modes: one remote and one self-driving, all supervised by an ERTMS/ETCS system that ensures maximum safety, managing speed reductions and emergency braking.

1. Introduction

The Unmanned Railway Vehicle (URV) Project of Rete Ferroviaria Italiana, presented to the public at Innotrans 2024 [1] in Berlin, represents a new opportunity for railway

^(*) RFI (Rete Ferroviaria Italiana) Ricerca e Sviluppo, Roma.

^(**) RFI (Rete Ferroviaria Italiana) Ricerca e Sviluppo, Napoli.

^(***) RFI (Rete Ferroviaria Italiana) Ricerca e Sviluppo, Firenze.

^(****) Consulente di RFI R&S.

^(*) RFI (Rete Ferroviaria Italiana) Research and Development, Rome.

^(**) RFI (Rete Ferroviaria Italiana) Research and Development, Naples.

^(***) RFI (Rete Ferroviaria Italiana) Research and Development, Florence.

^(****) RFI R&D Consultant.

tà per il monitoraggio e la sicurezza ferroviaria. Il forte interesse collettivo verso questo traguardo aziendale ha spinto la dirigenza a coinvolgere il personale nella scelta del nome da assegnare al prototipo, organizzando un concorso interno e l'iniziativa ha suscitato un'ampia partecipazione. Il nome scelto è TINO (*Train for INspection Of railway*) poiché, per forme, colori e obiettivi, il nuovo prototipo richiama infatti l'immagine di un piccolo treno Dia.Man.Te. (*Diagnostica e Manutenzione Tecnologica*) o, appunto, un Diaman-Tino.

Questo prototipo innovativo (Fig. 1) è il primo veicolo ferroviario a guida completamente autonoma progettato per viaggiare sulle linee ad alta velocità italiane. Il veicolo ha una lunghezza di circa 9 metri, un peso ridotto rispetto ad un normale veicolo ferroviario, ed è in grado di raggiungere una velocità massima di 200 km/h. Il sistema di trazione è basato su un *powertrain* ibrido, combina batterie ed un motore endotermico, garantendo un'autonomia operativa di 400 km. Questa configurazione consente di ottimizzare l'efficienza energetica e ridurre le emissioni, rendendo il veicolo adatto a un'ampia gamma di applicazioni ferroviarie. La progettazione del sistema è complessa, sia in termini di architettura, di funzionalità, che di requisiti di sicurezza e affidabilità. Inoltre, la distribuzione geografica dei team di sviluppo, sia accademici che industriali, dislocati su tutto il territorio italiano, ha reso essenziale definire un coordinamento preciso e una metodologia chiara per lo sviluppo e il collaudo del prototipo. Questo articolo descrive il percorso progettuale e ingegneristico che ha portato alla creazione di questo prototipo, con particolare attenzione alle tecnologie implementate.

L'articolo è strutturato come segue: nella sezione II, è fornita una panoramica dello stato dell'arte, esaminando le attuali soluzioni esistenti nel campo del monitoraggio dell'infrastruttura ferroviaria e dei veicoli ferroviari autonomi. Successivamente, alla sezione III si presenta la Direzione Ricerca e Sviluppo di Rete Ferroviaria Italiana, che ha realizzato il prototipo del veicolo e nella IV è descritto il progetto, con un focus sulla meccanica e sulle tecnologie di bordo come il sistema ERTMS/ATO, che permette al veicolo di operare in maniera autonoma. seguita nella V da una descrizione dei sistemi di controllo e sorveglianza, tra cui telecamere e sensori avanzati, e il sistema di gestione della trazione. La sezione VI è dedicata alle sfide affrontate durante lo sviluppo, che non sono state solo di natura tecnica, ma anche relative alla conformità con le normative vigenti per veicoli ferroviari standardizzati, come mezzi d'opera ad esempio, e di seguito nella VII è descritto il processo che è stato seguito per la sperimentazione del prototipo. Infine, nella sezione VIII vengono esaminate le applicazioni e i vantaggi di questo prototipo



Figura 1 – Il prototipo di veicolo ferroviario a guida autonoma TINO (URV).
Figure 1 – The TINO (URV) self-driving railway vehicle prototype.

monitoring and safety. The strong collective interest in this corporate goal prompted the management to involve the staff in the choice of the name to be assigned to the prototype, organising an internal competition and the initiative attracted wide participation. The name chosen is TINO (Train for INspection Of railway) because, in terms of shapes, colours and objectives, the new prototype recalls the image of a small Dia.Man.Te. train. (Diagnostics and Technological Maintenance) or, precisely, a DiamanTino.

This innovative prototype (Fig. 1) is the first fully self-driving railway vehicle designed to travel on Italian high-speed lines. The vehicle has a length of about 9 m, a reduced weight compared to a normal railway vehicle, and is able to reach a maximum speed of 200 km/h. The traction system is based on a hybrid powertrain, combines batteries and an endothermic engine, ensuring an operating range of 400 km. This configuration allows optimising energy efficiency and reducing emissions, making the vehicle suitable for a wide range of railway applications. The design of the system is complex, both in terms of architecture, functionality, and safety and reliability requirements. In addition, the geographical distribution of development teams, both academic and industrial, located throughout Italy, has made it essential to define a precise coordination and a clear methodology for the development and testing of the prototype. This article describes the design and engineering path that led to the creation of this prototype, with particular attention to the technologies implemented.

The article is structured as follows: section II provides an overview of the state of the art, examining the current existing solutions in the field of rail infrastructure monitoring and self-driving railway vehicles. Subsequently, section III presents the Research and Development Department of Rete Ferroviaria Italiana, which created the prototype of the vehicle and section IV describes the project, focusing on the on-board mechanics and technologies such as the ERTMS/ATO system, which allows the vehicle to operate autonomously, followed in section V by a description of the control and surveillance systems, including cameras and advanced sensors, and the traction management system. Section VI is dedicated to the challenges faced during the development, which were not only of a technical nature, but also related

per il settore ferroviario e si trarranno le conclusioni sulle potenziali evoluzioni e applicazioni della nostra soluzione.

2. Stato dell'arte

Il monitoraggio dell'infrastruttura ferroviaria si avvale di un'ampia gamma di tecnologie avanzate, sia in Italia che nel resto del mondo, per garantire sicurezza ed efficienza sulle reti ad alta velocità (AV) e sulle linee tradizionali. In Italia, Rete Ferroviaria Italiana (RFI) utilizza treni diagnostici specializzati come il Dia.Man.Te. 2.0 (Fig. 2), un'unità che raccoglie in tempo reale dati complessi sull'usura del binario, la qualità della linea di contatto, la geometria del binario, e la connettività LTE/5G [2]. Al treno Dia.Man.Te 2.0 si affianca una flotta crescente di veicoli diagnostici, tra cui i modelli Falco e Galileo 2.0/DIC-80 che utilizzano tecnologie laser, ottiche e ad ultrasuoni, per individuare precocemente difetti nelle rotaie e altri elementi infrastrutturali [3]. Questi dati consentono interventi manutentivi predittivi, riducendo le interruzioni di servizio e aumentando la longevità delle infrastrutture ferroviarie.

Anche a livello internazionale, diverse aziende adottano treni diagnostici simili: il New Measurement Train (NMT) nel Regno Unito ispeziona la geometria del binario a velocità elevate [4], mentre il TGV Iris 320 in Francia controlla l'infrastruttura delle linee ad alta velocità con sensori laser e telecamere ad alta risoluzione.

In prospettiva futura, un possibile passo in avanti per il settore ferroviario potrebbe essere l'automazione completa di veicoli ferroviari e dei sistemi di monitoraggio e supervisione, riducendo la necessità di intervento umano sia per la raccolta che per l'analisi dei dati sull'infrastruttura. L'automazione del monitoraggio rappresenta una sfida ambiziosa, ma con l'aumento della capacità dei sistemi di intelligenza artificiale e la diffusione di sensori avanzati, è sempre più realizzabile.

La diagnostica condotta attraverso queste misure consentirebbe così di definire la priorità degli interventi manutentivi o avere ulteriori strumenti per applicare interventi di mitigazione del rischio, come la riduzione della velocità dei veicoli, sui tratti che mostrano tali tipi di problemi. L'analisi delle normative di riferimento per l'omologazione del veicolo può essere un punto di partenza per individuare grandezze fisiche da monitorare e relativi parametri statistici utili per sviluppare metodi di diagnostica predittiva per l'infrastruttura, come quelli proposta in [5]. Diverse aziende a livello mondiale stanno già sperimentando soluzioni quasi autonome dove i veicoli diagnosticano lo stato dei binari in tempo reale e avviano processi di analisi predittiva senza l'intervento di operatori.

to compliance with the regulations in force for standardised railway vehicles, such as work vehicles, for example, and the process that was followed for the testing of the prototype is described below in VII. Finally, section VIII examines the applications and advantages of this prototype for the railway sector and conclusions will be drawn on the potential evolutions and applications of our solution.

2. State of the art

Railway infrastructure monitoring uses a wide range of advanced technologies, both in Italy and in the rest of the world, to ensure safety and efficiency on high-speed (HS) networks and traditional lines. In Italy, the Italian Railway Network (RFI) uses specialised diagnostic trains such as Dia.Man.Te. 2.0 (Fig. 2), a unit that collects complex real-time data on track wear, contact line quality, track geometry, and LTE/5G connectivity [2]. The Dia.Man.Te 2.0 train is joined by a growing fleet of diagnostic vehicles, including the Falco and Galileo 2.0/DIC-80 models that use laser, optical and ultrasound technologies to detect defects in rails and other infrastructure elements [3]. These data allow predictive maintenance interventions, reducing service interruptions and increasing the longevity of railway infrastructures.

Also internationally, several companies adopt similar diagnostic trains: the New Measurement Train (NMT) in the UK inspects track geometry at high speeds [4], while the TGV Iris 320 in France controls the infrastructure of high-speed lines with laser sensors and high-resolution cameras.

Looking ahead, a possible step forward for the railway sector could be the complete automation of railway vehicles and monitoring and supervision systems, reducing the need for human intervention both for the collection and analysis of data on the infrastructure. Monitoring automation represents an ambitious challenge, but with the increasing ability of artificial intelligence systems and the spread of advanced sensors, it is increasingly feasible.



Figura 2 - Treno Dia.Man.Te. 2.0 di RFI.
Figure 2 - Dia.Man.Te. Train 2.0 of RFI.

Automatizzare il monitoraggio consentirebbe non solo una maggiore frequenza di controllo sulle infrastrutture, ma anche un sistema di manutenzione più reattivo ed efficiente. I treni diagnostici tradizionali, per quanto avanzati, richiedono comunque personale e sono operativi su base periodica; al contrario, soluzioni completamente automatizzate potrebbero offrire una supervisione continua riducendo i rischi di guasti imprevisti e ottimizzando l'allocation delle risorse per la manutenzione.

Lo standard internazionale IEC 62290-1:2014 classifica i livelli di automazione dei sistemi di guida ferroviaria in diversi gradi, denominati GoA (*Grade of Automation*) [6], dal GoA0 (guida manuale) al GoA4 (guida completamente automatica senza personale a bordo). Tuttavia, l'implementazione effettiva del GoA4, soprattutto in contesti di alta velocità e ambienti complessi, rappresenta ancora una sfida non del tutto risolta non solo da un punto di vista tecnico ma in particolare da un punto di vista normativo, dal momento la Comunità Europea ha previsto una graduale introduzione del livello di automazione nel framework normativo ERTMS. Infatti, l'ultima revisione delle specifiche tecniche di interoperabilità per sistemi di comando e controllo CCS TSI, emessa nel 2023, include il sistema ATO ma soltanto fino a GoA2. D'altra parte, l'analisi condotta sulla rete metropolitana delle West Midlands per determinare gli effetti dell'espansione e dell'automazione sulle risorse dei macchinisti, descritta in [7], mette in evidenza che iniziare con l'automazione parziale consente la stabilizzazione dell'infrastruttura, prima di passare a sistemi completamente senza macchinista. La sequenza temporale graduata compensa l'adozione della tecnologia e la gestione del cambiamento.

Attualmente, i treni a guida autonoma sono impiegati con successo in diversi contesti, come le reti metropolitane completamente automatizzate. Queste linee operano senza conducenti, con tecnologie che monitorano in tempo reale la distanza tra i veicoli e gestiscono l'intero processo di viaggio in modo autonomo. Questo livello di automazione GoA4 permette l'operatività senza la presenza di personale a bordo, migliorando la capacità delle linee e riducendo i costi operativi. Tuttavia, mentre i sistemi metropolitani *chiusi* sono già ampiamente automatizzati, l'introduzione di treni autonomi sulle linee ferroviarie principali, che condividono binari con altre tipologie di traffico, rappresenta una sfida più complessa [8]. Alstom, ad esempio, ha presentato a Salzgitter, in Germania, il progetto ARTE (*Autonomous Regional Train Evolution*), che intende mostrare come l'operazione ferroviaria automatizzata e accompagnata può essere implementata nella rete ferroviaria odierna mediante il retrofit dei veicoli. La guida automatizzata proposta nel progetto ARTE richiede sistemi di telecamere per il rilevamento degli ostacoli e, al posto delle apparecchiature ETCS a bordo, un sistema di riconoscimento delle immagini adatto elabora i segnali ferroviari esistenti [9].

Oltre ai treni diagnostici, esistono soluzioni di monitoraggio statiche che supportano il controllo delle infra-

The diagnostics carried out through these measures would thus allow defining the priority of maintenance interventions or having additional tools to apply risk mitigation interventions, such as the reduction of vehicle speed, on the sections with evidence of such types of problems. The analysis of the reference regulations for vehicle approval can be a starting point to identify physical quantities to be monitored and related statistical parameters useful for developing predictive diagnostics methods for the infrastructure, such as those proposed in [5]. Several companies worldwide are already experimenting almost autonomous solutions where vehicles diagnose the conditions of the tracks in real time and start predictive analysis processes without the intervention of operators.

Automating monitoring would allow not only a greater frequency of control over infrastructures, but also a more responsive and efficient maintenance system. Traditional diagnostic trains, although advanced, still require personnel and are operational on a periodic basis; on the contrary, fully automated solutions could offer continuous supervision reducing the risks of unexpected failures and optimising the allocation of resources for maintenance.

*The IEC 62290-1:2014 international standard classifies the levels of automation of railway guidance systems into different grades, called GoA (*Grade of Automation*) [6], from GoA0 (*manual driving*) to GoA4 (*fully automatic driving without personnel on board*). However, the effective implementation of GoA4, especially in high-speed contexts and complex environments, still represents a challenge that has not been fully resolved not only from a technical point of view but in particular from a regulatory point of view, since the European Community has provided for a gradual introduction of the level of automation in the ERTMS regulatory framework. In fact, the latest revision of the command and control systems technical specifications for interoperability CCS TSI, issued in 2023, includes the ATO system but only up to GoA2. On the other hand, the analysis carried out on the West Midlands underground network to determine the effects of expansion and automation on drivers' resources, described in [7], highlights that starting with partial automation allows stabilising the infrastructure, before moving to completely driverless systems. The graduated timeline balances technology adoption and change management.*

*Currently, self-driving trains are successfully employed in different contexts, such as fully automated metro networks. These lines operate without drivers, with technologies that monitor the distance between vehicles in real time and manage the entire travel process autonomously. This level of GoA4 automation allows operation without the presence of personnel on board, improving the capacity of the lines and reducing operating costs. However, while closed metro systems are already largely automated, the introduction of autonomous trains on major railway lines, which share tracks with other types of traffic, represents a more complex challenge [8]. Alstom, for example, presented the ARTE project (*Autonomous Regional Train Evolution*) in Salzgitter, Germany, which aims to show how automated and accom-*

strutture. Sono disponibili, ad esempio, piattaforme che prevedono l'installazione di sensori lungo la linea per raccogliere dati sulla geometria del binario e sulle condizioni degli scambi, trasmettendoli a una piattaforma centralizzata per l'analisi in tempo reale. Un ulteriore esempio è quello di utilizzare carrozze equipaggiate con una sensoristica tale da consentire di rilevare e analizzare i dati infrastrutturali. Questi sistemi, insieme ai treni diagnostici, contribuiscono a un monitoraggio integrato e a un approccio proattivo alla manutenzione ferroviaria.

Le tecnologie chiave includono sensori di visione avanzata, algoritmi di intelligenza artificiale per il riconoscimento degli ostacoli e sistemi di protezione e supervisione automatica del treno (ATC e ATS). Questi miglioramenti puntano a ridurre gli errori umani e ottimizzare l'efficienza delle reti ferroviarie, con vantaggi che includono una maggiore capacità, tempi di percorrenza ridotti e un consumo energetico più contenuto.

Il prototipo URV di Rete Ferroviaria Italiana rappresenta un passo avanti non solo dal punto di vista tecnologico, ma anche normativo: il progetto consente di esplorare e approfondire gli impatti che l'introduzione di questo livello di automazione potrebbe avere sulla regolamentazione ferroviaria nazionale, analizzando le implicazioni in termini di sicurezza, interoperabilità con i sistemi attuali e le sfide infrastrutturali che l'automazione ferroviaria pone. Le tecnologie chiave includono sensori di visione avanzata, algoritmi di intelligenza artificiale per il riconoscimento degli ostacoli e sistemi di protezione e supervisione automatica del treno (ATC e ATS). Questi miglioramenti puntano a ridurre gli errori umani e ottimizzare l'efficienza delle reti ferroviarie, con vantaggi che includono una maggiore capacità, tempi di percorrenza ridotti e un consumo energetico più contenuto.

3. RFI Ricerca e Sviluppo

La Direzione Ricerca e Sviluppo (R&S) di Rete Ferroviaria Italiana (RFI) rappresenta l'evoluzione storica dell'Istituto Sperimentale, fondato nel 1905 su iniziativa dell'allora Direttore Generale delle Ferrovie dello Stato, l'Ing. R. BIANCHI. Questo Istituto, situato nell'edificio della vecchia stazione di Roma Trastevere, fu istituito per rispondere alla necessità della nuova amministrazione ferroviaria di strumenti scientifici e tecnici per il collaudo e il controllo dei materiali impiegati nella costruzione e nella gestione delle infrastrutture ferroviarie. Il primo direttore, l'ingegnere Claudio Segré, avviò l'Istituto Sperimentale verso attività di ricerca e sperimentazione che, in collaborazione con i servizi tecnici interni e tenendo conto dell'innovazione industriale dell'epoca, avrebbero definito le specifiche tecniche e le caratteristiche dei materiali impiegati nella rete ferroviaria nazionale [10].

Attualmente, l'area R&S di RFI è composta da un team di circa 150 professionisti, comprendente ingegneri, informatici e altre figure tecniche altamente specializzate distribuite in quattro diverse sedi sul territorio nazionale:

panied rail operation can be implemented in today's railway network by retrofitting vehicles. The automated driving proposed in the ARTE project requires camera systems for obstacle detection and a suitable image recognition system processes existing railway signals [9], instead of on-board ETCS equipment.

In addition to diagnostic trains, there are static monitoring solutions that support infrastructure control. For example, platforms are available that provide for the installation of sensors along the line to collect data on the track geometry and the conditions of the turnouts, transmitting them to a centralised platform for real-time analysis. A further example is to use carriages equipped with sensors to detect and analyse infrastructure data. These systems, together with diagnostic trains, contribute to integrated monitoring and a proactive approach to railway maintenance.

Key technologies include advanced vision sensors, artificial intelligence algorithms for obstacle recognition, and automatic train protection and supervision systems (ATC and ATS). These improvements aim to reduce human error and optimise the efficiency of railway networks, with benefits including increased capacity, reduced journey times and lower energy consumption.

The URV prototype of Rete Ferroviaria Italiana represents a step forward not only from a technological point of view, but also from a regulatory one: the project allows exploring and deepening the impacts that the introduction of this level of automation could have on national railway regulation, analysing the implications in terms of safety, interoperability with current systems and the infrastructural challenges that railway automation poses. Key technologies include advanced vision sensors, artificial intelligence algorithms for obstacle recognition, and automatic train protection and supervision systems (ATC and ATS). These improvements aim to reduce human error and optimise the efficiency of railway networks, with benefits including increased capacity, reduced journey times and lower energy consumption.

3. RFI Research and development

The Research and Development (R&D) Department of the Rete Ferroviaria Italiana (RFI) represents the historical evolution of the Experimental Institute, founded in 1905 on the initiative of the then General Director of the State Railways, Eng. R. BIANCHI. This Institute, located in the building of the old Roma Trastevere station, was established to respond to the new railway administration's need for scientific and technical instruments for the testing and control of materials used in the construction and management of railway infrastructures. The first director, Eng. C. SEGRÉ, started the Experimental Institute towards research and experimentation activities that would define the technical specifications and the characteristics of the materials used in the national railway network [10] in collaboration with the internal technical services and taking into account the industrial innovation of the time.

Bologna San Donato, Firenze Osmannoro, Napoli Afragola e Roma Portonaccio.

I membri della Direzione Ricerca e Sviluppo (R&S) di RFI conducono attività di ricerca e collaudo sia in laboratorio sia in campo, con particolare attenzione a opere civili e armamento, materiali e prodotti meccanici, elettrici ed elettronici, materiale rotabile e sistemi energetici, come quelli di sottostazione elettrica e catenaria-pantografo. Inoltre, i laboratori R&S sono coinvolti nella progettazione hardware e software per i sistemi di segnalamento, in linea con il Piano Tecnologico di RFI e con l'obiettivo di internalizzare tecnologie strategiche [10]. L'obiettivo è quello di progettare soluzioni che vanno dalla definizione delle specifiche tecniche fino alla certificazione e messa in servizio dei sistemi.

4. Descrizione del progetto URV

Il progetto URV nasce dalla necessità di Direzione Protezione Aziendale del gruppo Ferrovie dello Stato Italiane (oggi confluita nella società FS Security) di incrementare l'efficacia delle procedure di ispezione e la sicurezza delle infrastrutture ferroviarie. L'iniziativa si concretizzò con l'affidamento dell'incarico di Soggetto Tecnico per il progetto al dipartimento di Ricerca e Sviluppo di Rete Ferroviaria Italiana (RFI) con la responsabilità di definire le specifiche di sistema, lo sviluppo, l'integrazione e la fase di test in accordo agli standard del settore ferroviario [11][12][13]. Per completare la missione di ispezione della linea ad alta velocità italiana e mantenere un design compatto e leggero, URV ha un'autonomia di circa 400 km con una velocità target fino a 200 km/h. Tale soluzione consente un consumo di energia ridotto ed al contempo il trasporto della strumentazione necessaria per la sorveglianza, rispettando i rigidi standard di sicurezza richiesti per una linea ferroviaria ad alta velocità (AV) [14].

Come illustrato in (Fig. 3), URV si struttura in più elementi progettuali correlati:

- Sistema SCS (Sistema di Controllo e Sorveglianza), per la rilevazione e il riconoscimento degli ostacoli lungo il percorso dei treni e per il controllo dello stato dell'infrastruttura.
- Sistema ATO over ETCS (o anche ERTMS/ATO) che si compone, appunto, del sistema ATO per il controllo del veicolo e del sistema ETCS di bordo a cui è demandata la supervisione in sicurezza della marcia.
- Sistema di trazione ibrido (HE Hybrid Electric) con batterie SSE LiFePo4 (pacchi batteria litio-ferro-fosfato con elettrolita allo stato solido).

Currently, RFI's R&D area consists of a team of about 150 professionals, including engineers, computer scientists and other highly specialised technical figures distributed in four different locations throughout the country: Bologna San Donato, Florence Osmannoro, Naples Afragola and Rome Portonaccio.

The members of the Research and Development (R&D) Department of RFI conduct research and testing activities both in the laboratory and in the field, with particular attention to civil works and permanent way, mechanical, electrical and electronic materials and products, rolling stock and energy systems, such as those of electrical substation and catenary-pantograph. In addition, R&D laboratories are involved in the hardware and software design for signalling systems, in line with RFI's Technology Plan and with the aim of internalising strategic technologies [10]. The objective is to design solutions ranging from the definition of technical specifications to the certification and placing in service of systems.

4. Description of the URV project

The URV project stems from the need of the Corporate Protection Department of the Ferrovie dello Stato Italiane group (now merged into the company FS Security) to increase the effectiveness of inspection procedures and the safety of railway infrastructures. The initiative materialised with the assignment of the Technical Subject for the project to the Research and Development department of the Rete Ferroviaria Italiana (RFI) with the responsibility of defining the system specifications, development, integration and testing phase in accordance with the standards of the railway sector [11][12][13]. To complete the inspection mission of the Italian high-speed line and maintain a compact and lightweight design, the URV has an autonomy of approximately 400 km with a target speed of up to 200 km/h. This solution allows reduced energy consumption and at the same time the transport of the instrumentation necessary for surveillance, re-

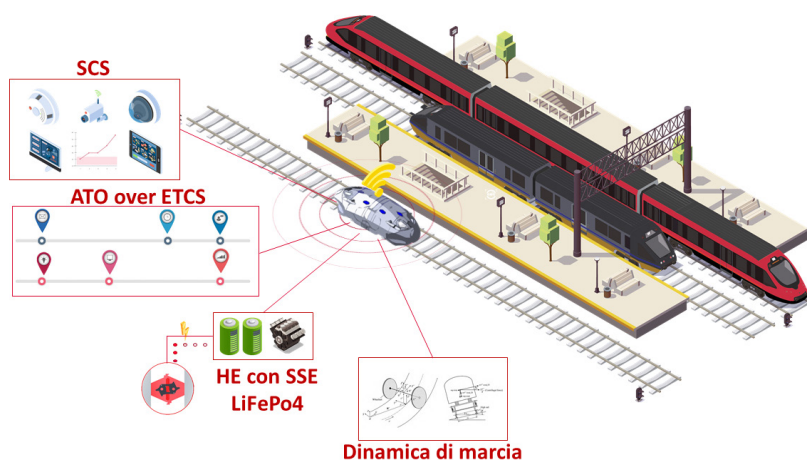


Figura 3 - Sistemi del progetto URV.
Figure 3 - URV project systems.

- d. Dinamica di marcia e valutazione del comportamento dinamico del veicolo legate a scelte progettuali innovative nel settore ferroviario.

Il design del nuovo veicolo si basa su un carrello motore di testa per treni ad alta velocità, conforme agli standard vigenti e alle norme di interoperabilità.

Date le dimensioni ridotte rispetto a quelle di un treno, si è scelto di adottare componenti a bassa tensione (<1000 Vdc), eliminando la necessità di ricorrere all'alimentazione tramite catenaria. Pertanto, si è deciso di optare per un sistema di trazione ibrido, che combina l'utilizzo di due pacchi batteria con un motore diesel, utile sia per estendere l'autonomia operativa fino ai 400 km del requisito di base, sia per potenziare l'alimentazione, riducendo così il carico sul sistema di batterie. Questa configurazione è in grado di combinare le due fonti di energia per ottimizzare prestazioni ed efficienza e garantire che il veicolo possa operare in sicurezza e su lunghe distanze.

Sul carrello è stata progettata e realizzata una struttura in acciaio sulla quale è montata un'unità carenata, che ospita tutti i componenti del sistema di trazione, esclusi i motori, e la strumentazione per il monitoraggio della linea. L'unità carenata è sostenuta da un sistema di sospensioni secondarie, il cui scopo è ridurre le vibrazioni indotte dalla dinamica del veicolo, migliorando così la precisione delle misurazioni dei sensori e aumentando la durata dei componenti (Fig. 4 e Fig. 5).

Equipaggiato con un sistema ERTMS/ATO GoA4 ed un sofisticato sistema di visione a lunga distanza e perimetrale SCS, URV, dopo essere stato opportunamente addestrato con diverse campagne di acquisizione, è progettato per riconoscere elementi topologici di una linea ferroviaria, rilevare anomalie o presenze non autorizzate sui binari.

L'ATO consiste in due sistemi cooperanti: ATO Track-Side (TS) e ATO On-Board (OB). L'ATO-TS rappresenta la componente del sistema di automazione situata lungo la linea ferroviaria e ha il compito di gestire e trasmettere

specting the strict safety standards required for a high-speed (HS) railway line [14].

As illustrated in (Fig. 3), the URV is structured in several related design elements:

- SCS system (Control and Surveillance System), for the detection and recognition of obstacles along the route of trains and for the control of the condition of the infrastructure.
- ATO over ETCS system (or also ERTMS/ATO) which consists, in fact, of the ATO system for the control of the vehicle and the on-board ETCS system which is entrusted with the supervision of safe driving.
- Hybrid traction system (HE Hybrid Electric) with SSE LiFePo4 batteries (lithium-iron-phosphate battery packs with solid state electrolyte).
- Driving dynamics and evaluation of vehicle dynamic behaviour linked to innovative design choices in the railway sector.

The design of the new vehicle is based on a front motorised bogie for high-speed trains, which complies with current standards and interoperability regulations.

Given the small size compared to that of a train, it was decided to adopt low voltage components (<1000 Vdc), eliminating the need to use catenary power. Therefore, it was decided to opt for a hybrid drive system, which combines the use of two battery packs with a diesel engine, useful both to extend the operating range up to 400 km of the basic requirement, and to enhance the power supply, thus reducing the load on the battery system. This configuration can combine the two energy sources to optimise performance and efficiency and ensure that the vehicle can operate safely and over long distances.

A steel structure has been designed and built on the bogie on which a streamlined unit is mounted, which houses all the components of the traction system, excluding the motors, and the instrumentation for monitoring the line. The fairing unit is supported by a secondary suspension system, the purpose of which is to reduce vibrations induced by vehicle dynamics, thus improving the accuracy of sensor measurements and increasing component life (Fig. 4 and Fig. 5).

Equipped with an ERTMS/ATO GoA4 system and a sophisticated SCS long-distance and perimeter vision system, after having been properly trained with several acquisition campaigns, the URV is designed to recognise topological elements of a railway line, detect anomalies or unauthorised presence on the tracks.

The ATO consists of two cooperating systems: ATO Track-Side (TS) and ATO On-Board (OB). The ATO-TS represents the component of the automation sys-



Figura 4 - Vista frontale di TINO (URV).
Figure 4 - Front view of TINO (URV).

dati essenziali per l'operatività autonoma dei treni [15].

Dall'altro lato, l'ATO-OB è il sistema installato a bordo del treno, responsabile dell'interpretazione e dell'esecuzione delle istruzioni ricevute da ATO-TS. Una volta che i dati relativi al percorso, agli orari e alle condizioni di velocità vengono ricevuti, ATO-OB elabora queste informazioni per prendere decisioni in tempo reale riguardo alla gestione della marcia del treno. ATO-OB è equipaggiato con funzionalità avanzate che gli permettono di generare comandi di trazione e frenata ottimizzati, in modo da mantenere la velocità ideale lungo il percorso assegnato.

La posizione del treno è determinata grazie a un continuo monitoraggio mediante odometri ed altri sensori, garantendo che il treno sia sempre localizzato in modo preciso sulla linea ferroviaria [15]. Inoltre, ATO-OB si integra con i sistemi di sicurezza come l'ETCS che si assicura che tutte le operazioni siano eseguite nel rispetto dei limiti di sicurezza previsti, garantendo ad esempio l'attivazione di frenature di emergenza quando necessario o al superamento di velocità critiche.

Grazie ad interfacce operatore dedicate, URV può essere controllato da remoto, offrendo due modalità di guida innovative: nella modalità di guida remota l'operatore, attraverso un sistema di visione in tempo reale, guida il veicolo come se fosse a bordo, garantendo un controllo puntuale e preciso; nella modalità di guida autonoma il sistema ATO prende il comando, ottimizzando la marcia e riducendo i consumi energetici, il tutto supervisionato da un sistema ERTMS/ETCS che assicura la massima sicurezza, gestendo riduzioni di velocità e frenature di emergenza. Oltre a innovare nel campo della sicurezza, URV rappresenta un laboratorio mobile su cui sviluppare e collaudare nuove tecnologie concepite in-house.

Grazie al supporto di prestigiosi partner accademici e industriali, i componenti del prototipo raggiungono il livello di maturità tecnologica (TRL: *Technology Readiness Level*)¹ equivalente a 5 [16]. Successivamente, attraverso il nostro lavoro e una serie di test approfonditi sul prototipo



Figura 5 - Vista laterale di TINO (URV).

Figure 5 - Side view of TINO (URV).

tem located along the railway line and has the task of managing and transmitting data essential for the autonomous operation of trains [15].

On the other hand, the ATO-OB is the system installed on board the train, responsible for the interpretation and execution of the instructions received from ATO-TS. Once route data, timetables and speed conditions are received, ATO-OB processes this information to make real-time decisions about the train operation. ATO-OB is equipped with advanced features that allow it to generate optimised traction and braking commands, in order to maintain the ideal speed along the assigned route.

The position of the train is determined thanks to continuous monitoring by odometers and other sensors, ensuring that the train is always located precisely on the railway line [15]. In addition, ATO-OB integrates with safety systems such as ETCS, which ensures that all operations are carried out in compliance with the safety limits provided, ensuring, for example, the activation of emergency braking when necessary or when critical speeds are exceeded.

Thanks to dedicated operator interfaces, the URV can be controlled remotely, offering two innovative driving modes: in the remote driving mode, the operator guides the vehicle as if it were on board, through a real-time vision system, guaranteeing punctual and precise control; in autonomous driving mode the ATO system takes the lead, optimising driving and reducing energy consumption, all supervised by an ERTMS/ETCS system that ensures maximum safety, managing speed reductions and emergency braking. In addition to innovating in the field of safety, the URV represents a mobile laboratory on which new technologies conceived in-house can be developed and tested.

¹ Il Technology Readiness Level (TRL) è una scala utilizzata per valutare il livello di maturità tecnologica di un'idea, un prodotto o un sistema. È particolarmente utile nei settori della ricerca e dello sviluppo industriale. La scala è composta da nove livelli, che vanno dal concetto iniziale fino all'implementazione e all'uso operativo.

in ambiente controllato, il progetto ha raggiunto il TRL 6, verificando il funzionamento dei sistemi in condizioni di laboratorio.

Attualmente il progetto si trova in una fase avanzata di sviluppo, con le prime prove condotte con successo sul circuito di test di Bologna San Donato di RFI, che stanno avvicinando il prototipo al TRL 7, che corrisponde alla validazione del sistema in un ambiente operativo reale.

5. Sistema di Controllo e Sorveglianza e Sistema di trazione ibrido

Il sistema SCS (Sistema di Controllo e Sorveglianza) è progettato per garantire la sicurezza infrastrutturale rilevando, riconoscendo e tracciando gli ostacoli lungo il percorso dei treni e per controllare lo stato dell'infrastruttura. URV è stato equipaggiato con sensori a rilevamento bi-spettrale, sia a lungo che a corto raggio, capaci di operare su diverse lunghezze d'onda, e telecamere stereoscopiche per la visione tridimensionale. A questi si aggiungono sensori LIDAR (*Laser Imaging Detection and Ranging*), utilizzati per mappare con precisione l'infrastruttura ferroviaria, e algoritmi di visione computerizzata specificamente sviluppati per il prototipo.

Questi algoritmi si basano su modelli *Deep Learning* allo stato dell'arte per il rilevamento dei binari e su *detector* quali YOLO v11 e RetinaNet [17] capaci di individuare specifiche categorie di anomalie, con particolare attenzione ad ostacoli e persone non autorizzate lungo la linea ferroviaria, (Fig. 6). Tali modelli consentono di proiettare l'area di occupazione del veicolo lungo il tracciato dei binari individuati, note le dimensioni del veicolo, (Fig. 7), e la rilevazione in tempo reale degli ostacoli implementando un sistema di allarme che consente al sottosistema ATO di agire tempestivamente.

Il sistema è progettato per operare in qualsiasi condizione meteorologica, comprese pioggia, nebbia e fumo, e di scarsa luminosità. Infatti, le missioni previste per questa tipologia di veicolo sono prevalentemente notturne e in regime di interruzione.

Una delle principali sfide per lo sviluppo di questo sottosistema è la mancanza di *dataset* disponibili e completi che includano immagini RGB² e ter-

² Le immagini RGB sono immagini digitali codificate utilizzando il modello di colore RGB (Red, Green, Blue), che si basa sulla combinazione di tre colori primari della luce: rosso, verde e blu. Questo modello è ampiamente utilizzato nei dispositivi elettronici come monitor, televisori, fotocamere digitali e smartphone.

Thanks to the support of prestigious academic and industrial partners, the components of the prototype reach the level of technological maturity (TRL: Technology Readiness Level)¹ equivalent to 5 [16]. Subsequently, through our work and a number of in-depth tests on the prototype in a controlled environment, the project reached TRL 6, verifying the operation of the systems under laboratory conditions.

The project is currently at an advanced stage of development, with the first successful tests conducted on RFI's Bologna San Donato test circuit, which are bringing the prototype closer to TRL 7, that corresponds to the validation of the system in a real operating environment.

5. Control and Surveillance System and Hybrid Drive System

The SCS system (Control and Surveillance System) is designed to ensure infrastructure safety by detecting, recognising and tracking obstacles along the route of trains and to check the conditions of the infrastructure. The URV has been equipped with bi-spectral detection sensors, both long and short range, capable of operating on different wavelengths, and stereoscopic cameras for three-dimensional vision. In addition to these are the LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging) sensors, used to accurately map railway infrastructure, and computer vision algorithms specifically developed for the prototype.

These algorithms are based on Deep Learning

¹ The Technology Readiness Level (TRL) is a scale used to assess the level of technological maturity of an idea, a product or a system. It is particularly useful in the fields of research and industrial development. The scale consists of nine levels, ranging from initial concept to implementation and operational use.



Figura 6 - Rilevazione ostacoli del sistema SCS.
Figure 6 - Obstacle detection of the SCS system.

miche per l'addestramento dei detector sopra citati adattandoli all'ambito ferroviario. La maggior parte dei dataset esistenti, infatti, proviene da applicazioni militari e non sono accessibili pubblicamente.

Pertanto, non disponendo di questi dataset, l'addestramento delle reti è condotto mediante la costruzione di nuovi dataset specifici con tecniche di *data augmentation* [18] su filmati già disponibili di riprese video di missioni di veicoli ferroviari e dataset costruiti mediante campagne di acquisizione ad hoc condotte sul circuito di Bologna San Donato. Anche in questo caso vengono utilizzate tecniche AI all'avanguardia come i *Diffusion Model* che sono in grado di generare di oggetti e persone in immagini sia RGB sia termiche. Inoltre, il sistema SCS si interfaccia col sistema ATO trasmettendo segnali al sistema di guida che regola la velocità del veicolo in base alle condizioni rilevate. In caso di ostacoli lungo la linea, il sistema SCS è in grado di inviare segnali che arrestano automaticamente il veicolo, garantendo così la massima sicurezza operativa.

Il sistema di trazione ibrido serie è costituito da tutti i componenti che generano la potenza necessaria da trasferire alle ruote del veicolo. In particolare, il sistema è composto da moduli distinti, progettati per consentire la connessione o disconnessione di specifici sottosistemi, garantendo un alto grado di riconfigurabilità. La caratteristica principale di un tale sistema di trazione prevede la presenza di quattro componenti fondamentali: pacchi batteria, motori elettrici, motore endotermico e un generatore elettrico (Fig. 8).

I motori elettrici sono gli unici componenti che forniscono trazione alle ruote, mentre il motore endotermico opera esclusivamente come *Range Extender*, generando energia elettrica per ricaricare le batterie. Quest'ultime, con composizione chimica litio-ferro-fosfato con elettrolita allo stato solido, sono abbinate ad un sistema di gestione delle batterie BMS (*Battery Management System*). La taglia delle batterie in termini di numero di pacchi e loro capacità è stata definita a valle della scelta del livello di ibridazione adottato per il veicolo. Per la costituzione del gruppo motore termico - generatore elettrico, si è fatto riferimento ad un motore diesel industriale accoppiato ad un motore elettrico, avente funzione di generatore. Quest'ultimo è del tipo ad induzione raffreddato ad acqua, soluzione che ha consentito di contenere peso e dimensioni.

6. Sfide e soluzioni adottate

Sviluppare il primo veicolo autonomo senza conduttore per le linee ad alta velocità italiane comporta sfide

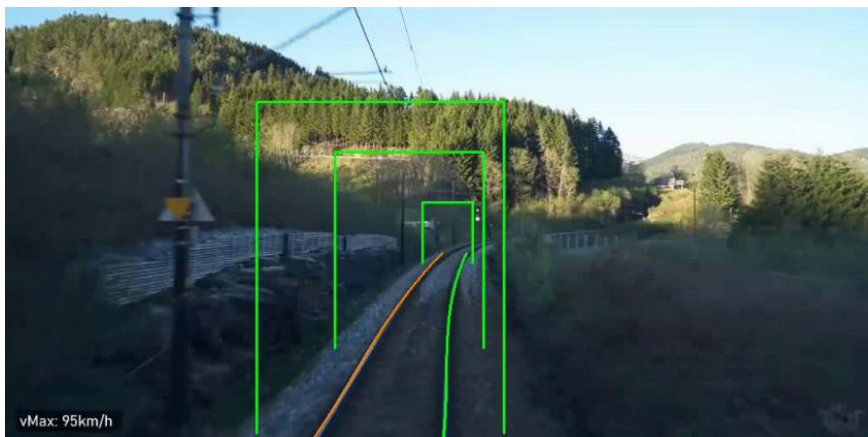


Figura 7 – Valutazione algoritmo SCS con velocità massima a 95 km/h.
Figure 7 – SCS algorithm evaluation with maximum speed at 95 km/h.

State-of-the-art models for track detection and on detectors such as YOLO v11 and RetinaNet [17] capable of identifying specific categories of anomalies, with particular attention to obstacles and unauthorised persons along the railway line, (Fig. 6). Such models allow to project the area of occupation of the vehicle along the path of the tracks identified, knowing the dimensions of the vehicle, (Fig. 7), and the real-time detection of obstacles by implementing an alarm system that allows the ATO subsystem to act promptly.

The system is designed to operate in all weather conditions, including rain, fog and smoke, and low light. In fact, the missions planned for this type of vehicle are mainly at night and in interruption mode.

One of the main challenges for the development of this subsystem is the lack of available and complete datasets that include RGB² and thermal images for the training of the aforementioned detectors, adapting them to the railway environment. Most of the existing datasets, in fact, come from military applications and are not publicly accessible.

Therefore, since these datasets are not available, training of the networks is carried out by building new specific datasets with data augmentation techniques [18] on already available video footage of railway vehicle missions and datasets built through ad hoc acquisition campaigns conducted on the Bologna San Donato circuit. In this case also, cutting-edge AI techniques are used such as Diffusion Models that can generate objects and people in both RGB and thermal images. In addition, the SCS system interfaces with the ATO system by transmitting signals to the driving system which adjusts the vehicle speed according to the de-

² RGB images are digital images encoded using the RGB (Red, Green, Blue) colour model, which is based on the combination of three primary colours of light: red, green, and blue. This model is widely used in electronic devices such as monitors, televisions, digital cameras and smartphones.

significative, non solo dal punto di vista tecnico, ma anche da quello normativo dal momento che risulta complesso verificare la conformità con le normative vigenti per veicoli ferroviari standardizzati, come mezzi d'opera ad esempio. Diverse sono le caratteristiche che distinguono URV da un veicolo ferroviario convenzionale a partire dall'assenza di spazio per il personale a bordo. Dimostrare che i veicoli senza equipaggio sulla linea ferroviaria non introducono potenziali pericoli, ma rappresentano un'opportunità per migliorare significativamente il monitoraggio dell'infrastruttura ferroviaria, è stato molto complesso. Questa sfida ha richiesto la formulazione un'analisi approfondita dei rischi (*hazard analysis*) in relazione ai requisiti tecnici del mezzo URV per identificare potenziali pericoli associati all'operatività del veicolo. Il processo di analisi dei rischi è stato sviluppato in conformità con il Safety-Life-Cycle previsto dalla Norma [11]. Il processo di identificazione, classificazione e mitigazione dei rischi è istruito secondo la EN 50126:2018 modificato dalla Disposizione RFI N° 51 2007. L'*hazard analysis*, finora condotta, è relativa alle fasi 2 e 3 del *Safety-Life-Cycle* descritto in [11]. A valle dell'analisi sono stati prodotti requisiti aggiuntivi, in particolare per il sistema ATO. Il processo continuerà ad essere applicato in fasi successive di progetto in accordo al programma previsto per la certificazione di tutte le componenti del mezzo URV.

Sono state sviluppate, inoltre, strategie di test specifiche per le prove in linea, focalizzate sulla sicurezza del personale durante le fasi di collaudo.

Dal punto di vista tecnico, l'integrazione di componenti meccaniche, elettriche ed informatiche ha richiesto un grande sforzo multidisciplinare, di coordinamento e collaborazione. La frammentazione del progetto, sebbene abbia introdotto complessità nel processo di gestione e nella fase di integrazione, si è rivelata una scelta strategica ben ponderata. Questo approccio ha permesso di mantenere, in ogni fase dell'evoluzione del prototipo, il *know-how* sistemistico all'interno del gruppo di RFI Ricerca e Sviluppo, alimentando la crescita e l'internalizzazione delle competenze tecnico-ingegneristiche legate alla meccanica di veicolo e al segnalamento ferroviario evitando che singoli partner acquisissero un controllo eccessivo su competenze fondamentali.

7. Sviluppo e sperimentazione del prototipo

7.1. Sviluppo

Lo sviluppo ha richiesto un approccio collaborativo e interdisciplinare e per tale motivo, è stata adottata una

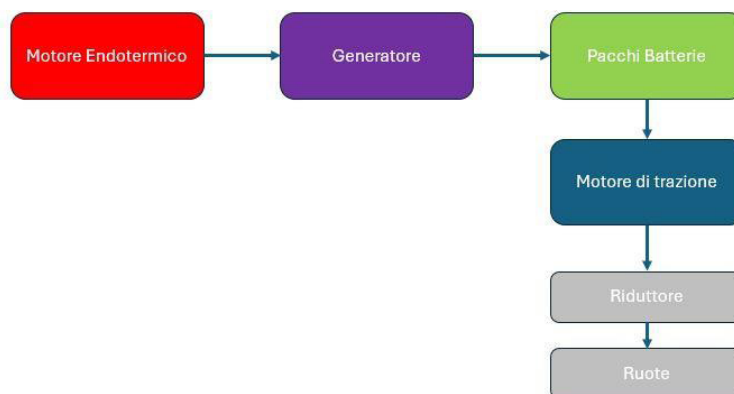


Figura 8 - Schema sistema di trazione ibrido-serie.
Figure 8 - Hybrid-series traction system diagram.

tested conditions. In case of obstacles along the line, the SCS system is able to send signals that automatically stop the vehicle, thus ensuring maximum operational safety.

The series hybrid drive system consists of all the components that generate the necessary power to be transferred to the vehicle's wheels. In particular, the system is composed of distinct modules, designed to allow connecting or disconnecting specific subsystems, ensuring a high degree of reconfigurability. The main feature of such a traction system involves the presence of four fundamental components: battery packs, electric motors, endothermic motor and an electric generator (Fig. 8).

Electric motors are the only components that provide traction to the wheels, while the endothermic motor operates exclusively as a Range Extender, generating electricity to recharge the batteries. The latter, with lithium-iron-phosphate chemical composition with solid state electrolyte, are combined with a Battery Management System (BMS). The size of the

batteries in terms of the number of packs and their capacity was defined after the choice of the

hybridisation level adopted for the vehicle. Reference was made to an industrial diesel engine coupled to an electric motor, having the function of a generator for the constitution of the thermal engine - electric generator unit. The latter is of the water-cooled induction type, a solution that has allowed containing weight and dimensions.

6. Challenges and solutions adopted

Developing the first driverless autonomous vehicle for Italian high-speed lines involves significant challenges, not only from a technical point of view, but also from a regulatory one since verifying compliance with the regulations in force for standardised railway vehicles, such as construction vehicles for example is very complex. There are several characteristics that distinguish the URV from a conventional railway vehicle, starting with the absence of space for on-

metodologia basata su modelli, in modo da facilitare il co-design e la sinergia tra team con competenze diversificate. L'ente di ricerca Fondazione Bruno Kessler, l'Università degli Studi di Napoli Federico II, l'Università degli Studi di Salerno e il Politecnico di Bari hanno lavorato con RFI al sistema ATO. Per i sistemi di visione hanno contribuito l'Università di Salerno e l'Università degli Studi di Firenze mentre il Politecnico di Milano ha fornito il supporto per la progettazione meccanica.

Con una progettazione distribuita, è di fondamentale importanza progettare un'architettura robusta e stabile, in cui le interfacce tra i diversi moduli siano ben definite e condivise con tutti i partner. A tal proposito, sono stati formalizzati gli scenari operativi in diagrammi di sequenza, che fanno strettamente riferimento alla decomposizione architetturale, e sono stati poi utilizzati per guidare l'implementazione dei componenti e per eseguire test di unità e integrazione. Lo sviluppo è guidato da un insieme di requisiti in continua evoluzione e da una serie di scenari operativi che specificano alcune missioni reali che il sistema deve soddisfare. I requisiti sono stati raggruppati in base alla funzionalità e sono stati identificati i corrispondenti moduli responsabili della gestione dell'insieme delle funzionalità assegnate.

Dato l'alto livello di affidabilità richiesto, per la progettazione sono stati utilizzati strumenti come ANSYS SCAD Suite e Architect, che offrono capacità di generazione di codice qualificabile/certificato per applicazioni *safety critical*.

7.2. Metodologia di test

L'obiettivo di un ambiente di test è fornire uno spazio di lavoro in grado di eseguire le logiche del sottosistema e generare tutti gli stimoli forniti da un sottosistema esterno. Per collaudare le funzioni di URV, sono stati definiti quattro diversi ambienti di prova, per validare la progettazione software e hardware: 1) ambiente di test del sottosistema '*Subsystem Test Environment*' (STE); 2) ambiente di test di integrazione del sottosistema '*Subsystem Integration Test Environment*' (SITE); 3) ambiente di test su banco a rulli '*Roller Bench Test Environment*' (RBTE); 4) ambiente di test pilota '*Pilot Test Environment*' (PTE) [19]. La configurazione STE testa le logiche reali del sottosistema ed emula via software i sistemi esterni. Le condizioni al contorno del software fornite dai sistemi esterni sono modellate con tecniche di metodi formali e un approccio basato su modelli, con il supporto di ambienti di sviluppo specifici (Matlab, Simulink e SCAD). Nel SITE si sostituiscono alcuni dei sottosistemi emulati dallo STE con quelli reali ed altri sottosistemi o dispositivi URV di basso livello sono invece emulati. Il SITE consente di eseguire test di integrazione dei sottosistemi, programmati per realizzare scenari nominali URV come l'inizializzazione del sistema, la configurazione della missione, la guida autonoma e remota, la rilevazione delle anomalie e le reazioni di guida. Si citano, ad esempio, gli ambienti di prova STE e SITE delle sedi di

board personnel. It was very complex to demonstrate that unmanned vehicles on the railway line do not introduce potential hazards but represent an opportunity to significantly improve the monitoring of railway infrastructure. This challenge required the formulation of an in-depth risk analysis (hazard analysis) in relation to the technical requirements of the URV vehicle to identify potential hazards associated with the operation of the vehicle. The risk analysis process has been developed in accordance with the Safety-Life-Cycle required by the Standard [11]. The risk identification, classification and mitigation process is prepared according to EN 50126:2018 as amended by RFI Provision No. 51 2007. The hazard analysis, so far conducted, relates to phases 2 and 3 of the Safety-Life-Cycle described in [11]. Additional requirements were produced downstream of the analysis, in particular for the ATO system. The process will continue to be applied in subsequent phases of the project in accordance with the programme provided for the certification of all the components of the URV.

Specific test strategies have also been developed for in-line tests, focused on the safety of personnel during the testing phases.

From a technical point of view, the integration of mechanical, electrical and IT components required great multidisciplinary effort, coordination and collaboration. Despite it introducing complexity in the management process and in the integration phase, the fragmentation of the project proved to be a well-thought-out strategic choice. This approach has allowed maintaining the system know-how within the RFI Research and Development group, at every stage of the evolution of the prototype, fuelling the growth and internalisation of technical-engineering skills related to vehicle mechanics and railway signalling, preventing individual partners from acquiring excessive control over fundamental skills.

7. Development and testing of the prototype

7.1. Development

The development required a collaborative and interdisciplinary approach and for this reason, a model-based methodology was adopted, in order to facilitate co-design and synergy between teams with diverse skills. The research institution Fondazione Bruno Kessler, the University of Naples Federico II, the University of Salerno and the Polytechnic University of Bari worked with RFI on the ATO system. The University of Salerno and the University of Florence contributed to the vision systems, while the Politecnico di Milano provided support for the mechanical design.

With distributed design, it is of paramount importance to design a robust and stable architecture, in which the interfaces between the different modules are well defined and shared with all partners. In this regard, operational scenarios were formalised in sequence diagrams, which strictly refer to architectural decomposition, and were then used to guide the implementation of the components and to perform unit and integration tests. Development is driven by a con-

Ricerca e Sviluppo di Napoli Afragola (Fig. 9), dove sono stati eseguiti test di componente e di integrazione di ATO e dei laboratori di Roma Portonaccio (Fig. 9) dove si è testata l'integrazione del sistema ATO col bordo ETCS. Il RBTE di Firenze Osmannoro (Fig. 9) è stato opportunamente configurato per ospitare il prototipo URV e per eseguire i primi test dinamici. Il movimento del veicolo è stimolato dal banco a rulli che, con dei rulli motorizzati, emula un binario infinito. In tal modo, i test vengono eseguiti simulando la guida e le reali coppie di resistenza applicate alle ruote del veicolo. Per i test PTE, è stato utilizzato il circuito di RFI di Bologna San Donato (Fig. 9), uno dei principali laboratori in Europa attrezzato per i test su rotaia per l'omologazione e la certificazione di materiale rotabile e per la sperimentazione e il collaudo di prodotti tecnologici ferroviari. I test vengono eseguiti sotto la protezione fornita dai sistemi ERTMS/ETCS e sotto la supervisione del personale tecnico di RFI. Gli scenari operativi di URV saranno controllati dalle interfacce uomo-macchina dedicate.

7.3. STE/SITE

Il primo step fondamentale per validare la progettazione software e hardware è stato testare singolarmente ogni sottosistema (STE)³. Questo approccio permette di identificare e risolvere eventuali problemi già a livello del

³ 'Subsystem Test Environment', ambiente di test del sottosistema.

stantly evolving set of requirements and a set of operational scenarios that specify some real missions that the system needs to meet. The requirements have been grouped according to the functionality and the corresponding modules responsible for managing the set of assigned functionalities have been identified.

Given the high level of reliability required, tools such as ANSYS SCADE Suite and Architect were used for the design, which offer qualifiable/certified code generation capabilities for safety critical applications.

7.2. Test Methodology

The goal of a test environment is to provide a workspace capable of executing the subsystem logics and generating all the stimuli provided by an external subsystem. To test the URV functions, four different test environments were defined, to validate the software and hardware design: 1) Subsystem Test Environment (STE); 2) Subsystem

Integration Test Environment (SITE); 3) Roller Bench Test Environment (RBTE); 4) Pilot Test Environment (PTE) [19]. The STE configuration tests the real logic of the subsystem and emulates the external systems via software. The software boundary conditions provided by external systems are modelled with formal methods techniques and a model-based approach, with the support of specific development environments (Matlab, Simulink and SCADE). In the SITE, some of the subsystems emulated by the STE are replaced with real ones and other subsystems or low-level URV devices are instead emulated. The SITE allows performing subsystem integration tests, programmed to realise nominal

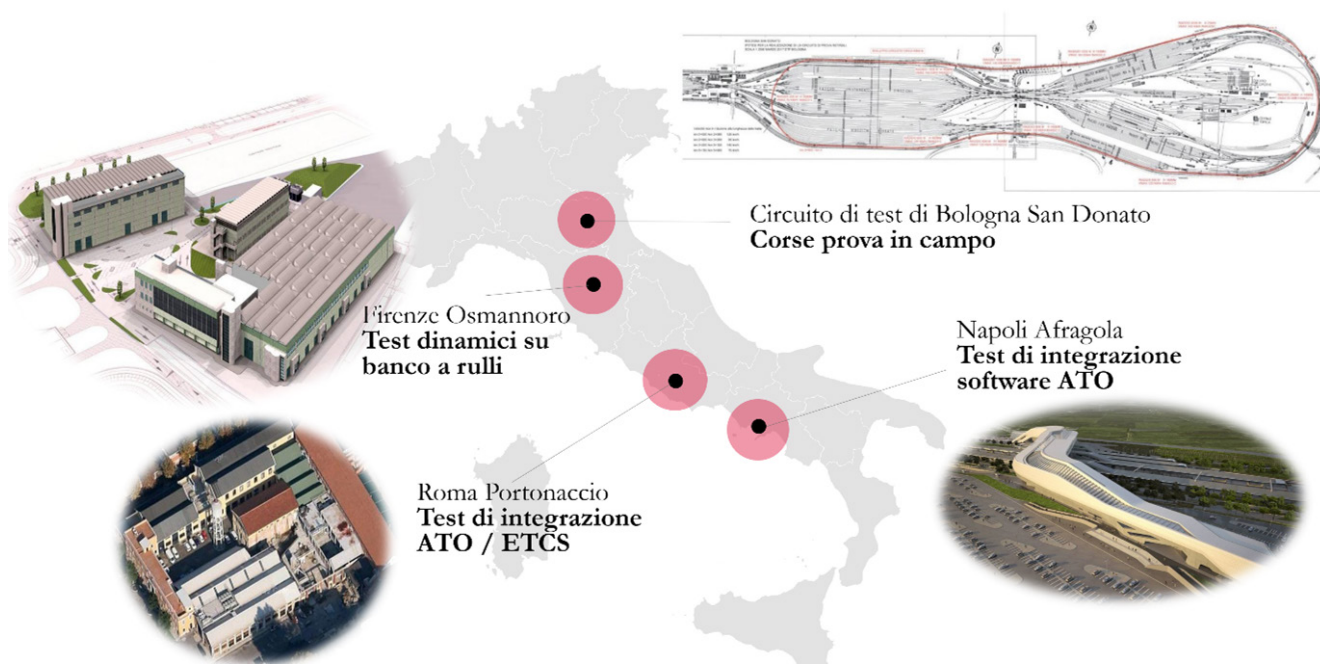


Figura 9 - Laboratori di Ricerca e Sviluppo (RFI).
Figure 9 - Research and Development Laboratories (RFI).

singolo modulo, assicurando così una base solida per i successivi passi di integrazione.

Una volta completati con successo i test sui singoli sottosistemi, si è passati a un ambiente di test di integrazione (SITE)⁴. In questa fase, l'integrazione dei sottosistemi è valutata attraverso due approcci complementari: *Software-In-the-Loop* (SiL) e *Hardware-In-the-Loop* (HiL):

7.3.1. L'approccio "Software-in-the-Loop"

(SiL) permette di validare il software e consente processi di sviluppo più rapidi, sicuri e convenienti. I modelli SiL consistono nella suddivisione del sistema in più parti che vengono simulate in uno o più computer in tempo reale;

7.3.2. I test "Hardware-in-the-Loop"

(HiL) permettono di validare non solo il software, ma anche l'hardware reale. Mentre i test SiL si concentrano sulla simulazione del software e delle sue funzioni in un ambiente virtuale, HiL integra l'hardware fisico, consentendo di verificare come il software interagisce effettivamente con i componenti reali. Questo aspetto è fondamentale per assicurarsi che le interfacce tra hardware e software funzionino correttamente e che non emergano problemi relativi alla comunicazione, ai tempi di risposta o alle prestazioni, difficili da rilevare con una simulazione puramente software.

Nel dettaglio, per il prototipo URV sono state individuate tre configurazioni (Fig. 10) da testare:

- (a) Configurazione 1 "SiL" coinvolge solo il livello del codice applicativo. Il codice viene testato nell'ambiente di simulazione/testing di SCADE Suite su un unico PC.
- (b) Configurazione 2 "SiL avanzata" estende la configurazione 1 "SiL" includendo i livelli adattatore e protocolli. Il codice viene eseguito su host, introducendo l'esecuzione asincrona dei sottosistemi e l'interazione con i servizi, ad esempio il servizio di logging.
- (c) Configurazione 3 "HiL" aggiunge i livelli dei driver dei dispositivi e del sistema operativo target. Ogni sottosistema viene eseguito sul target appropriato utilizzando dispositivi reali. La configurazione 3 è ulteriormente suddivisa in un insieme di sotto-configurazioni (3a, 3b, ecc.) che integrano progressivamente parti sempre più grandi del sistema fisico finale.

È stata individuata una serie di scenari operativi che dovevano essere rigorosamente testati per garantire il corretto funzionamento del sistema in diverse condizioni. Ogni scenario veniva inizialmente testato nella configurazione 1 SiL, che consente di simulare il comportamento del software senza il coinvolgimento dell'hardware reale.

URV scenarios such as system initialisation, mission configuration, autonomous and remote driving, anomaly detection and driving reactions. Mention is made, for example, of the STE and SITE test environments of the Research and Development offices in Naples Afragola (Fig. 9), where component and ATO integration tests were carried out, and of the laboratories in Rome Portonaccio (Fig. 9) where the integration of the ATO system with the ETCS board was tested. The RBTE in Florence Osmannoro (Fig. 9) has been suitably configured to host the URV prototype and to perform the first dynamic tests. The movement of the vehicle is stimulated by the roller bench which emulates an infinite track with motorised rollers. In this way, the tests are performed by simulating the driving and the real resistance torques applied to the wheels of the vehicle. For the PTE tests, the RFI circuit of Bologna San Donato was used (Fig. 9), one of the main laboratories in Europe equipped for rail tests for the approval and certification of rolling stock and for the experimentation and testing of railway technological products. Tests are performed under the protection provided by ERTMS/ETCS systems and under the supervision of RFI technical staff. The URV operating scenarios will be controlled by the dedicated human-machine interfaces.

7.3. STE/SITE

The first fundamental step to validate the software and hardware design was to individually test each subsystem (STE)³. This approach allows identifying and solving any problems already at the level of the single module, thus ensuring a solid basis for the subsequent integration steps.

Once the tests on the individual subsystems were successfully completed, we moved on to an integration test environment (SITE)⁴. At this stage, subsystem integration is assessed through two complementary approaches: Software-In-the-Loop (SiL) and Hardware-In-the-Loop (HiL):

7.3.1. The "Software-in-the-Loop"

(SiL) approach enables software to be validated and allows faster, safer and more cost-effective development processes. SiL models consist of the division of the system into several parts that are simulated in one or more computers in real time;

7.3.2. "Hardware-in-the-Loop"

(HiL) tests allow validating not only the software, but also the actual hardware. While SiL testing focuses on simulating software and its functions in a virtual environment, HiL integrates physical hardware, allowing you to see how the software actually interacts with real components. This is essential to ensure that the interfaces between hardware and

⁴ 'Subsystem Integration Test Environment', ambiente di test di integrazione del sottosistema.

³ 'Subsystem Test Environment'.

⁴ 'Subsystem Integration Test Environment'.

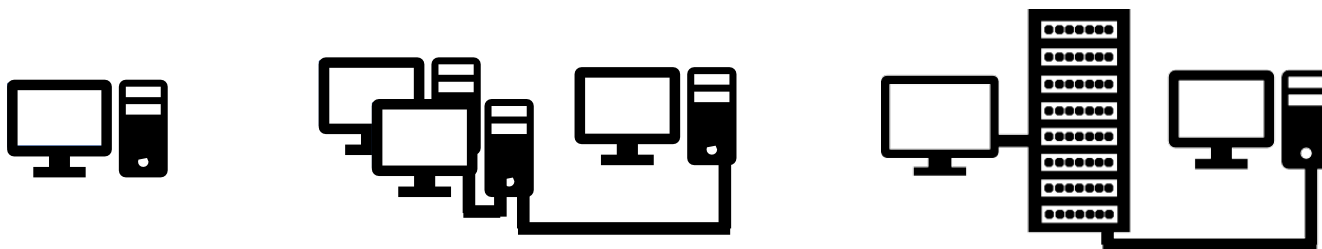


Figura 10 - Da sinistra verso destra, una rappresentazione grafica di Configurazione 1 “SiL”, Configurazione 2 “SiL avanzata” e Configurazione 3 “HiL”.

Figure 10 - From left to right, a graphical representation of Configuration 1 “SiL”, Configuration 2 “Advanced SiL” and Configuration 3 “HiL”.

Una volta ottenuti risultati soddisfacenti in configurazione 1 “SiL” e configurazione 2 “SiL avanzata”, si passava al testing in configurazione 3 “HiL”, che integra parte dell’hardware per verificare ulteriormente le interazioni tra i componenti. Questo approccio graduale ha permesso di raggiungere un grado di maturità tecnologica TRL 5 prima di procedere ai test sul veicolo reale. In questo modo, oltre a garantire maggiore sicurezza ed efficienza, sono stati ridotti i costi e i rischi legati al testing diretto sul veicolo fisico, che ha una disponibilità limitata e comporta maggiori oneri operativi.

7.4. Banco a rulli

Il banco a rulli dell’impianto di Firenze Osmannoro di RFI (Fig. 11) è uno strumento avanzato per effettuare test ad alta velocità su veicoli ferroviari, fino a un massimo di 400 km/h. Posizionato all’interno di una camera semi-anecoica che consente di bloccare rumore o radiazione elettromagnetica proveniente dall’esterno, garantendo che le misurazioni siano precise e non influenzate da fattori esterni, il sistema permette di verificare le prestazioni dei sistemi di trazione, la dinamica di marcia e i sistemi frenanti. Inoltre, è utilizzato per test su sistemi antislittamento e prove di compatibilità elettromagnetica. Questo banco consente anche simulazioni in condizioni reali su veicoli con trazione da 1.500 Vcc a 25 kVca, rendendolo un elemento cruciale per la validazione delle tecnologie ferroviarie. Quando il veicolo testato è una locomotiva elettrica, alimentata a qualsiasi tensione di trazione dalla catenaria rigida, è possibile determinare anche le intensità e le caratteristiche delle emissioni elettromagnetiche.

A seguito della campagna di test SITE, ci si è spostati sul banco a rulli (RBTE)⁵. URV è stato posizionato sul banco e vincolato in direzione longitudinale con dei vincoli fissi per garantirne la stabilità durante le prove. Sono state montate delle piattaforme su entrambi i lati del veicolo, consentendo un facile accesso ai sottosistemi di bordo per

software work properly and that there are no communication, response time or performance issues that are difficult to detect with a purely software simulation.

In detail, three configurations have been identified to be tested for the URV prototype (Fig. 10):

- (a) Configuration 1 “SiL” involves only the application code level. The code is tested in the SCADE Suite simulation/testing environment on a single PC.
- (b) Configuration 2 “Advanced SiL” extends configuration 1 “SiL” including adapter levels and protocols. The code is executed on hosts, introducing asynchronous execution of subsystems and interaction with services, for example the logging service.
- (c) Configuration 3 “HiL” adds the device driver levels and the target operating system. Each subsystem is run on the appropriate target using real devices. Configuration 3 is further subdivided into a set of sub-configurations (3a, 3b, etc.) that progressively integrate increasingly larger parts of the final physical system.

A number of operational scenarios were identified that had to be rigorously tested to ensure the correct operation of the system under different conditions. Each scenario was initially tested in the 1 SiL configuration, which allows simulating the behaviour of the software without involving real hardware.

Once satisfactory results were obtained in configuration 1 “SiL” and configuration 2 “Advanced SiL”, we moved on to testing in configuration 3 “HiL”, which integrates part of the hardware to further verify the interactions between the components. This gradual approach allowed reaching a degree of technological maturity TRL 5 before proceeding with the tests on the real vehicle. In this way, besides ensuring greater safety and efficiency, the costs and risks associated with direct testing on the physical vehicle were reduced, which has limited availability and entails higher operating costs.

7.4. Roller bench

The roller bench at RFI’s Osmannoro plant in Florence (Fig. 11) is an advanced tool for carrying out high-speed tests on railway vehicles, up to a maximum of 400 km/h.

⁵ ‘Roller Bench Test Environment’, ambiente di test su banco a rulli.

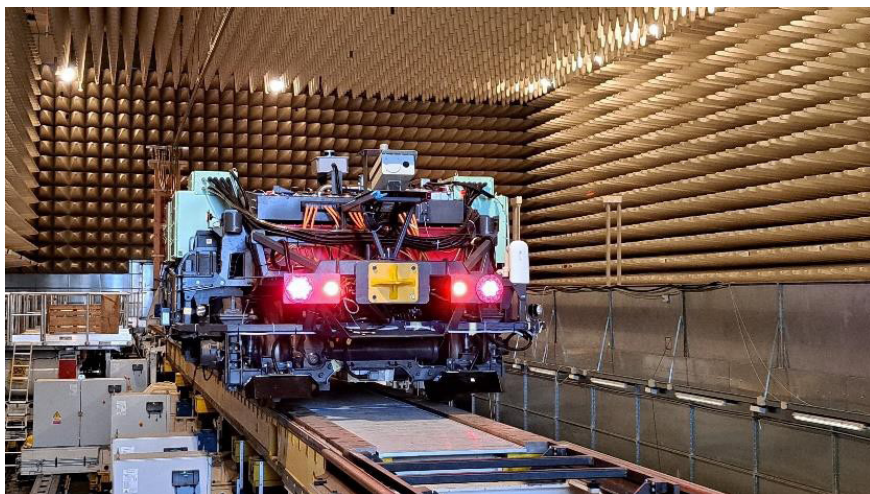


Figura 11 – URV in prova sul banco a rulli dell’Impianto di Firenze Osmannoro (RFI)

Figure 11 – URV test on the roller bench of the Osmannoro Florence Plant (RFI).

monitorare in tempo reale la diagnostica e il funzionamento dei sistemi.

In questa configurazione, è stata condotta una campagna di test intensiva per verificare il corretto funzionamento degli apparati treno e l’interfacciamento con il sistema di segnalamento di bordo. Dapprima sono state condotte prove a velocità progressivamente crescenti per monitorare il comportamento degli apparati treno. L’attenzione si è concentrata sulla curva caratteristica del motore, sul monitoraggio delle vibrazioni e sulle prestazioni del sistema di trazione. Questi test sono stati cruciali per valutare la risposta dinamica del veicolo e garantire che il sistema operasse correttamente anche a velocità elevate.

Successivamente, si è passati ad una campagna di test esaustiva sul sistema ATO, essenziale per la gestione autonoma del veicolo. Inoltre, attraverso l’uso di un apposito laboratorio di test ERTMS/ETCS, è stato possibile generare e trasmettere i telegrammi provenienti da una balise posizionata sotto il veicolo per stimolare il sottosistema ETCS di bordo, al fine di simulare diverse condizioni operative.

Questa metodologia ha permesso di verificare che il sistema rispondesse correttamente a tutte le situazioni previste durante la guida autonoma. I test hanno contribuito a validare e ottimizzare l’interazione tra URV e il sistema di segnalamento, riducendo potenziali criticità e garantendo una piena efficienza operativa del sistema nel suo complesso.

7.5. Corse prova a San Donato

Il circuito di San Donato di RFI (Fig. 12), situato nei pressi di Bologna, è un’infrastruttura dedicata alla sperimentazione e al collaudo di sistemi e tecnologie ferroviarie. Con una lunghezza di 5,749 metri, il circuito consente

Positioned inside a semi-anechoic chamber that allows blocking noise or electromagnetic radiation from the outside, ensuring that the measurements are accurate and not influenced by external factors, the system allows verifying the performance of the traction systems, the driving dynamics and the braking systems. In addition, it is used for tests on anti-slip systems and electromagnetic compatibility tests. This bench also allows simulations in real conditions on vehicles with traction from 1,500 Vdc to 25 kVac, making it a crucial element for the validation of railway technologies. When the vehicle tested is an electric locomotive, powered at any traction voltage by the rigid catenary, the intensities and characteristics of the electromagnetic emissions can also be determined.

Following the SITE test campaign, we moved to the roller bench (RBTE)⁵.

The URV was placed on the bench and constrained in the longitudinal direction with fixed constraints to ensure its stability during the tests. Platforms were mounted on both sides of the vehicle, allowing easy access to the on-board subsystems to monitor the diagnostics and operation of the systems in real time.

In this configuration, an intensive test campaign was conducted to verify the correct operation of the train equipment and the interface with the onboard signalling system.

First, tests were carried out at progressively increasing speeds to monitor the behaviour of the train equipment. The focus was on the engine characteristic curve, vibration monitoring and traction system performance. These tests were crucial to assess the vehicle’s dynamic response and ensure that the system operated correctly even at high speeds.

Subsequently, we moved on to an exhaustive test campaign on the ATO system, essential for the autonomous management of the vehicle. In addition, through the use of a special ERTMS/ETCS test laboratory, telegrams from a transponder positioned under the vehicle to stimulate the on-board ETCS subsystem could be generated and transmitted, in order to simulate different operating conditions.

This methodology allowed verifying that the system responded correctly to all the situations expected during autonomous driving. The tests helped validating and optimising the interaction between the URV and the signalling system, reducing potential criticalities and ensuring full operational efficiency of the system as a whole.

⁵ ‘Roller Bench Test Environment’.

prove su binario unico, includendo anche curve con raggi di 600, 350 e 200 metri. Il sito è equipaggiato con binari elettrificati e non, officine, magazzini e depositi, permettendo test completi su armamento, linee elettriche, scambi ferroviari, veicoli e sistemi di segnalamento.

Il circuito permette la validazione di tecnologie innovative in condizioni operative.

Scopo di questa campagna di test preliminare è stata collaudare le funzioni di guida integrate con il sottosistema di bordo ERTMS (*European Railway Traffic Management System*), le funzioni di terra ATO e le funzioni del sistema di bordo e di terra di gestione dei video acquisiti dalle telecamere (Sistema di Controllo e Sorveglianza) nonché la gestione degli azionamenti e della frenatura tramite TCU (*Train Control Unit*).

Inoltre, bisognava validare la progettazione meccanica del mezzo, mediante prove dinamiche in campo, anche al fine di consolidare le scelte progettuali emerse dai test su banco a rulli. I test meccanici sono, inoltre, finalizzati a verificare la validità della progettazione dal punto di vista della sagoma limite e verificare l'insorgenza di moti oscillatori indesiderati, in prima istanza a basse velocità.

Per la conduzione delle prove sperimentali in campo (PTE)⁶, il team di sviluppo ha definito una strategia mirata a garantire sia la sicurezza del personale coinvolto sia l'efficacia dei test stessi. Poiché l'oggetto delle prove era un veicolo ferroviario privo di pilota, operante autonomamente su una linea ferroviaria, un tipo di sperimentazione innovativo per il contesto ferroviario italiano, è stato necessario stabilire un insieme rigoroso di normative e direttive operative con l'obiettivo di garantire la sicurezza durante le operazioni e assicurare il raggiungimento degli obiettivi sperimentali. Inoltre, al fine di stimolare correttamente il sistema ETCS di bordo in attesa dell'attrezzaggio ERTMS/ETCS di livello 2 del circuito il cui completamento è previsto per la prima metà del 2025, il team di sviluppo ha progettato un sistema di protezione ETCS di livello 1 per i test in campo, posizionando delle balise opportunamente programmate lungo l'anello (Fig. 13).

Il team di prova è stato strutturato in modo da includere un test leader, responsabile della supervisione complessiva delle operazioni, affiancato da un Regolatore della Circolazione e di un Agente di Condotta opportunamente formato per monitorare e controllare il veicolo tramite l'interfaccia dedicata con l'ausilio delle telecamere instal-



Figura 12 - Circuito di test di Bologna San Donato (RFI).
Figure 12 - Test circuit of Bologna San Donato (RFI).

7.5. Trial runs in San Donato

The RFI San Donato circuit (Fig. 12), located near Bologna, is an infrastructure dedicated to the experimentation and testing of railway systems and technologies. With a length of 5.749 m, the circuit allows single-track tests, also including curves with radii of 600, 350 and 200 m. The site is equipped with electrified and non-electrified tracks, workshops, warehouses and depots, allowing complete tests on the permanent way, power lines, railway turnouts, vehicles and signalling systems.

The circuit allows validating innovative technologies under operating conditions.

The purpose of this preliminary test campaign was to test the driving functions integrated with the on-board ERTMS subsystem (*European Railway Traffic Management System*), the ATO trackside functions and the on-board and trackside video management system functions acquired by the cameras (*Control and Surveillance System*) as well as the management of drives and braking via TCU (*Train Control Unit*).

In addition, it was necessary to validate the mechanical design of the vehicle, through dynamic field tests, also in order to consolidate the design choices that emerged from the roller bench tests. The mechanical tests are also aimed at verifying the validity of the design from the limit gauge point of view and at verifying the occurrence of unwanted oscillatory motions, in the first instance at low speeds.

For the execution of the field experimental tests (PTE)⁶, the development team defined a strategy aimed at ensuring both the safety of the personnel involved and the effectiveness of the tests themselves. Since the object of the tests was a railway vehicle without a driver, operating autonomously on a railway line, a type of innovative experimentation for the Italian railway context, a strict set of regulations and

⁶ 'Pilot Test Environment', ambiente di test pilota.

⁶ 'Pilot Test Environment'.

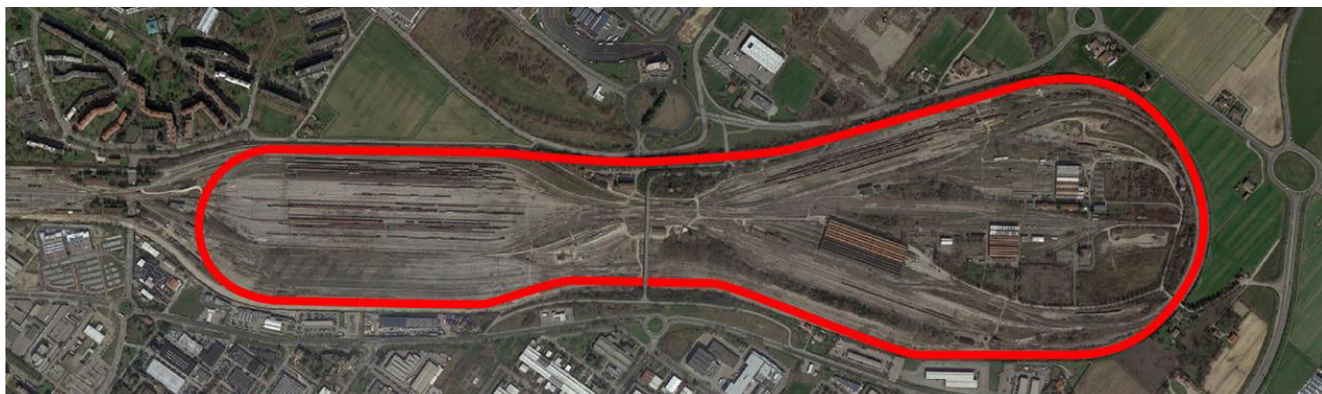


Figura 13 - Circuito di test di Bologna San Donato (RFI).
 Figure 13 - Test circuit of Bologna San Donato (RFI).

late sul veicolo. A supporto di queste attività, era inoltre presente uno staff di osservazione sul campo, incaricato di seguire fisicamente il veicolo lungo il percorso per verificarne i movimenti in tempo reale e rilevare eventuali anomalie operative.

Questa configurazione operativa ha permesso di controllare costantemente il comportamento del veicolo senza pilota e di garantire un controllo ottimale delle variabili sperimentali e la massima sicurezza per tutto il personale coinvolto nelle diverse fasi di prova.

La campagna di test preliminare sul circuito Bologna San Donato ha dato risultati positivi, confermando la validità della progettazione del sistema. Sono state collaudate in campo diverse funzioni del mezzo URV, in particolare le funzioni di guida autonoma e remota, di localizzazione, di gestione dati ETCS e della logica di veicolo e della diagnostica di bordo, nonché la comunicazione radio terra/bordo. I test hanno permesso di verificare inoltre l'efficacia del sistema di protezione ETCS L1 progettato ad hoc, l'integrazione col sistema ATO e l'integrazione in campo col sistema di gestione video terra/bordo. Il comportamento dinamico del veicolo non ha manifestato l'insorgenza di moti parassiti di serpeggio e il veicolo non ha manifestato criticità nell'iscrizione in curva. La carena non ha interferito in alcun punto con l'infrastruttura per cui si possono ritenere validati i calcoli di verifica della sagoma limite.

I test in campo hanno dato anche dimostrazione sperimentale dell'occupazione dei circuiti di binario coinvolti sul tracciato del mezzo URV, rilevata dall'apparato di segnalamento di terra ACC e riscontrato su quadro luminoso dal Regolatore della Circolazione, durante le operazioni di manovra da e verso l'anello e le movimentazioni sull'anello.

8. Applicazioni e vantaggi

Rispetto alle linee ferroviarie convenzionali, le linee ad alta velocità (AV) richiedono politiche di manutenzione quotidiana significativamente più rigide e costose. Questo

operational directives needed to be established with the aim of guaranteeing safety during operations and ensuring the achievement of experimental objectives. In addition, in order to properly stimulate the on-board ETCS system while awaiting ERTMS/ETCS level 2 equipment of the circuit which is expected to be completed in the first half of 2025, the development team designed a level 1 ETCS protection system for field tests, placing appropriately programmed transponders along the circuit (Fig. 13).

The test team has been structured to include a test leader, responsible for the overall supervision of the operations, supported by a Traffic Controller and a Driving Agent appropriately trained to monitor and control the vehicle through the dedicated interface with the help of the cameras installed on the vehicle. To support these activities, there was also field observation staff, in charge of physically following the vehicle along the route to verify its movements in real time and of detecting any operational anomalies.

This operational configuration allowed constantly checking the behaviour of the unmanned vehicle and guaranteeing optimal control of the experimental variables and maximum safety for all personnel involved in the different test phases.

The preliminary test campaign on the Bologna San Donato circuit gave positive results, confirming the validity of the system design. Several functions of the URV have been tested in the field, in particular the autonomous and remote driving, localisation, ETCS data management and vehicle logic and on-board diagnostics functions, as well as ground/on-board radio communication. The tests also allowed verifying the effectiveness of the ETCS L1 protection system designed ad hoc, the integration with the ATO system and the integration in the field with the ground/on-board video management system. The dynamic behaviour of the vehicle did not show the onset of parasitic lateral oscillation and the vehicle did not show criticality in cornering. The chassis did not interfere at any point with the infrastructure hence the limit gauge verification calculations can be considered valid.

The field tests also gave experimental demonstration of the occupation of the track circuits involved on the track of the URV vehicle, detected by the ACC (computerized signal box)

è dovuto alla complessità dei sistemi e alla velocità elevata a cui operano i treni, che impongono standard di sicurezza e affidabilità molto più severi. Di conseguenza, i protocolli di manutenzione devono essere estremamente accurati e frequenti, comportando costi e risorse molto alti.

Con URV ci si è posti l'obiettivo di raggiungere un monitoraggio sostenibile, automatizzato e intelligente delle linee ferroviarie per scopi di sicurezza e diagnostica. Il veicolo potrà facilitare le attività di manutenzione predittiva dell'infrastruttura ferroviaria e rilevare ostacoli e persone non autorizzate lungo la linea ferroviaria, anche in condizioni di visibilità limitata.

Inoltre, URV è concepito come un laboratorio mobile che consente di collaudare, in un ambiente operativo, tecnologie ferroviarie come ad esempio algoritmi di controllo di treni a guida autonoma/remota e sistemi di monitoraggio delle infrastrutture basati su tecniche di Intelligenza Artificiale (AI). Questo laboratorio mobile rappresenta un valore aggiunto per l'azienda, permettendo la validazione di nuove tecnologie ferroviarie in un contesto reale, accelerandone lo sviluppo e la messa in servizio.

Le corse sperimentali di un veicolo senza conducente sull'anello di prova di San Donato aprono la strada alla regolamentazione per l'introduzione e il collaudo di prototipi di tecnologie autonome e di rilevazione ostacoli nel settore ferroviario italiano, aiutando non solo il gestore dell'infrastruttura, ma anche tutti gli stakeholder interessati.

9. Conclusioni

La sperimentazione del prototipo URV ha raggiunto un risultato fondamentale: il primo movimento di un veicolo ferroviario completamente autonomo lungo una linea ferroviaria italiana. URV, con l'equipaggiamento del sistema ATO GoA4 e sensori avanzati per il monitoraggio, rappresenta un progresso significativo nell'integrazione di tecnologie autonome nel settore ferroviario, evidenziando il suo potenziale come soluzione per il monitoraggio e la manutenzione automatizzata delle reti ferroviarie. Uno degli aspetti qualificanti emersi dalla sperimentazione è stato il rafforzamento del know-how aziendale. L'azienda ha intrapreso un progetto pionieristico, avventurandosi in un'area tecnologicamente avanzata favorendo la crescita e l'internalizzazione delle competenze tecniche, in particolare quelle relative alla meccanica del veicolo e al segnalamento ferroviario. Competenze cruciali nello sviluppo di sistemi ferroviari.

Nel mese di agosto 2024 sono stati eseguiti i primi test preliminari in campo con il sistema ERTMS di livello 1. A seguire, si prevede di portare a termine le attività di addestramento del sistema di visione e l'ottimizzazione degli algoritmi e lo sviluppo delle funzionalità di riconoscimento ostacoli. Parallelamente è stata pianificata un'analisi approfondita dei rischi tecnici, funzionali e normativi, propedeutica ai test successivi. Infine, come da timeline

ground signalling apparatus and found on the light panel by the Traffic Controller, during the manoeuvring operations to and from the circuit and the movements on the circuit.

8. Applications and benefits

Compared to conventional railway lines, high-speed (HS) lines require significantly stricter and more expensive daily maintenance policies. This is due to the complexity of the systems and the high speed at which the trains operate, which impose much stricter safety and reliability standards. As a result, maintenance protocols must be extremely accurate and frequent, resulting in very high costs and resources.

With the URV we set ourselves the goal of achieving sustainable, automated and intelligent monitoring of railway lines for safety and diagnostic purposes. The vehicle will be able to facilitate the predictive maintenance activities of the railway infrastructure and detect obstacles and unauthorised persons along the railway line, even in limited visibility conditions.

In addition, the URV is designed as a mobile laboratory that allows railway technologies such as autonomous/remote train control algorithms and infrastructure monitoring systems based on Artificial Intelligence (AI) techniques to be tested in an operational environment. This mobile laboratory represents an added value for the company, allowing the validation of new railway technologies in a real context, accelerating their development and commissioning.

The experimental runs of a driverless vehicle on the San Donato test circuit pave the way for regulation for the introduction and testing of prototypes of autonomous and obstacle detection technologies in the Italian railway sector, helping not only the infrastructure manager, but also all interested stakeholders.

9. Conclusions

The testing of the URV prototype has achieved a fundamental result: the first movement of a fully autonomous railway vehicle along an Italian railway line. The URV, with the equipment of the ATO GoA4 system and advanced sensors for monitoring, represents a significant advance in the integration of autonomous technologies in the railway sector, highlighting its potential as a solution for the monitoring and automated maintenance of railway networks. One of the qualifying aspects that emerged from the experimentation was the strengthening of the company's know-how. The company has embarked on a pioneering project, venturing into a technologically advanced area favouring the growth and internalisation of technical skills, in particular those related to vehicle mechanics and railway signalling. Critical skills in the development of railway systems.

In August 2024, the first preliminary field tests were carried out with the ERTMS level 1 system. Next, the completion of the vision system training activities and the optimisation of algorithms and the development of obstacle recognition features is planned. At the same time, an in-depth

programmata, per la metà del 2025 si darà avvio ai test con ERTMS di livello 2.

Nonostante i risultati incoraggianti, esistono margini di miglioramento che potrebbero portare a ulteriori avanzamenti. Uno dei principali obiettivi futuri sarà l'ottimizzazione delle prestazioni del prototipo URV in condizioni ambientali più critiche e scenari con scarsa visibilità, eseguendo le opportune campagne di test. Inoltre, sarà importante approfondire la capacità del sistema di operare a velocità maggiori, migliorando al contempo le capacità di rilevamento degli ostacoli. Questi aspetti potranno essere esplorati attraverso ulteriori studi e test, mirati a rafforzare l'affidabilità del sistema in un contesto operativo reale.

In prospettiva quindi, URV non solo rappresenta una tecnologia innovativa per il monitoraggio autonomo delle infrastrutture ferroviarie, ma funge anche da laboratorio mobile per lo sviluppo di nuove soluzioni tecnologiche. L'implementazione su larga scala di veicoli autonomi come URV potrebbe lasciare il segno nella gestione ferroviaria, migliorando l'efficienza delle operazioni, riducendo i costi operativi e contribuendo a una maggiore sostenibilità del sistema di trasporto su rotaia.

analysis of the technical, functional and regulatory risks has been planned, preparatory to the subsequent tests. Finally, as scheduled, tests with ERTMS level 2 will start in mid-2025.

Despite encouraging results, there is room for improvement that could lead to further progress. One of the main future objectives will be to optimise the performance of the URV prototype in more critical environmental conditions and scenarios with poor visibility, by carrying out the appropriate test campaigns. In addition, it will be important to go into depth in the system's ability to operate at higher speeds, while improving obstacle detection capabilities. These aspects can be explored through further studies and tests, aimed at strengthening the reliability of the system in a real operational context.

In perspective, therefore, the URV not only represents an innovative technology for the autonomous monitoring of railway infrastructures, but also serves as a mobile laboratory for the development of new technological solutions. The large-scale implementation of autonomous vehicles such as the URVs could make its mark in railway management, improving the efficiency of operations, reducing operating costs and contributing to greater sustainability of the railway transport system.

BIBLIOGRAFIA – REFERENCES

- [1] M. BRUNER, Notizie dall'estero (2024), "Germania: nuove tecnologie di RFI, in vetrina a Berlino cinque importanti novità", *Ingegneria Ferroviaria* n°10.
- [2] RFI – Rete Ferroviaria Italiana, "Diagnostica mobile", <https://www.rfi.it/it/Sicurezza-e- tecnologie/Manutenzione-e-diagnostica/diagnostica-mobile.html>.
- [3] FS News (2023), "RFI ospita l'UIC a Pontassieve e sul Diamante 2.0", <https://www.fsnews.it/it/focus- on/infrastrutture/2023/6/1/rfi-uic-officine-pontassieve-treno-diamante-progetto-harmotrack.html>.
- [4] Network Rail, "New Measurement Train (NMT)", <https://www.networkrail.co.uk/running-the- railway/looking-after-the-railway/our-fleet-machines-and-vehicles/new-measurement-train-nmt/>.
- [5] ROSANO G., MASSINI D., BOCCOLINI L., ZAPPACOSTA C., DI GIALLEONARDO E., SOMASCHINI C., LA PAGLIA I., PUGI L.. (2024), "La diagnostica dell'armamento ferroviario – Possibilità di sviluppo attraverso la misura di accelerazioni e forze di contatto", *Ingegneria Ferroviaria* n°2.
- [6] M. RAJABALINEJAD, L. FRUNT, J. KLINKERS, L. A. VAN DONGEN (2019), "Systems integration for railways advancement in Transportation Systems", Springer, pp. 27–40.
- [7] SHINDE P., MARINOV M. (2023), "Impatto dell'espansione e dell'automazione delle reti metropolitane sulla disponibilità dei macchinisti: un caso di studio nella rete delle West Midlands", *Ingegneria Ferroviaria* n°12.
- [8] SINGH P., DULEBENETS M. A., PASHA J., GONZALEZ E. D. S., LAU Y.-Y., KAMPMANN R. (2021), "Deployment of autonomous trains in rail transportation: Current trends and existing challenges", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 91 427– 91 461.
- [9] M. BRUNER, Notizie dall'estero (2024), "Germania: treni regionali automatizzati", *Ingegneria Ferroviaria* n°10.
- [10] RFI Rete Ferroviaria Italiana (2023), "Ricerca e sviluppo in un tempo nuovo, Innovation and Digital Green Transformation" https://www.rfi.it/content/dam/rfi/news-e- media/pubblicazioni/catalogo_ricerca_e_sviluppo/RFI_ricerca-sviluppo_web_p.%20affiancate.pdf.
- [11] CENELEC: EN 50126, "The specification and demonstration of Reliability", Availability, Maintainability and Safety (RAMS)
- [12] CENELEC: EN 50128, "Railway applications – Communications, signaling and processing systems – Software for railway control and protection systems"
- [13] CENELEC: EN 50129, "Railway applications – Communication, signalling and processing systems - Safety related electronic systems for signalling".

- [14] AMENDOLA A.; BOZZANO M.; CIMATTI A.; DE MURO S.; DE SIMONE S.; FEDELI E.; FIUMARA F.; PETRILLO A.; SANTINI S.; SERRA D.; TESEI M. (2019), “*A new automatic train operation system over European train control system for high-speed line infrastructure monitoring*”. World Congress on Railway Research (WCRR), Tokyo, Japan.
 - [15] AMENDOLA A., BARRUFFO L., BOZZANO M., CIMATTI A., DE SIMONE S., FEDELI E., GABBASOV A., GARRUBBA D. E., GIRARDI M., SERRA D., TIELLA R., ZAMPEDRI G. (2022), “*Formal Design and Validation of an Automatic Train Operation Control System*”. Reliability, Safety and Security of Railway Systems (RSSRAIL), Paris.
 - [16] HORIZON (2020) – WORK PROGRAMME 2018-2020 General Annexes, G. Technology readiness levels (TRL).
 - [17] LIN T., GOYAL P., GIRSHICK R., HE K., DOLLÁR P. (2020), “*Focal loss for dense object detection*”, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., vol. 42, no. 2, pp. 318–327, February.
 - [18] BONGINI F., BERLINCIONI L., BERTINI M., DEL BIMBO A. (2021), “*Partially fake it till you make it: Mixing real and fake thermal images for improved object detection*”, In Proc. of ACM International Conference on Multimedia (ACM MM).
 - [19] FEDELI E., BARRUFFO L., D’AVINO D., DE SIMONE S., DE VITA G., DI MARIO M., GARRUBBA D. E., SERRA D., LAMANNA G. F., RIPAMONTI F., TARSITANO D., AMENDOLA A. (2022), “*Testing Strategy of the RFI Unmanned Railway Vehicle*” World Congress on Railway Research (WCRR) Birmingham, United Kingdom.
-